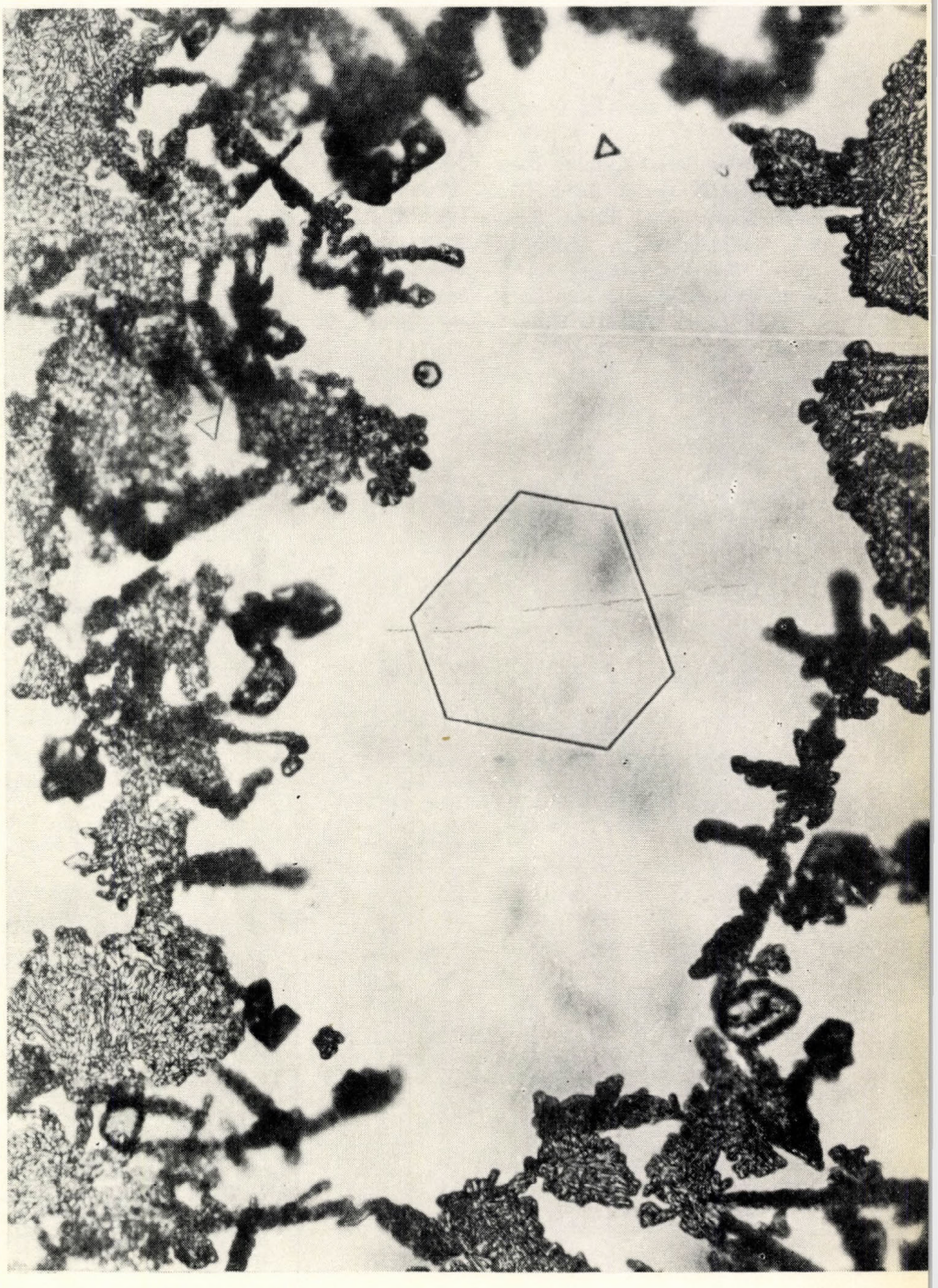
fizikai szemle

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat lapja



1976/1

A szerkesztő bizottság elnöke:

Marx György

A szerkesztésért felelős:

Turiné Frank Zsuzsa

A szerkesztő bizottság titkára:

Berényi Dénes

Szerkesztő bizottság:

Balázs Béla, Barlai Katalin, Barta György, Bozóky László, Csekő Árpád, Dede Miklós, Fehér István, Flórián Endre, Gaal István, Groma Géza, Haiman Ottó, Hoffmann Tibor, Holics László, Károlyházy Frigyes, Keszthelyi Lajos, Kovács István, Mihály László, Schanda János, Soós Károly, Szigeti György, Tóth Eszter, Valkó I. Péter, Vermes Miklós

Címképünk:

Egy szabályos AgBr kristály apró szabálytalan kristályok gyűrűjében. A Nemzetközi Diákolimpián résztvett, díjnyertes Bereczky Géza és Forró Tibor fényképe

TARTALOMJEGYZÉK

Berényi Dénes: A ciklotronok új szerepben 1 oldal
Kovács István: Fizikusok fizikusokról 4 oldal
Kozma László — Rácz Béla — Bor Zsolt: Hangolható festéklézerek 10 oldal
A FIZIKA TANÍTÁSA
Demény András: Mire valók a mechanikai kísérletek? 16 oldal
Marx György: Poláris folyadékok 20 oldal
Fürst Istvánné: A természettudományos tárgyak koordinált oktatása és a Világnézetünk alapjai tárgy egy iskolai kísérlet keretében 20 oldal
Törő Imre: Anyagfejlődés 1975. Bevezető 23 oldal
Blészer Jenő: Relativitáselmélet középiskolásoknak 25 oldal
ESEMÉNYEK 36 oldal
VÉLEMÉNYEK
Marx György: Fizika vagy foxterrier? 38 oldal
Sas Elemér — Tasnádi Gábor: Válasz „A felvételi vizsgák ürügyén" c. cikkre 40 oldal

СОДЕРЖАНИЕ

Д. Береньи: Циклотроны решают новые задачи
И. Ковач: Физики о физиках
Л. Козма — Б. Рац — Ж. Бор: Лазеры с настройкой на растворах красителей
ПРЕПОДАВАНИЕ ФИЗИКИ
А. Демень: Эксперименты по механике — к чему?
Г. Маркс: Полярные жидкости
И. Фюрст: Координированное преподавание естественных наук и курс »Основы нашего мировоззрения« в рамках одной опытной программы обучения для средней школы
И. Тере: Эволюция вещества 1975 — Вступительный доклад
Е. Блесер: Теория относительности для учеников средних школ
СОБЫТИЯ
ОТЗЫВЫ И ВЫРАЖЕНИЯ МНЕНИЙ

INHALT

D. Berényi: Zyklotrone in neuen Rollen
I. Kovács: Physiker über Physiker
L. Kozma — B. Rácz — Zs. Bor: Stimmbare Farbstofflaser
UNTERRICHT DER PHYSIK
A. Demény: Experimente über Mechanik — wozu?
G. Marx: Polare Flüssigkeiten
Frau I. Fürst: Das koordinierte Unterrichten der naturwissenschaftlichen Fächer und das Fach »Grundlagen unserer Weltanschauung« im Rahmen eines Versuchsprogramms an einer Mittelschule
I. Törő: Evolution der Materie 1975 — Eröffnungsvortrag
J. Blészer: Relativitätstheorie für Mittelschüler
EREIGNISSE
STELLUNGNAHMEN UND MEINUNGSÄUSSERUNGEN

CONTENTS

D. Berényi: Cyclotrons tackling new tasks
I. Kovács: Physicists on physicists
L. Kozma — B. Rácz — Zs. Bor: Tunable dye lasers
THE TEACHING OF PHYSICS
A. Demény: Experiments on mechanics — to what purpose?
G. Marx: Polar liquids
Mrs. I. Fürst: The co-ordinated teaching of natural sciences and the course „Bases of our way of looking at the world" within the frame of a secondary school experimental teaching programme
I. Törő: Evolution of matter 1975 — Opening lecture
J. Blészer: Relativity theory for secondary school pupils
RESULTS
OPINIONS

A FIZIKAI SZEMLE XXVI. ÉVFOLYAMÁNAK TARTALOMJEGYZÉKE

Akadémiai Természettudományos Oktatási Munkaközösség: A második főtétel: kristály-modell 459
A KFKI rekonstruált reaktora (Várkonyi Lajos) 427
Baky Miklós: Az egymáshoz közel látszó csillagok mozgása 131
Barasenkov V. Sz.: Tachionok, a fény sebességénél nagyobb sebességgel mozgó részecskék 134
Barta György—Vermes Miklós: Renner János 107
Bata Lajos: Folyadékkristályok fizikai, biológiai rendszerekben és a gyakorlati alkalmazásokban 88
Bay Zoltán: Visszaemlékezés a magyar holdvisszhang kísérletekre 41
Beck Mihály: Anyagfejlődés'76 441
Berecz István—Bohátka Sándor—Murányi László: A fizikai elven alapuló gázelemzés módszerei és azok alkalmazása az orvosi kutatásban és klinikumban 81
Berényi Dénes: A ciklotronok új szerepben 1
Berényi Dénes: Újabb fizikai módszerek a szerkezetkutatásban 53
Bérczi Szaniszló: Növényi szimmetriák 59
Biró Gábor: A fizika és a mérés 374
Bohátka Sándor—Murányi László—Berecz István: A fizikai elven alapuló gázelemzés módszerei és azok alkalmazása az orvosi kutatásban és klinikumban 81
Bor Zsolt—Kozma László—Rácz Béla: Hangolható festéklézerek 10
Boros László: Szilárdtestek exoelektron emissziója 121
Bölöni Péter: A hőmérséklet konfidencia tartománya ideális gázban 377
Dézsi Zoltán—Dézsi Zoltánné: Az atomfizika és a filatelia 381
Dézsi Zoltánné—Dézsi Zoltán: Az atomfizika és a filatelia 381
Dudás Brigitta: A genetika kolinearitási tétele 367
Erő János: Atommagok cluster szerkezetének vizsgálata nagyenergiájú protonokkal 415
Farkas Győző: Fotoeffektus igen nagy fényintenzitásoknál: a többfotonos fotoeffektus kimutatása lézerfénnyel 429
Forgács Gábor: Katasztrófaelmélet 329
Gombosi Tamás—Kóta József—Somogyi Antal—Varga András: A galaktikus kozmikus sugárzás anizotrópiája ... 407
Gyulai József: Ionimplantációs kutatások 423
Heisenberg W.: Lezárul-e a fizika? 62
Illy József: Az általános relativitáselmélet megszületése 293
Jeszenszky Ferenc: A mérés problémája a kvantummechanikában 379
Kapuy Ede: A kvantummechanika és a kémia 68
Károlyházy Frigyes: Az energia eloszlása 471
Keszthelyi Lajos: A napenergia hasznosítás problémái 281
Kóta József—Somogyi Antal—Varga András—Gombosi Tamás: A galaktikus kozmikus sugárzás anizotrópiája ... 407
Kovács István: Fizikusok fizikusokról 4
Kovács István: Tudomány és művészet 181
Kozma László—Rácz Béla—Bor Zsolt: Hangolható festéklézerek 10
Kunszt Zoltán: A nagyenergiájú fizika új, különleges tulajdonságú részecskéi, a pszion-család 211
Marx György: Werner Heisenberg 65
Murányi László—Berecz István—Bohátka Sándor: A fizikai elven alapuló gázelemzés módszerei és azok alkalmazása az orvosi kutatásban és klinikumban 81
Orosz László: A gén és a cisztron 321
Pál Lénárd: Miről mesélnek a fluktációk? 401
Prigogine I.: Az élet termodinamikája 161
Pullmann B.: Kvantum — biofizika 334
Ramsey N. F.: A neutron elektromos és mágneses dipólmomentuma 205
Rácz Béla—Bor Zsolt—Kozma László: Hangolható festéklézerek 10
Sexl R. U.: A második főtétel: ideális gázmodell 447
Somogyi Antal—Varga András—Gombosi Tamás—Kóta József: A galaktikus kozmikus sugárzás anizotrópiája ... 407
Szász András: Az ultraibolya fotoemissziós mérési módszer és alkalmazása a szilárdtestek fizikájában 103
Szegő Károly—Tóth Kálmán: Multiperiferializmus, multiperiferiális modellek 170
Szent-Györgyi Albert: Elektronok szerepe az életjelenségekben 201
Szilárd József: Zemplén Győző, Eötvös Loránd tanítványa 252
Tarnóczy Tamás: Az ipari zaj mint méréstechnikai és egészségügyi probléma 286
Tasnádi Péter: A második főtétel: gumi-modell 454
Tóth Kálmán—Szegő Károly: Multiperiferializmus, multiperiferiális modellek 170
Vajda Pál: Molekulaspektroszkópiai iskola Magyarországon 225
Varga András—Gombosi Tamás—Kóta József—Somogyi Antal: A galaktikus kozmikus sugárzás anizotrópiája 407
Varsányi György: A második főtétel a molekuláris szemlélet tükrében I. 442
Vatai Endre: Alapvető kölcsönhatás-e a gyenge kölcsönhatás? 290
Vermes Miklós—Barta György: Renner János 107
Weisskopf V.: A tudomány határai és korlátai 248
Weisskopf V.: Az anyag alapvető szerkezete 241
Wiedemann László: Tértöltési egyenletek közelítő megoldása 143
Wigner Jenő: A szimmetria-elvek ötven esztendeje 361
Wilson K. G.: Renormálási csoport és blokk-spinek 220
Zimmer György: Doménfalak mozgása egyetemleges mágneses anyagokban 410

A FIZIKA TANÍTÁSA

Anyagfejlődés 76' (fizika-, kémia-, biológiatanárok tanácskozása Sárospatakon) ... 23
Baez A.: A természettudományok eredményesebb tanításáról ... 147
Bartucz Mária—Ruff Imre: A statisztikus termodinamika elemeinek bevezetése a középiskolák III. osztályában .. 432
Blészer Jenő: Relativitáselmélet — középiskolásoknak ... 25
Bölönyi György: Fizikai távmérők ... 391
Csákány Antalné: A hőtan alapfogalmainak tanításáról ... 108
Csányi Vilmos—Kajtár Márton—Marx György: Szovjet iskolákban ... 184
Csekő Árpád: A fizikatanárok XIX. országos ankétja és fizikai eszközkiállítása ... 338
Dede Miklós—Demény András: A mechanika húszparancsolata ... 335
Demény András—Dede Miklós: A mechanika húszparancsolata ... 335
Demény András: Mire valók a mechanikai kísérletek? ... 16
Farkas Gyula: Néhány módszertani megjegyzés a kinematika és dinamika elemeinek tanításához a gimnázium II. osztályában ... 342
Fürst Istvánné: A természettudományos tárgyak koordinált oktatása és a világnézetünk alapjai tárgy egy iskolai kísérlet keretében ... 20
Hawkins D.: Én, te és a harmadik ... 305
Horváthy Péter: Konzervatív rendszerek helyettesítő rendszerei ... 345
Javaslat a természettudomány tanítására I. II. ... 258; 310
Kajtár Márton—Csányi Vilmos—Marx György: Szovjet iskolákban ... 184
Karplus R.: Fizika kezdők számára ... 186
Korsós Ferencné: A természettudományok komplex tanítása és a matematika ... 69
László Tihamér—Lázár György: Néhány antennamérési laboratóriumi gyakorlat ... 154
Lázár György—László Tihamér: Néhány antennamérési laboratóriumi gyakorlat ... 154
Marx György: Poláros folyadékok ... 20
Marx György—Csányi Vilmos—Kajtár Márton: Szovjet iskolákban ... 184
Ogborn J. M.: A második főtétel ... 193
Ogborn J. M.: Az impulzust először: alternatív út Newton törvényeihez ... 236
Pető Gábor Pál—Szabadváry Ferenc: A kémia nagy pillanatai II. — III. ... 350; 351
Ruff Imre—Bartucz Mária: A statisztikus termodinamika elemeinek bevezetése a középiskolák III. osztályában .. 432
Sexl R. U.: Mit tanítsunk fizikából és miért? ... 235
Szabadváry Ferenc—Pető Gábor Pál: A kémia nagy pillanatai II. — III. ... 350; 351
Szabó József—Sztaricskai Tibor: Egyszerű módszer a Boltzmann-állandó közvetett meghatározására ... 152
Sztaricskai Tibor—Szabó József: Egyszerű módszer a Boltzmann-állandó közvetett meghatározására ... 152
Törő Imre: Anyagfejlődés 1975 ... 22
Varga Lajos: Az új országos fizika tanterv ... 384

ESEMÉNYEK

36, 37, 71, 72, 74, 76, 112, 115, 200, 275, 320, 353, 356, 360, 396, 397, 478

EREDMÉNYEK

3, 77, 116, 117, 157, 159, 269

KÖNYVEK

Csákvári Béla: Szervetlen anyagok molekulageometriája (M. Gy.) ... 240
Damjanovich Sándor: Molekulaóriások biofizikája (B. D.) ... 440
Fizika 1975 (K. L.) ... 78
Marx György: Kimeríthetetlen anyag (B. D.) ... 78
TV egyetem. A változó világ I. rész; A változó világegyetem (V. I. P.) ... 439

VÉLEMÉNYEK

Alekszandrov A.: Legfőbb feladatunk: új ismeretek szerzése alapkutatások útján ... 240
Berényi Dénes: „Alkalmazott kontra alapkutatás?" ... 80
Berényi Dénes: Az erők egyesítése vagy szétforgácsolása ... 119
Csákány Antal: Kalkulátor és mikrokomputer, avagy Dávid és Góliát? ... 478
Fenyő Márta—Groma Géza: A fizikusi munka megbecsüléséről ... 160
Groma Géza—Fenyő Márta: A fizikusi munka megbecsüléséről ... 160
Hawkins D.: Levél Budapestre ... 320
Isza Sándor: Egy hibás fogalomalkotás következményei; egy versenyfeladat tanulsága ... 397
Kovács László: Oktatási kísérletek a természettudomány egybehangolt tanítására ... 80
Marx György: Fizika vagy foxterrier ... 38
Sas Elemér—Tasnádi Péter: Válasz Fekete Gyulának „A felvételi vizsgák ürügyén" c. írására ... 40
Szalay Sándor: „Alkalmazott kontra alapkutatás?" ... 79
Tasnádi Péter—Sas Elemér: Válasz Fekete Gyulának „A felvételi vizsgák ürügyén" c. írására ... 40
Teleki Péter: Földön kívüli civilizáció ... 277
Varga Tamás: A zsebszámítógépek várható hatása az iskolára ... 440
Vélemény a véleményekről ... 40
Wiedemann László: Hozzászólás Isza Sándor cikkéhez ... 400
Zámori Zoltán: Előszó egy diplomamunkához ... 118

fizikai szemle

AZ EÖTVÖS LORÁND FIZIKAI TÁRSULAT LAPJA

Alapította Eötvös Loránd 1891-ben Mathematikai és Physikai Lapok néven

XXVI. évfolyam 1. szám 1976. január

A CIKLOTRONOK ÚJ SZEREPBEN

Berényi Dénes
MTA Atommag Kutató Intézete, Debrecen

Az új szerep

Az első ciklotron 1932-ben történt üzembehelyezése óta a berendezés jelentős változáson ment keresztül nemcsak technikailag, de alkalmazási terület tekintetében is. Az elmúlt több, mint negyven év alatt sok újat megtudtunk a természetről, elsősorban az atommagról a ciklotron segítségével. Az ilyen irányú kutatómunka ma is folyik világszerte. Erről és a ciklotronon magán végbement nagy instrumentális fejlődésről külön előadások számolnak be e szimpóziumnak a során.

Ami azonban erre a tudományos összejövetelre annyira különböző szakterületek képviselőit összehozta, az a ciklotronnak az az új szerepe, helyesebben szerepei, amelyek az utóbbi 5—10 évben, de különösen a legutóbbi néhány évben egyre fokozottabb hangsúlyt kapnak.

Arról van szó ugyanis, hogy a *ciklotron egyre határozottabban megszűnik az atommagfizikai laboratóriumok és kutatás kizárólagos eszköze lenni, hanem túlmenően a fizika és a természettudomány más ágaiban (szilárdtestfizika, forró-kémia, biológia stb.) történő fokozódó felhasználásán, egyre fontosabb és hovatovább nélkülözhetetlen szerepet tölt be a korszerű ipar szempontjából annyira fontos modern anyagvizsgálatban és nemcsak az orvosi kutatásban, de a mindennapi klinikai gyakorlatban is, továbbá környezetvédelmi és nukleáris energetikai feladatok megoldásában.*

Ez az az új szerep az, amelyik a kisebb ciklotronok valóságos sorozatgyártását teremtette meg a világon több vállalatnál is. A bécsi Atomenergia Ügynökség kiadványa szerint 1975-ben a világon 30 olyan ciklotron működik (szemben az 1970-ben működő 8 ilyennel), amelyeket kifejezetten alkalmazott feladatok, aktivációs analízis, izotóptermelés, terápiás besugárzás stb. ellátására létesítettek. A fenti számban nem tükröződik az a tény, hogy a más, elsősorban magfizikai célokra épített ciklotronok is egyre intenzívebben foglalkoznak alkalmazott problémák megoldásával. A Californiai Egyetem ciklotron laboratóriumában például a fenntartás közel 60%-át szerződéses, alkalmazott kutatásokból fedezik. Pl. szolgáltatásszerűen végzik a smog minták rutin analízisét, naponta 2500-at. Egy-egy ilyen analízis költsége kevesebb, mint 2 dollár. Jellemző, hogy egy olyan kis ország, mint Finnország is két új ciklotront vásárolt az utóbbi két évben (Turku, Jyväskyla), egyet a Szovjetunióból, egyet Svédországból elsősorban a szóbanforgó alkalmazott feladatok megoldására.

Végeredményben is a ciklotronnak ebben az új szerepben való megjelenését meglehetősen törvényszerű dolognak kell tekintenünk. A természettudományok és különösen a fizika fejlődésében megfigyelhető az a folyamat, hogy a felfedezések és jelentős kísérleti berendezések előbb-utóbb kilépnek szaktudományuk kereteiből és más tudományágakat is megtermékenyítenek, sőt hozzájárulnak a mindennapi élet által felvetett népgazdasági igények kielégítéséhez.

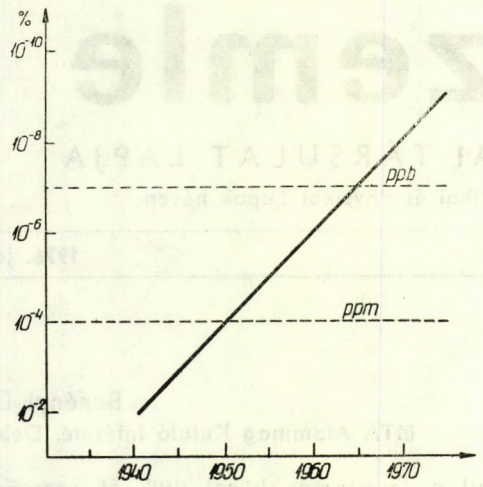
Erről az új szerepről, a ciklotronok széleskörű alkalmazásáról fog szólni a szimpózium előadásainak a zöme. Amit ebben a rövid bevezető előadásban célomnak tekintek az nem több, mint az, hogy néhány fontos alkalmazást kiemeljek és már itt a szimpózium elején mintegy ezáltal megüssem az alaphangot, amelynek részletes motivációit hallhatjuk majd a továbbiakban.

Kémiai analízis, anyagvizsgálat

A kémiai analitika fejlődésének egyik főiránya a gyakorlati igények által megkövetelt egyre nagyobb tisztaságú anyagok előállítása során az egyre kisebb mennyiségben jelenlevő szennyezések kimutatása. Jól mutatja ezt a tendenciát az 1. ábránk, amely tájékoztatásképpen bemutatja a legkisebb szennyezések kimutatására vonatkozó igényeket az utóbbi évtizedekben. A negyvenes évek igényeitől a mai félvezető-ipar és finomkohászati igényekig jó néhány nagyságrendes a változás és most már igen sok esetben az igény a tisztaságra nemcsak a ppm-et (10^{-6}), de a ppb-t (10^{-9}) is felülmúlja.

Az annyira fontos könnyű elem szennyezések (pl. Be, B, C, N, O, S) megbízható kimutatására ebben a koncentráció tartományban gyakorlatilag

Megnyitó előadás az Interdiszciplináris Ciklotron Szimpóziumon, Debrecen, 1975. aug. 25-én.



1. ábra. Tájékoztató diagramm arról, hogy az ipar igényei hogy nőttek az anyagok tisztaságával kapcsolatban az évek függvényében. Az y-tengelyen a maximálisan megengedhető szennyezés van feltüntetve

más, mint a töltött részecske esetleg nagyenergiájú foton besugárzással történő analízis, nem áll rendelkezésre. 1 ppb-ig terjedő mennyiségben határoznak meg pl. oxigént szilíciumban, germániumban, galliumarzenidben, szenet szilíciumban, nitrogént és bórt különböző fémekben és így tovább.

A fentiek szinte már önmagukban is indokolnák ciklotronok létesítését a modern ipari igények kielégítésére. A ciklotronok analitikai alkalmazásainak spektruma azonban igen széles, számos egyedülálló lehetőséget kínál. Ezek különösen kibővültek a legutóbbi néhány évben, egyre intenzívebben alkalmazva ciklotronoknál nemcsak a töltött részecske (proton, alfa-rész, hélium-3 stb.) besugárzással történő aktivációs analízist, hanem az ún. prompt analízist (amelyben rádioaktív mag nem keletkezik, hanem a magreakciókban prompt kilépő sugárzásokat használjuk fel a jelenlevő elemek azonosítására), a töltött részecske gerjesztéses röntgenfluoreszcencia analízist és a rugalmasan szórt töltött részecskékkel végzett analízist is.

A következőkben egy táblázatban foglaljuk össze a különböző kínálkozó lehetőségeket, majd ezek egyikéhez-másikához fűzünk megjegyzéseket.

A könnyű elemek kimutathatóságáról az igen alacsony koncentráció tartományban már szóltunk, könnyen belátható az is, hogy a részecskék energiájának és minőségének változtatási lehetősége milyen plusz flexibilitást jelent a vizsgálandó mintában jelenlevő más elemek hatásának (matrix effektusok) kiküszöbölésére, szemben a reaktorneutronok és a neutron generátorból eredő neutronok fix energiájával, illetve energia eloszlásával.

A mélységi analízis nemcsak a diffúzió és a félvezető aktiválás folyamatának tudományos vizsgálata szempontjából fontos, hanem a finom kohászatban a felületi eloszlás és a felület alatti rétegződés meghatározására is. A stabil izotópos nyomjelzés nélkülözhetetlen lehet olyan ipari vagy

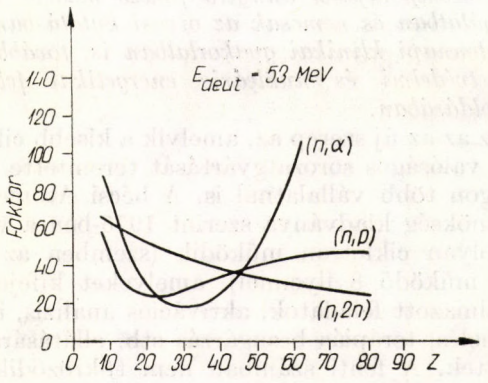
1. táblázat

A kémiai analízisben és anyagvizsgálatban a ciklotron által nyújtott lehetőségek

Könnyű elemek (B, C, N, O, S stb) kimutatása a ppm-ppb tartományban töltött részecske (proton, alfa-rész stb.) besugárzással
Matrix-effektusok kiküszöbölése a besugárzó részecske energiájának vagy minőségének változtatásával (ami reaktornál, neutron generátornál nem lehetséges) más, mint könnyű elemek kimutatásánál
Mélységi eloszlás vizsgálata (esetleg síkbeli is) az egyes elemekre a felület közelében
Aktivációs analízis ciklotronban keltett változtatható energiájú *gyors neutronokkal*
Stabil izotóp tartalom meghatározás és stabil izotópos nyomjelzés, pl. $^{12}C-^{13}C$, $^{16}O-^{18}O$
Nagypontosságú (jóval 1% alatti pontossággal) vastagság-mérés nagyenergiájú protonokkal

biológiai folyamatok vizsgálatánál, ahol valamilyen okból a rádioaktivitás jelenléte zavarna. Ami a ciklotronokban előállított gyors neutronokkal végzett aktivációs analízist illeti, az a neutron generátorokkal végezhető aktivációs analízis továbbfejlesztésének, kiterjesztésének tekinthető. Mint a 2. ábra mutatja a kimutathatósági határ („érzékenység") legalább egy nagyságrenddel, sőt széles tartományban több mint százas faktorral nő.

Végül említsük meg itt, hogy a ciklotronnal végzett analitikai eljárások általában roncsolásmentesek és gyorsak, rutinszerűen kidolgozott vizsgálatok esetén esetleg csak perceket vesznek igénybe. Éppen ezért előszeretettel használják a víz, talaj és levegőszennyezettségi minták sorozat mérésére.



2. ábra. A gyors neutronokkal végzett aktívációs analízis érzékenységének növekedése (az y-tengelyen az érzékenység növekedés faktora), ha neutron generátorból nyert 14 MeV-os energiájú neutronok helyett ciklotronban előállított neutronokat használunk, amelyeket Be-célanyag 53 MeV-os deuteronokkal történő bombázásával hozunk létre (Kriván és Münzel, J. Radioanal. Chem. *15* 1973 p. 575)

Biológiai-orvosi kutatás, klinikai gyakorlat

A biológiai-orvosi alkalmazások területén is a lehetőségek sokrétűségét, tág terét kell mindenekelőtt kiemelnünk. Ezek egy része visszautal illetve fedésben van az előbb tárgyalt analitikai eljárásokkal. A 2. táblázatban igyekeztünk összefoglalni azokat a területeket, amelyeket a ciklotron adta lehetőségek közelről érintenek.

A táblázat kiegészítésére a következőket szeretném megjegyezni. A nyomelemek biológiai-orvosi jelentőségének felismerése és kutatása éppen napjainkban kerül egyre inkább előtérbe.

A biológiailag olyan nagy jelentőségű elemeknek, mint O, C, N nincs a reaktorban előállított rádioaktív izotópok között alkalmas felezési idejű izotópja. Így ciklotronban előállítottakkal lehet csak dolgozni, de csak ciklotron mellett, mivel ezek felezési ideje is rövid a szállításhoz.

Számos diagnosztikai vizsgálatot gyakorlatilag csak ciklotronban előállított és meglehetősen rövid életű izotópokkal (tehát csak ciklotron mellett) lehet elvégezni, mint csont metasztázis, lágy szövet tumor stb. lokalizációját ^{11}C, ^{18}F, ^{81}Rb stb. izotópokkal vagy az agyvéráram, a szívizom véráram mérését ^{81m}Kr, ^{15}O stb. izotópokkal. Ugyancsak nagyon jelentős az egyes diagnosztikai vizsgálatokban alkalmazott reaktorban előállított izotópok helyettesítése ciklotronban előállított alkalmasabbakkal. Így pl. a ^{131}I helyett a ^{123}I alkalmazása az utóbbinak kisebb energiájú sugárzása és rövidebb felezési ideje miatt a megfelelő sugárterhelés kb. 100-as faktorral való csökkenését jelenti. Meg kell itt jegyeznünk, hogy egy az Egyesült Államokból származó kimutatás szerint az összes rádioizotópos diagnosztikai vizsgálatok mintegy 85% (ez ott több, mint 400 ezer embert jelent) ^{131}I-dal történt, de már megkezdődött helyette a ^{123}I bevezetése.

2. táblázat

A biológiai-orvosi kutatás és a klinikai gyakorlat számára a ciklotron nyújtotta lehetőségek

Kutatás	Nyomelem meghatározás Stabil-izotópos nyomjelzés Sugárbiológia töltött részekkel Nyomjelzéses kutatások ^{11}C, ^{13}N, ^{15}O és más ciklotronban termelt rövid életű izotóppal
Diagnosztika	Ciklotronban termelt rövid életű izotópok felhasználása, részben reaktorban előállított hosszabb élettartamúak helyettesítése, a diagnosztikában; pl. ^{131}I helyett ^{123}I, ^{60}Co helyett ^{57}Co
Terápia	Terápia ciklotronban termelt izotópokkal Gyors neutron, töltött részecske besugárzás rákos daganatok gyógyításában

A tumor kezelésnél a ciklotronokban előállított gyors neutron terápia bevezetése a szakemberek szerint olyan nagy jelentőségű fordulatot hoz, mint a maga idejében a röntgen-terápia.

Így nagyon is érthető Almond professzornak 1972-ben tett kijelentése, amely szerint „Előre lehet látni az időt, amikor minden nagy orvosi centrum 35 MeV-os deuteronokat termelő ciklotronnal fog rendelkezni, nappal besugárzási terápiára, éjjel pedig rádioizotóp termelésre és rádiobiológiai kutatásra használva". A kijelentés óta eltelt mintegy három év alatt az ilyen célra szolgáló ciklotrok száma legalábbis megduplázódott.

* * *

Sok lényeges alapvető tudományos és gyakorlati alkalmazásra a hosszú élettartamú izotópok ciklotronban történő termelésétől, a forró-kémiáig és a nukleáris energetikáig nem térhettem ki ebben a rövid bevezető előadásban. A célom azonban nem is a teljességre törekvés volt, hiszen éppen az ennek a szimpóziumnak, a szimpózium további előadásainak és vitáinak a célja, hogy minél több lehetőséget, minél alaposabban feltárjon és megvitasson.

EREDMÉNYEK

PULZÁROK: TERMÉSZETES FOTONRAKÉTÁK?

A pulzárok — azok a csillagok, amelyek szabályos időközönként erősödő és gyengülő sugárzást bocsátanak ki — természetes fotonrakétaként működnek, kihasználva a kisugárzott energia aszimmetrikus térbeli eloszlását. Végeredményben így foglalható össze annak az új elméletnek a lényege, amely megmagyarázza ezeknek a csillagoknak az őket szülő galaxishoz képesti nagy (100 km/sec-t is elérő) sebességét.

E. R. Harrison és *E. Tademan* [The Astrophysical Journal *201*, 447 (1975)] felhívják a figyelmet arra a már korábban is ismert tényre, hogy a pulzárok sebessége nagyobb, mint a galaxisból való szökési sebesség. Ezek a csillagok nincsenek kötve a galaxisban, valószínű, hogy keletkezésük után valamilyen állandó vagy hirtelen erőhatás gyorsította őket. A legegyszerűbb elképzelés, hogy a pulzárt szülő szupernova aszimmetrikus volt, és a csillagot a robbanás egyik oldalán kilőtte. A szerzők által javasolt modell egy alternatíva vagy járulékos effektus az előbbihez.

A modell alapfeltevése, hogy a pulzár mágneses tere dipólszerű (mint egy közönséges rúdmágnes tere), de a dipólus tengelye nem esik egybe a pulzár forgástengelyével. Az ilyen elrendezés aszimmetrikus sugárzást bocsát ki a forgástengely irányában; Harrison és Tademan szerint az impulzus eloszlás aszimmetriája és nagysága elegendő ahhoz, hogy a megfigyelt 100 km/sec nagyságrendű sebességet magyarázza. A szerzők szerint az effektusnak különösen a csillag születését követő rövid periódusban van jelentősége.

Mihály László

FIZIKUSOK FIZIKUSOKRÓL

Gustav Hertz (1887—1975) emlékezete és az atomelmélet kialakulása

Kovács István
BME Fizikai Intézet, Atomfizika Tanszék

A 19. század utolsó és a 20. század első évtizedeiben a fizikának egy teljesen új korszaka alakult ki, mely jelentőségében csak Galileitől Newtonig tartó időszakkal hasonlítható össze. A fizika történet ezen új szakaszának döntő forduló pontjai legnagyobb részt a német fizikusok neveihez fűződnek, vagy azokhoz, akik velük a legszorosabb kapcsolatban állottak. A történelmileg talán csak egyszer kialakuló helyzet, mely mintegy fél évszázadon keresztül biztosította Berlin vezető szerepét a fizika történetében és a német fizika jelentőségét a fizikai világkép forradalmasításában, sok körülmény szerencsés találkozásának volt a következménye. Ezek közül nyilván a leglényegesebbek közé tartozik néhány kimagasló fizikus hatása, akik személyükben a korabeli fizika kialakulását átfogóan képviselték és a fizika előrehaladásához tett saját alapvető hozzájárulásukon túl, ismeretelméleti és tudománytörténeti ítéleteik alapján a fejlődési irányzatokat és azok úttörő jellegét felismerték. Ennek szemléltetésére nagy jelentőségű és a maga nemében páratlan az a könyv, melyet a berlini Akadémiai Kiadó jelentetett meg 1975-ben „Fizikusok fizikusokról" címmel (Ch. Kristen és H. G. Körber összeállításában, H. J. Treder bevezetésével). Ez a könyv tartalmazza a berlini Akadémia összes tagjának az ajánlásait 1870-től 1930-ig, nagyrészüket az eredeti kézírások fakszimiléivel. Ezek a megválasztásra irányuló ajánlások tulajdonképpen a kortársak szemüvegén keresztül az újabbkori fizika életrajzokba foglalt történetét elevenítik meg, amikoris az ajánlások néha többet mondanak magukról az ajánlókról, mint magáról az ajánlott tudósról. Természetesen lehetetlen mindannak ismertetése, ami ezekben az életrajzokban található: válogatásra van tehát szükség. Használjuk fel ezt az alkalmat arra — a tavaly elhunyt Nobel-díjas Gustav Hertz emlékére —, hogy ezeken az ajánlásokon keresztül megmutassuk azt az utat, mely az atomelmélet kialakulásához és ezen belül a döntő jelentőségű Franck—Hertz kísérlethez vezetett.

Kiinduló pontként válasszuk az 1890-es évet. Ebben az időben a klasszikus fizika fejlődése lényegében már lezárult, miután H. Hertz három évvel előtte az elektromágneses hullámok kísérleti kimutatásával a távolbahatás elmélete és a Maxwell-féle közelhatás elmélete közötti vitát eldöntötte az utóbbi javára. Helmholtz 1889-ben a berlini Akadémiához küldött ajánlásában ezt így fogalmazta meg: „Ezáltal kimutatta, hogy az elektrodinamikai és mágneses hatásoknak időre van szükségük ahhoz, hogy a térben kiterjedjenek, hogy ezen terjedésnek a módja a legnagyobb mértékben hasonló a fény terjedéséhez, tehát kimutatott egy olyan nézetet, melyet már Maxwell elméletileg valószínűvé tett." Az elméleti fizika alapját ekkor a matematikailag magas fokra fejlesztett mechanika alkotta. A mechanikához hasonlóan az egész klasszikus fizika minden fizikai mennyiség folytonos változásának elképzelésére volt felépítve. Ennek megfelelően az általános fizikai törvények differenciálegyenletek alakjában, tehát a fizikai mennyiségek és azok térkoordináták és idő szerinti differenciálhányadosai közötti összefüggések alakjában voltak megfogalmazva. Példák erre a hidrodinamika alapegyenletei, amelyekből minden a folyadékban lehetséges mozgásfolyamat levezethető, vagy az elektrodinamika Maxwell-féle alapegyenletei. Ezekben a differenciálegyenletekben előforduló állandók jellemzik az anyag azon tulajdonságait, amelyek mellett a folyamatok létrejönnek, mint pl. a folyadék sűrűsége és kompresszibilitása vagy a fém vezetőképessége. Ezen kísérletileg meghatározható anyagi állandókat általában a természet által adottaknak tekintették. Arra a lehetőségre, hogy ezeket a test atomi felépítéséből kiszámítsák, akkoriban még nem gondolt senki.

Kivételt képezett a kinetikus gázelmélet, melynek alapjait 1856—57-ben A. Krönig és R. Clausius rakták le. Kirchoff 1876-ban Clausiusra vonatkozó néhány soros akadémiai ajánlásában ezt írja: „Közleményei legnagyobb részben a mechanikai hőelméletre és az ezzel szoros összefüggésben álló gázelméletre vonatkoznak." A kinetikus gázelmélet sikere olyan nagy volt, hogy helyességéhez alig fért kétség. Mindenesetre a klasszikus elméleti fizikában kétszeres vonatkozásban is idegen testként szerepelt: egyfelől ellentmondott a fizikába itt bevezetett atomi tárgyalás a gáznak, mint kontinuumnak addigi felfogásával, másfelől a nyomásnak és a hőmérsékletnek statisztikus középértékként való értelmezése nehezen volt összeegyeztethető az addigi felfogással, amely ezeket élesen meghatározott és tetszés szerinti pontossággal mérhető mennyiségeknek tartotta. Ez magyarázza, hogy az atomelmélet diadalra juttatásáért még a századforduló tájékán is ádáz harcot kellett vívni elsősorban a pozitivisták ellen, kiknek fő képviselői E. Mach és W. Ostwald voltak. Döntő szerepe volt ebben a harcban L. Boltzmann-nak (akinek Helmholtz által írt akadémiai ajánlásában ez áll: „Életének fő műve a kinetikus hőelmélet, nevezetesen ennek a gázokra való alkalmazása"), igaz drága árat fizetett érte: ellenfelei öngyilkosságba hajszolták. Planck volt az, aki a végső elégtételt szolgáltatta Boltzmann-nak: a „Boltzmann-állandó" elnevezés tőle származik. Igaz, közöttük is voltak nézeteltérések, de végülis Planck feketesugárzás törvényében a Boltzmann-állandó és a Planck-állandó már békésen együtt szerepel. Végülis Einstein és Smoluchowsky 1904-ben a Brown-mozgás elméleti értelmezésével a folyadékmolekulák mozgására és a jelenség statisztikus jellegére olyan közvetlen bizonyítékkal szolgált, amely a legutolsó kétségeket is eloszlatta.

Az a gondolat, hogy az atomok kisebb alkotórészekből épülnek fel, addig míg ilyen részeket fel nem fedeztek, nem merülhetett fel. Az elektront, mint önálló töltött részecskét 1897-ben fedezték fel, alig három évvel korábban, mint a Planck-féle hatáskvantumot. Az elektron felfedezésének története igen érdekes példa arra vonatkozóan, hogy egy kísérlet téves értelmezése a tudomány fejlődését hosszú évekig mennyire akadályozhatja. H. Hertz már 1883-ban megkísérelte kimutatni a katódsugarak elektromos térben való eltérülését. A katódsugarak akkor már több mint 20 éve ismeretesek voltak anélkül azonban, hogy azok természetéről bármit is tudtak volna. A mágneses térben való erős eltérülése kézenfekvővé tette, hogy feltehetően negatív töltésű részecskékből álló sugárzás. Az ilyen sugaraknak azonban elektromos térben is el kell térülniük és Hertz éppen ezt akarta kimutatni. A kísérlet azonban negatív eredménnyel végződött. Ma már ismerjük az ionizált ritka gázok viselkedését és könnyen megértjük, hogy a kísérlet miért végződött kudarccal. A vákuum nem volt kielégítő és ennek következtében nem volt lehetséges a katódsugár által ionizált gáz belsejében megfelelő erősségű elektromos teret fenntartani. 14 évvel később sikerült J. J. Thomson-nak kifogástalan kísérleti feltételek mellett a katódsugarak elektromos és mágneses eltérülését megmérni és ebből az elektront fajlagos töltését (e/m) meghatározni és ezzel az elektron létezését bebizonyítani. Rubens 1910-es akadémiai ajánlásában erről ezt írja: „Thomson felfedezései között található az a rendkívül fontos megfigyelés, hogy a negatív töltésű részecskék, amelyekből Geissler-csőben a katódsugarak állanak, a gáz természetétől és az elektródok tulajdonságaitól független töltés/tömeg viszonnyal bírnak és hogy ez a viszony több mint 700-szor nagyobb, mint a hidrogén ionnál." A közbenső időben a katódsugarak természete teljesen homályban maradt olyannyira, hogy pl. Röntgen, a ki 1895-ben felfedezte a róla elnevezett sugarakat, a katódsugárzás természetéről mit sem tudott.

Az elektron felfedezésével egyidejűleg az 1897-es év a későbbi atomfizikára vonatkozóan rendkívül fontos újabb felismerést is hozott. Egy évvel korábban P. Zeeman felfedezte a később nevéről elnevezett effektust; a színképvonalaknak a sugárzó atomra ható mágneses tér hatására történő felhasadását. Röviddel előtte H. A. Lorentz elektronelméletében az átlátszó testekben a fény diszperzióját elektromosan töltött rezgő részecskékre vezette vissza, amikoris ezen részecskék természete még meghatározatlan maradt. Zeeman felfedezése után Lorentz megvizsgálta a mágneses tér hatását a rugalmasan kötött töltött részecskék mozgására ill. sugárzására. Ezáltal sikerült neki nemcsak a Zeeman jelenséget lényeges részleteiben értelmezni, hanem a Zeeman által mért felhasadások értékeiből az atomban rezgő töltött részecske fajlagos töltését is kiszámította. Jóllehet az így nyert érték nagyon közel megegyezett a Thomson által felfedezett katódsugár részecskék fajlagos töltésével, mégis csak egy évvel később A. Schuster mondta ki a két részecske azonosságát. Így az elektron másodszor is felfedezést nyert, ezúttal mint kötött elektron és mint az atom alkotó része. Egyúttal bebizonyosodott, hogy az ilyen módon kötött elektronok rezgései hozzák létre az atomra jellemző síképvonalak emisszióját. 1922-ben Laue erről Zeeman akadémiai ajánlásában így ír: „Ha ezek a megegyezések nem is bizonyultak minden későbbi eredménnyel szemben igaznak,* mégis ma a Zeeman-effektust kell tekintenünk első közvetlen bizonyítékául annak, hogy az atomban elektronok vannak és hogy azok rezgése fényemissziót eredményez."

Miután ezzel a századforduló táján az elektron, mint az atom alkotórésze ismertté vált, felmerülhettek most már az atom felépítésére és az alkotórészek között fellépő erők természetére vonatkozó kérdések. Ha az elektron egy színképvonal fényét, tehát egy bizonyos rezgésszámú sugárzást bocsát ki, úgy a klasszikus fizika szerint magának is ezzel az állandó rezgésszámmal kell rezegnie. Ez azt jelenti, hogy egy kvázielasztikus erő hatása alatt kell állnia, amelynek nagysága az elektronnak a nyugalmi helyzetétől mért távolságával arányos. Mivel az elektromosan töltött részecskék közötti erők a közöttük levő távolság négyzetével fordítva arányosak, nem látszott lehetségesnek ezeket a kvázielasztikus erőket tiszta elektromos erőkkel magyarázni. Egy lehetséges megoldásnak látszott a J. J. Thomson által 1903-ban elgondolt és róla elnevezett atommodell. Ennél egy állandó töltéssűrűségű pozitív töltésű gömbben egy szabadon mozgó elektron helyezkedik el. Az elektrosztatika törvényei szerint az ilyen elektronra valóban egy a középpont felé irányuló és az onnan mért távolsággal arányos erő hat. Ilyenmódon azonban csak egyetlen színképvonal emissziója volt magyarázható. Az a kísérlet már, mely a pozitív gömb belsejében több elektron felvételével a valóságos atom esetében fellépő nagyszámú színképvonal eredetét akarta volna értelmezni, nem vezetett eredményre. A Thomson-féle atommodell jelentősége abban áll, hogy az első kísérlet volt arra vonatkozóan, hogy az atom tulajdonságait a benne található elektronoknak tiszta elektromos erők hatására történő mozgásával próbálja magyarázni.

Az atom felépítésére vonatkozóan teljesen új elképzelésekre vezettek a Ph. Lénárd által a katódsugarak abszorpciójára és szóródására vonatkozóan végzett kísérletek. Ezek Warburg által írt akadémiai ajánlásban így szerepelnek: „Miután Hertz felfedezte, hogy a vékony lemezfóliák a katódsugárzást átbocsátják, azzal a tervvel kezdett foglalkozni, hogy a sugárzásnak vékony fémablakon át szabad utat nyisson abból a térből, ahol az keletkezik. A terv végrehajtása azonban Lénárdra maradt, akinek ez sikerült és most már

* Az ajánló itt nyilván az anomális Zeeman-effektusra gondol, melyet 1922-ben az elektronspin felfedezése előtt még nem lehetett elméletileg értelmezni.

lehetséges a sugárzás terjedésének feltételeit azoktól a körülményektől függetlenül változtatni, amelyekben az létrejön." Majd később: „... valamint fontos új eredményként adódott, hogy az abszorpció csak az abszorbeáló anyag sűrűségétől függ és természetétől független." Emellett meglepő eredményként adódott, hogy a gyors katódsugarak a gázmolekulákon való terjedésük során sokkal kisebb mértékben akadályozódnak, amint azt a molekuláknak a kinetikus gázelméletből adódó nagyságuk folytán várni lehetne. Hogy ezen mérési eredményeket érthetővé tegye, Lénárd feltette, hogy az atom egész térfogata majdnem teljesen üres és így a katódsugárzás elektronjai zavartalanul áthatolhatnak rajta, továbbá, hogy az atom össztömege a térfogat rendkívül kicsiny tört részében van koncentrálva. Ezen elképzelés alapján alakította ki az atom dinamida-modelljét. Eszerint az atom bizonyos számú dinamidáknak nevezett erőcentrumokból áll, amelyek a térnek csak igen csekély részét foglalják el, azonban ezek az össztömegnek és az atom más részecskékkel vagy sugárzásokkal való kölcsönhatásának hordozói. Hogy a különböző gázokban való észleléseit megmagyarázhassa, feltette, hogy a dinamidák száma az atomban megközelítően arányos az atomsúllyal. Ha ezek az elképzelések nem is váltak be, mégis a kísérleti bizonyítékok jelentős lépést jelentettek abban az irányban, hogy az atom tömege az atomon belüli térben csak igen kis helyet foglal el. Lénárd magyar származására, noha Nobel-díjat is kapott, nem igen lehetünk büszkék. Ádáz harcot folytatott, hogy Röntgentől elvitassa felfedezését, majd később Einstein ellen indított szégyenteljes hadjáratot, míg végül a nácizmus nyílt támogatójává vált.

A következő és döntő lépést E. Rutherford tette meg 1911-ben. Eközben az új felfedezések következtében, mint amilyenek a röntgensugárzás és a radioaktivitás, a színfalak jelentősen kitágultak. Ezek alapján a kísérleti kutatás számára teljesen új lehetőségek adódtak. Az alfa-sugárzásban a kétszeres pozitív töltésű héliumatomok olyan nagy energiákat bocsátanak rendelkezésre, hogy az egyes ilyen atomok hatása észlelhető, tehát az atomok megszámlálhatók. Ezt a lehetőséget használta fel Rutherford az alfa-sugárzás szóródására vonatkozó kísérletében. Berendezése rendkívül egyszerű volt. Alfa-sugárnyalábot fémfóliára ejtett és megfigyelte az abból ismét kilépő alfa-részecskék irányeloszlását. Ezen részecskék megszámlálására felhasználta a gyenge, de lupéval még éppen észlelhető fényfelvillanásokat, melyeket az egyes részek egy fluoreszkáló ernyőn okoznak. Az eredmények megerősítették az atom rendkívül csekély térkitöltésére vonatkozó korábbi Lénárd-féle megállapítást: az alfa-részek nagy száma észrevehető irányváltoztatás nélkül haladt keresztül a fólián. Ezen felül azonban Rutherford a kevéssé eltérített részecskék irányeloszlásából következtetni tudott ezen eltérítések okára, tehát az atom belsejében uralkodó elektromos térre is. Ezen irányeloszlások teljesen értelmezhetők voltak az atom középpontjában elhelyezkedő közel pontszerű pozitív töltés egyszerű Coulomb tere segítségével. Ez vezette Rutherford-ot a nagyon kicsiny pozitív töltésű atommag fogalmához, amelyben az atom majdnem egész tömege koncentrálva van. Kiegészítette a modellt a mag körül keringő elektronokkal, amelyeknek száma egyenlő a mag pozitív töltéseinek számával. Ezek befolyása az alfa-sugarak szóródására vonatkozóan gyakorlatilag zérus, mivel ezek tömege mintegy 8000-szer kisebb mint egy alfa-részecskéé, úgy hogy az impulzus törvény szerint csak rendkívül csekély energiaértéket képesek átadni. Laue 1928-ban az akadémiai ajánlásában ezekről a többek között ezt írja: „Egy további nagyobb stílű teljesítménye az alfa-sugárzás szóródásáról szóló munkája, amely alapvetőnek bizonyult a róla és Bohr-ról elnevezett atommodell szempontjából". Majd később: „Mindezek a teljesítmények mérföldkövet jelentettek a modern fizika és kémia fejlődésében és az anyagról való ismereteinket egészen új alapokra helyezik".

Mindeddig a fejlődés szigorúan a klasszikus fizika keretein belül folyt. A Rutherford-féle atommodellel azonban határaihoz érkezett. Jóllehet Rutherford az alfa-részecskéknek a magtöltés elektromos terében való eltérítését még a klasszikus mechanika törvényei szerint számolta, a mag körül keringő elektronok felvétele anélkül, hogy ezek sugárzást bocsátanának ki és végül a magba essenek, a klasszikus elektrodinamikával már nem volt összeegyeztethető. Ezen ellentmondások feloldására szolgált a kvantumelmélet. Ezt azonban nem úgy kell érteni, hogy a kvantumelmélet már készen állt és csak alkalmazni kellett az atommodellre. A kvantumelmélet maga is csak a kezdeti stádiumában volt és éppen az atomfelépítés problémáira való alkalmazása során fejlődött zárt, ellentmondásmentes diszciplinává. A kiindulópontot a fejlődéshez ismeretes módon a M. Planck által 1900-ban felállított kvantumhipotézis alkotta.

A kvantumhipotézis felállítása előtt nem sokkal sikerült neki a fekete test hősugárzásának színképében az energiaeloszlás törvényét félempirikus módon megtalálni. Annál a törekvésnél, hogy ezt a törvényt elméletileg megalapozza, felismerte hogy a feladat csak a statisztikus fizika eszközeivel oldható meg. Egy tükröző falú üres teret vett fel, melynek belsejében a fennálló hőmérsékletnek megfelelő hősugárzással statisztikus egyensúlyban levő sok különböző frekvenciájú elektromos oszcillátor található. A Boltzmann -által kialakított kép alapján megkísérelte, hogy a legnagyobb statisztikus valószínűségű termikus egyensúlyi állapotokat megállapítsa. Annak a valószínűsége, hogy egy meghatározott állapot megvalósuljon, természetesen függ attól, hogy hány és milyen állapot lehetséges egyáltalában. És itt jött a meglepetés: hogy a sugárzási törvény helyes alakját levezethesse, csak olyan lehetséges állapotokat vehetett fel, melyekben minden egyes oszcillátor energiája $h\nu$ egész számú többszöröse

lehetett csak, ahol ν az illető oszcillátor rezgésszáma és h pedig egy univerzális állandó, melynek értéke a sugárzási mérések eredményeiből kiszámítható volt. Azt a feltevést, hogy az energia csak $h\nu$ kvantumokban vehető fel vagy adható le nevezzük a Planck-féle kvantumhipotézisnek, magát h-t pedig a Planck-féle állandónak. Az előzőkkel kapcsolatban érdekes talán megjegyezni, hogy Planck, aki a fizika addigi legnagyobb forradalmát robbantotta ki, alapjában véve igen konzervatív ember volt. Hosszú időn át harcolt saját forradalmi lépése ellen és megkísérelte a klasszikus fizikától való kevésbé radikális eltérésekkel értelmezni a jelenségeket. (pl. eleinte csak az abszorpcióra akarta korlátozni a kvantumhipotézist). Így fordulhatott elő, hogy Planck munkája jóideig semmiféle lényeges hatást nem keltett; a kortársak egyszerűen nem ismerték fel Planck lépésének jelentőségét. A Helmholtz által beterjesztett akadémiai ajánlásban ezekről persze nem eshetett szó, mivel Planck-ot már 1894-ben, tehát hat évvel előbb beválasztották az Akadémia tagjai közé.

Először öt évvel később, 1905-ben A. Einstein elevenítette fel Planck gondolatait továbbfejlesztett alakban a fotoeffektussal kapcsolatos elméletében. Régóta ismeretes volt, hogy az ultraibolya fény fémfelületre esve abból elektronokat vált ki. E jelenség kísérleti vizsgálata két tényt mutatott: minden fémre nézve létezik egy olyan határfrekvencia, melynél kisebb frekvenciájú fénynyel a fémből elektronokat kiváltani nem lehet. Másfelől a kilépő elektronok sebessége független a beeső fény intenzitásától és csak annak rezgésszámától függ éspedig növekvő frekvenciával a sebesség is nő. Ezt a klasszikus fizika szempontjából érthetetlen viselkedést Einstein egyszerű módon azon feltevéssel magyarázta, hogy a fény a fémben levő elektronoknak energiát csak $h\nu$ kvantumokban adhat le. A kilépő elektronok energiája eszerint minden nehézség nélkül adódik, mint a beeső fény $h\nu$ energiája és a kilépési munka különbsége, ahol az utóbbi azt a munkát jelenti, amely ahhoz szükséges, hogy az elektron a fém belsejéből (ahol egy potenciálvölgyben fekszik) kiszabaduljon. A kilépő elektron energiája eszerint valóban csak a beeső fény frekvenciájától függ és a határfrekvencia pedig mint a kilépési munka és a Planck állandó hányadosa adódik.

Eszerint Einstein a fénysugárzásnak magának is kvantumszerű struktúrát tulajdonított és ezzel Planck-on is túllépve fejlesztette ki a fénykvantum hipotézisét. Ellentétben a hősugárzás Planck-féle statisztikus tárgyalásával Einstein a fotoeffektus esetében egyes folyamatokat tárgyalt, nevezetesen egy fénykvantum és egy elektron kölcsönhatását. Ha felfogása igaz, akkor ez meggyőző bizonyítékot szolgáltat arra, hogy az atomi tartományban az ilyen kölcsönhatások leírására a klasszikus elektrodinamika nem kielégítő és hogy azt a kvantumtörvényekkel kell pótolni. 1917-ben Einstein a fénykvantum hipotézis és a Planck által kidolgozott „félklasszikus" kvantumstatisztika alapján újból levezette a Planck-féle sugárzási törvényt, mint a részecske és hullámkép dualitásának első következményét, miközben többek között felfedezte az indukált emisszió jelenségét, amely a későbbi lézer kutatások alapját képezte.

Tudománytörténeti érdekesség, hogy Planck maga egyáltalában nem értett egyet az ő hipotézisének ilyen irányban történő továbbfejlesztésével. Planck saját kezeírásával közölt akadémiai ajánlásában Einsteinre vonatkozóan 1913-ban pl. ezzel kapcsolatban ezt írja: „Hogy spekulációiban alkalmilag nem egyszer szeret túllőni a célon, nem szabad neki túlságosan felróni; mert rizikó vállalása nélkül még a legegzaktabb természettudományba sem lehet hatásos újításokat bevezetni". Mellesleg megjegyezve Einstein 1921-ben főképpen a fénykvantumhipotézis felállításáért kapta a Nobel-díjat (a relativitáselméletet csak megemlítették az indokolásban).

Visszatekintve az eddig elmondottakra megállapítható, hogy minden feltétel adva volt már N. Bohr nagyjelentőségű munkájához, melyben 1913-ban a kvantumelméletet a Rutherford-féle atommodellre alkalmazta. Kiindult a Planck-féle alapgondolatból, mely szerint az elektromos oszcillátor esetében a diszkrét állapotoknak egy olyan sorozata létezik, ahol az egyes tagok energia értéke csak $h\nu$ értékkel különbözhetnek egymástól és hogy a fény emisszió vagy abszorpció csak ezen állapotok közötti átmenetek révén jöhet létre. Ugyanígy Bohr a pozitív töltésű mag körül keringő elektronokra vonatkozóan is a stacionárius állapotok egy sorozatát tételezte fel, amelyben ezek sugárzás nélkül létezhetnek. Egy színképvonal kisugárzása esetén átmenet jön létre valamelyik stacionárius állapotból egy másikba. A kisugárzott fény rezgésszámát az Einstein-féle fénykvantum hipotézis határozza meg olymódon, hogy a kisugárzott fénykvantum $h\nu$ energiája egyenlő az átmenetben résztvevő két állapot energiakülönbségével. Ezt az elképzelést erősen támogatta a spektroszkópusok már régebben ismert azon tapasztalata, mely szerint lehetséges az atom valamely tulajdonságára vonatkozó számoknak, az ún. termeknek, olyan rendszerét felállítani, hogy bármely színképvonal hullámszáma két ilyen spektrálterm különbsége legyen. Ezt a tapasztalatot összevetve a Bohr-féle elképzeléssel a termek új jelentést kapnak: az atom különböző stacionárius állapotai energia értékeivel arányos mennyiségekké lesznek. Arra vonatkozólag, hogy a Rutherford-féle atommodellben az elektronokpályáit illetően a klasszikus fizika szerint lehetséges folytonos értékek közül hogyan kell kiválasztani a lehetséges stacionárius pályákat, Bohr egy teljesen önkényes, sehonnan máshonnan le nem vezethető hipotézist állított fel: szerinte csak olyan körpályák lehetségesek, melyeken az elektron impulzusnyomatékának 2π-szerese a Planck-állandó egész számú többszörösével egyenlő. Ezeken a pályákon azután az elektronok mozgását a Coulomb-erő szabályozza a klasszikus

mechanika törvényei alapján. Ezen feltevésekkel Bohr-nak nemcsak a hidrogénszínkép értelmezése sikerült, miközben az atomsugárra a kinetikus gázelmélet által várt értéket kapta, hanem egészen bámulatos módon a Balmer-formulában szereplő Rydberg-féle állandót — melyet addig természeti állandónak tekintettek — is ki tudta számítani: más szóval ki tudta fejezni más természeti állandókkal, mint amilyenek az elektron töltése és tömege, valamint a Planck-állandó és a fénysebesség.

Mindezen teljesítményei ellenére azonban eleinte a fizikusok jórésze nagy szkepticizmussal fogadta ezt a felemás elméletet, amelyben teljesen keveredik a klasszikus és a kvantumfizika. Egyfelől ugyanis az elektron mozgását a Coulomb-erő szabályozza teljesen klasszikus módon, ugyanakkor a sugárzás nélküli stacionárius pályák felvétele ellentmondásban áll a klasszikus elektrodinamika törvényeivel, másfelől elméletileg teljesen megalapozatlan kvantumfeltételek szabják meg a lehetséges stacionárius pályákat. Logikusan zárt elméletről tehát szó sem lehetett.

Ennek ellenére nem sokkal később az elmélet alkalmazást nyert a héliumion színképére, majd A. Sommerfeld az ellipszis pályák és a relativisztikus korrekciók bevezetésével a hidrogén színkép finomszerkezetét értelmezte, Moseley pedig a röntgen színképeket és ennek során felismerte, hogy a magtöltésszám mérvadó a periódusos rendszer felépítésére. Ezek után érthetővé válik, hogy az utolsó kétségek is eloszlottak Bohr elgondolásaival szemben, jóllehet az egész elmélet logikailag kielégítő megalapozása még mindig hiányzott. Bohr hatásának felmérésére talán érdemes teljes egészében idézni Einstein 1922-ben kelt akadémiai ajánlását: „Ha majdan valamely későbbi generáció korunk fizikája előrehaladásának történetét le akarja írni, a legjelentősebb lépések egyikét, melyet az atom lényegének megismerésére valaha is tettünk, Bohr nevéhez fogja kapcsolni. Már ismeretes volt, hogy a klasszikus mechanika az anyag építőköveivel szemben csütörtököt mond, valamint, hogy az atom pozitív töltésű magból áll, melyet egy viszonylag laza atomréteg vesz körül. Azonban a színképek tapasztalatilag messzemenően ismert szerkezete oly lényegesen különbözött attól, ami a régi elméleteink alapján várható volt, hogy az észlelt törvényszerűségek meggyőző elméleti értelmezésére senki sem látott lehetőséget. Ekkor 1913-ban Bohr rátalált a legegyszerűbb színkép kvantumelméleti értelmezésére, melynek során rövid idő alatt a kvantitatív megállapításoknak olyan bőségét hozta bizonyítékul, hogy tárgyalásmódjának merészen választott hipotetikus alapja nemsokára az atomfizika egyik biztos támaszává vált. Annak ellenére, hogy még nem egészen egy évtized múlt el Bohr első felfedezése óta, ma már az általa kigondolt és nagy vonalaiban az általa kiépített gondolati rendszer uralkodik az atomfizikában és a kémiában olyan mértékben, hogy a szakemberek számára minden korábbi értelmezési kísérlet régen letűnt időből valónak látszik. A röntgen- és a látható színképek, valamint az elemek periódusos rendszerének elméletei elsősorban Bohr gondolatain alapszanak. Ami Bohr-ban, mint kutatóban olyan csodálatosnak tetszik, az a merészségnek és az óvatos megfontoltságnak különös egysége; ritkán találkozott kutatóban olyan mértékben mint nála, a rejtélyes dolgok intuitív felfogásának képessége az éles kritikával. A részletek megismerésekor pillantása megingathatatlanul az elvekre irányult. Kétségtelen ő a tudomány területén korunk egyik legnagyobb felfedezője".

Az eddigiekben a Bohr elmélet alátámasztásául olyan kísérleti bizonyítékokat említettünk, melyek már az elmélet kialakulása előtt is léteztek és éppen azzal támasztották alá az elméletet, hogy ezeket az elmélet értelmezni tudta. A következőkben olyan kísérlet sorozatról fogunk beszélni, melyet 1912-ben, tehát még a Bohr elmélet közzététele előtt kezdett el J. Franck és G. Hertz, nem abból a célból ugyan, hogy a Bohr elméletet igazolják, a kísérletek mégis annak egyik legdöntőbb bizonyítékává váltak. Alapgondolata pedig jelentőségében a későbbiekben messze túlnőtt az atomhéj szerkezet feltárásán, az atommag szerkezetének megismerésén keresztül egészen a mai részecskefizikáig. A kísérletek eredeti céljának nem sok köze volt az atom, ill. kvantumfizikához, hanem a cél inkább a gáztöltés J. Townsend által kidolgozott elméletének vizsgálata volt. Különböző okokból kétségeik támadtak Towsend elméletének alapfeltevéseivel szemben és ezzel az elektron szabad úthosszára és az ionizációs munkára általa nyert érték helyességét illetően. Első kísérletükben egy izzó platina szálból kilépő és elektromos térben felgyorsított elektronoknak hélium és argon nemesgáz atomokkal való ütközéseit vizsgálták és azt találták, hogy az átellenes elektród az elektronokat gyorsító feszültség hatására, annak egy bizonyos értékénél hirtelen pozitív töltésűvé válik. Ebből arra gondoltak, hogy ezzel az illető nemesgáz atomjainak ionizációs potenciálját mérték meg. Mint később kiderült, ez tévedés volt; az általuk észlelt pozitív feltöltődés nem az ionizáció, hanem az ezzel egyidőben fellépő rövidhullámú ultraibolyan fény által az illető elektródban keltett fotoeffektus hatására keletkezik. Ilyen sugárzásnak az ütközés következtében való fellépésére akkortájban még senki sem gondolt.

Franck és Hertz eredményei a Towsend-féle elmélettel nem voltak összeegyeztethetők. Ennek az elméletnek az alapja az volt, hogy az elektronok gázmolekulákkal való ütközéseik során a nem ionizáló ütközésekkor is elveszítik teljes energiájukat. Miután ők kételkedtek ezen feltevés helyességében, kísérleteiket oda módosították, hogy az elektronoknak az ütközés során fellépő energia veszteségeit közvetlenül mérni tudják. Már az első kísérletek is igazolták Franck és Hertz kételyeit: energiaveszteséget nem ionizáló ütközések esetén egyetlen gáznál sem észleltek, tehát az ütközések rugalmasak voltak. Nemesgázok esetén energia veszteség, tehát rugalmatlan ütközés, csak

akkor lép fel, ha a gyorsító feszültség meghaladta az általuk előzőkben mérni vélt ionizációs feszültséget. Másszóval lehetetlennek bizonyult az atommal energiát közölni ütközéssel, ha az energia kisebb, mint az illető atomra jellemző valamiféle kritikus érték. Ez döntő felismerés volt a gáztöltés elméletét illetően még akkor is, ha figyelembe vesszük azt a tévedést, melynek során azt gondolták, hogy az atom által felvett legkisebb energiakvantum azonos az ionizációs munkával.

Kísérleteiket tovább módosítva ezután a szintén egyatomos higanygőzben vizsgálták a lassú elektronok viselkedését. Ma már tudjuk, hogy az a legkisebb energia, amit egy atom felvesz, nem az ionizációs, hanem egy bizonyos gerjesztési munka és az ennek megfelelő gyorsító feszültség pedig a gerjesztési feszültség. Eredményeik a következőkben foglalhatók össze: ha a gyorsító feszültséget zérustól kezdve lassan emelték, növekedett az elektronok száma, melyek az útközben elhelyezett drótháló segítségével a szemközti elektródra kapcsolt kis ellentett feszültség ellenére az elektródot elérik. Amint a gyorsító feszültség eléri a gerjesztési feszültséget, vagy azt kissé meghaladja, az elektronok elvesztik energiájukat és az ellentett feszültségű téren már nem tudnak keresztül hatolni és így az áramerősség lecsökken. A gyorsító feszültség további növelésével a már egyszer energiájukat vesztett elektronok újra felgyorsulnak és az áramerősség ismét növekedni kezd mindaddig, amíg a gyorsító feszültség el nem éri a gerjesztési feszültség kétszeresét, amikoris az áramerősség ismét hirtelen lecsökken. Ez a jelenség azután állandóan ismétlődik, mikor a gyorsító feszültség a gerjesztési feszültség egész számú többszöröséhez érkezik. A gerjesztési feszültség értéke higanygőz esetén 4,9 V volt.

Minthogy a Planck-féle kvantumelmélet az idő tájt már jelentős szerepet játszott a fizikusok gondolkodásában, természetesnek látszott, hogy Franck és Hertz eredményeiket megpróbálták ezzel az elmélettel kapcsolatba hozni, azaz az általuk észlelt energiakvantumokat a Planck-féle hipotézis segítségével valamilyen fényfrekvenciához hozzárendelni. A higanygőzre vonatkozóan a 2537 Å rezonanciavonal látszott a legalkalmasabbnak. R. W. Wood ugyanis kimutatta, hogy a higanyatom ezt a színképvonalat szelektíve nagyon erősen abszorbeálja, majd az abszorbeált energiát ugyan ilyen rezgésszámú sugárzás alakjában emittálja. Ezeknek a vonalaknak az emissziója és abszorpciója tekintetében tehát a higanyatom úgy viselkedik mint egy Planck-féle oszcillátor; a Planck-féle hipotézisnek megfelelően nem vehet fel kisebb energia mennyiséget, mint a rezonanciavonalnak megfelelő $h\nu$ energiakvantum. Pontosan ugyanezt a viselkedést mutatta Franck és Hertz kísérlete is, mégpedig úgy, hogy az általuk mért gerjesztési energia a kísérleti hibahatáron belül megegyezett a Planck-állandó és a higany rezonanciavonal frekvenciájának szorzatával. További következménye volt ennek a felfogásnak az, hogy a higanyatom, mint Planck-féle oszcillátor, az oszcillátor egy energiakvantumának felvételével rezgésbe jön és ennek következtében a rezonanciavonalnak megfelelő frekvenciát emittálnia kell. További kísérleteikkel ezt is igazolták.

Franck és Hertz kísérleteiket a Planck-féle kvantumhipotézis igazolásának gondolták. Bohr-elméletét akkoriban még nem ismerték. Az első Bohr-féle közlemény egy évvel kísérleteik lezárása előtt jelent meg, de az abban foglalt gondolatok annyira újak és idegenszerűek voltak, hogy nem sok figyemet fordítottak erre. A Planck-féle elektromos oszcillátor modell, melyben az elektron rezonanciavonal frekvenciájával rezeg, tökéletesen megfelelőnek bizonyult és minthogy a Bohr-elmélet ezt tagadta, már ez is értelmetlenné tette ennek az elméletnek a kísérletre való alkalmazását. Egyébként egy pillantást vetve a higanyszínkép termszkémájára ma már látjuk, hogy a rezonanciavonal gerjesztési feszültségének mérésével nem lehet különbséget tenni a Planck-féle hipotézis és a Bohr elmélet között. A rezonanciavonalra ugyanis, mint minden más vonalra is, amely az alapállapotba való átmenet révén jön létre a Bohr elmélet szerint is a gerjesztési energia $h\nu$-vel egyenlő. A kísérleti eredmények helyes értelmezését az is nehezítette, hogy Franck és Hertz mindvégig abban a hitben voltak, hogy az általuk mért gerjesztési feszültség egyúttal egyenlő az ionizációs feszültséggel. Hihetőleg erre a hibára ők is rájöttek volna, ha 1914 nyarán az első világháború kitörése miatt nem kellett volna kísérleteiket abbahagyni. Először a háború végén mások időközben megjelent közleményeiből értesültek tévedésük kiigazításáról, valamint arról, hogy eredményeiket a Bohr elmélet értelmében magyarázták. Ekkor 1920-ban Hertz most már egyedül folytatta a kísérleteket és azokat oda módosította, hogy segítségével magasabb energiaszinteket is kimutathatott és egyéb színképvonalak gerjesztési energiáját is megmérhette. Ezzel azután most már valóban igazolta annak helyességét, hogy a spektráltermek, a Bohr értelmezés szerint, az atom stacionárius állapotainak energia értékeivel arányos mennyiségek.

Különösnek tűnik, hogy, bár 1925-ben kísérleteikért Franck és Hertz megkapták a Nobel-díjat, G. Hertzet 1930-ig nem találjuk a berlini Akadémia tagjai sorában és J. Franck-ot is csak 1929-ben választották meg Paschen ajánlására. Ezekről a kísérletekből ebben az ajánlásban a következőket olvashatjuk: „Fontos munkájában közösen G. Hertz-zel megállapította az elektronok rugalmas és rugalmatlan reflexiói közötti különbséget. Rugalmatlan reflexió esetén az energialeadás vizsgálata vezette később higanygőzben bizonyos elektronsebességeknél a fénygerjesztés felfedezésére. Ha ennek a folyamatnak az értelmezése kezdetben nem is volt egészen helyes és a helyes értelmezés megtalálásában Franck urat a háború megakadályozta, az alapkísérlet és annak általános jelentősége a két német kutató kétségtelen érdeme maradt. Mert, miután időközben a Bohr elmélet ismertté vált, ezek a kísérletek az atom

Bohr által feltételezett stacionárius energia állapotainak realitására bizonyítékként szolgáltak."

A későbbiekben azonban bámulatos teljesítményei ellenére a Bohr elmélet árnyoldalai is kezdtek mutatkozni. Azon felül, hogy a logikai megalapozás továbbra is hiányzott, több esetben a tapasztalástól eltérő téves eredményre vezetett. Ezek a nehézségek vezették azután Schrödingert, valamint Heisenberget, Bornt és Jordant a kvantummechanika kifejlesztéséhez az 1925—27. években, amellyel végülis egy ellentmondásmentes, logikailag zárt elméletet hoztak létre, amely mindenütt, ahol a Bohr elmélet eltért a tapasztalattól, a helyes eredményt szolgáltatta. Ma a kvantummechanika elérte a teljességnek azt a fokát, mint amit a századforduló idején a klasszikus mechanika.

Eközben a Franck—Hertz kísérlet jelentősége egyre fokozódott, alapgondolata tovább fejlődött, terebélyesedett és új meg új formában ismét előtérbe került. Az elmúlt 75 év alatt a fizika fejlődési korszakait a kísérletekben szereplő energiaskála különböző értékei szerint is osztályozhatjuk.

Első korszaknak tekinthetjük az atomhéj kvantumfizikáját, melynek jellegzetes kísérlete maga a Franck—Hertz kísérlet volt és amelynek során az atom- és molekulaszínképek szerkezete valamint a kémiai kötés sajátságai váltak ismertté. A molekulák szerkezetének tanulmányozására az újabb időkben a spektroszkópiának egy új ága, az ún. elektronspektroszkópia alakult ki, melynek lényege abban áll, hogy kiterjesztve Franck és Hertz alapkísérleteit elektronokat (vagy más töltött vagy semleges részecskéket) ütköztetnek molekuláris gázokban. Ilyenkor a molekulák különböző folyamatokban gerjesztődhetnek, mint amilyenek a rugalmas és rugalmatlan szóródás, elektron-, rezgési- és rotációs-nívók gerjesztése, molekuláris disszociáció, ionizáció, befogás stb., miközben fontos, több esetben más módszerrel nem is nyerhető információkat szolgáltatnak, nemcsak az ütközés dinamikáját, hanem az ütközést szenvedő molekulák energianívóit illetően is. Az ezekre vonatkozó energiaskála 10°-tól 10^1 elektronvoltig terjedt, továbbá jellemző erre még hogy a relativisztikus korrekciók nagyon csekélyek voltak.

A második korszak a természetes és a mesterségesen gyorsított részecskék által létrehozott magreakciók korszaka, mely néhányszor 10^4 eV-tól 10^7 eV-ig terjed. Itt is a Franck—Hertz kísérlethez analóg rezonanciakísérletek segítségével állapították meg az atommag termstruktúráját. A relativisztikus korrekciók itt már lényegesek a kistömegű részecskékre (a leptonokra) vonatkozóan és ennek megfelelően az alkalmazott elmélet már nem a kvantummechanika, hanem a kvantumelektrodinamika és a kvantumtérelmélet, amely felújított szintézise a Planck és Einstein-féle gondolatoknak és többek között a fénykvantum hipotézist elméletileg támasztja alá.

A legutolsó korszak az elemi részek fizikájának korszaka, mely 10^8 eV-től 10^{12} eV-ig terjed. Ebben az energiatartományban az összes részecske nyugalmi energiája kicsiny az összenergiához képest. Az elemi részeknek maguknak a belső szerkezetét ebben az energiatartományban szintén a Franck—Hertz-féle rezonanciák alapján kutatják.

Fentiek alapján tehát túlzás nélkül állíthatjuk, hogy a Franck—Hertz-kísérlet egyike a fizika legjelentősebb kísérleteinek, hiszen alapötlete végigvonul századunk fizikájának szinte egész történetén. Kegyelettel adózunk ezért a tavaly októberben elhunyt G. Hertz emlékének, akit az egész világ méltán tart számon a nagy fizikusok sorában. Mi magyarok külön is gyászoljuk halálát, hisz 1955 óta a Magyar Tudományos Akadémiának is külső tagja volt.

HANGOLHATÓ FESTÉKLÉZEREK

Kozma László, Rácz Béla, Bor Zsolt
JATE Kísérleti Fizikai Intézet, Szeged

Az első lézer megépítésétől eltelt másfél évtizedet a lézerek fizikai vizsgálata területén való igen gyors előrehaladás jellemezte. Szinte naponta jelentek meg közlemények olyan vizsgálati eredményekről, amelyek alapján újabb típusú lézerek megépítése vált lehetségessé. Jelentős eredményekkel gazdagodott a fizika, amelynek következtében új tudományterületek alakultak ki, mint pl. a nem lineáris optika és a holográfia. Az utóbbi 5—6 évben amellett, hogy az alapkutatások eredményessége és a technológiai előrehaladás üteme nem csökkent, nagymértékben előtérbe került a lézerek alkalmazása különböző tudományos és gyakorlati feladatok megoldásánál. Eközben olyan új igények merültek fel, amelyek csak a lézerek továbbfejlesztésével teljesíthetők. Ezen igények felvetik a lézerfény hullámhosszának széles tartományban történő folyamatos változtathatóságát, azaz a lézerek hangolhatóságát, amelyet a festéklézerek biztosítanak.

A festéklézerek legfontosabb előnye a hangolhatóság és az aktív közeg igen egyszerű és olcsó előállíthatósága. Ma már a közeli ultraibolya, a látható és közeli infravörös színképtartomány bármely hullámhosszán állítható elő lézerfény egyetlen berendezéssel. A kibocsátott fény teljesítménye egy impulzusban elérheti a 100 MW-ot, spektrális sávszélessége pedig 10^{-3}—500 Å határok között változhat a rezonátor felépítésétől függően.

A festéklézerek nemcsak mint nagy teljesítményű, hangolható fényforrások állnak az érdeklődés középpontjában, hanem mint sokrétű kutatási lehetőséget biztosító objektumok is. A lézer paramétereinek vizsgálata során lehetőség nyílik a szerves anyagok széles körében (ma már több száz szerves festéket alkalmaznak lézerekben) a molekulák belső folyamatainak és a molekulák közötti kölcsönhatásnak vizsgálatára.

A generálás fizikai feltételei

A festéklézerek működésének leírásához ismerni kell a molekulákon belül lejátszódó sugárzásos és sugárzás nélküli folyamatokat. Szerves festékmolekulák elméleti vizsgálatánál széles energiasávokból álló modell alkalmazható a belső folyamatok leírásához [1] (1a. ábra). Ez a modell — és így a festéklézer működése is — jelentősen különbözik a gáz, ion és szilárdtest lézerek aktív anyagához rendelhető 3, illetve 4 energia-szintes modelljétől (1b, c. ábra), legjobban a félvezetők sávmodelljére hasonlít, azonban a generálás mechanizmusa más, mint a félvezető lézerekben.

Sokatomos molekulák esetében az energiaszintek kiszélesedettsége, a molekulák jelentős rezgési energiájának és az oldószerrel való kölcsönhatásnak a következménye. Amennyiben az alap és a gerjesztett elektron állapot vibrációs alnívóin való eloszlás valószínűsége nagyobb, mint az elektron állapotok közötti optikai és nem optikai átmenetek valószínűsége, az egyes elektron állapotban levő molekuláknak a vibrációs szinteken való eloszlása a hőmérsékleti egyensúlynak felel meg:

$$n_j(E_i) = c_j g_j(E_i) \exp(-E_i/kT),\ j = 1, 3 \qquad (1)$$

ahol a $g_j(E_i)$ az alap ($j = 1$) ill. gerjesztett állapot ($j = 3$) E_i vibrációs szintjeinek statisztikai súlya, T a közeg hőmérséklete, C_j normálási tényező, k pedig a Boltzmann-féle állandó. A festéklézerek működése az esetek nagy többségében stacionárius folyamatnak tekinthető, ezért a szintek betöltöttségére a következő összefüggések írhatók fel:

$$n_1 + n_3 = n \qquad (2)$$

$$n_1 B_{13}(\nu) u_{sz}(\nu) = n_3[A_{31}(\nu) + d_{31} + B_{31}(\nu)\, u_g(\nu)]. \qquad (3)$$

Itt n az aktív részecskék koncentrációja, $B_{13}(\nu)$, $B_{31}(\nu)$ ill. $A_{31}(\nu)$ az abszorpciós, kényszerített illspontán emissziós átmenetek vibrációs alnívókra összegezett integrális Einstein-féle koefficiensei $u_{sz}(\nu)$ és $u_g(\nu)$ a pumpáló és generált sugárzás specifikus intenzitása, d_{31} pedig a sugárzás nélküli $3 \rightarrow 1$ átmenetek valószínűsége. A továbbiakban figyelembe vesszük az Einstein-féle együtthatók között fennálló összefüggéseket:

$$\frac{A_{31}(\nu)}{B_{31}(\nu)} = \frac{8\pi h\nu^3}{v^2}, \qquad (4)$$

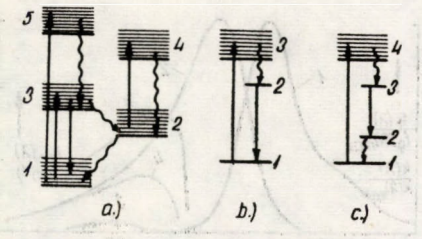
$$\frac{B_{31}(\nu)}{B_{13}(\nu)} = \frac{g_1}{g_3}, \qquad (5)$$

továbbá ezen együtthatóknak a közvetlenül mérhető lumineszcencia jellemzőkkel való kapcsolatát:

$$A_{31}(\nu) = \frac{\eta}{\tau} f_q(\nu), \qquad (6)$$

$$B_{13}(\nu) = \frac{v}{h\nu} k(\nu), \qquad (7)$$

ahol v a fény sebessége a lézeraktív közegben,



1. ábra. Különböző lézer anyagok termrendszere
a) szerves festék, b) rubin, c) neodimium
Az egyenes vonalak optikai, a hullámosak sugárzásnélküli átmeneteket jelölnek

$k(\nu)$ az abszorpciós koefficiens, $f_q(\nu)$ a fluoreszcencia kvantumspektruma, τ ill. η a fluoreszcencia csillapodási ideje, ill. abszolút kvantumhatásfoka.

A ν frekvenciához tartozó erősítési koefficiens arányos a kényszerített emissziós és az abszorpciós átmenetek számának különbségével:

$$k_{er}(\nu) = \frac{h\nu}{v}[n_3 B_{31}(\nu) - n_1 B_{13}(\nu)] = \frac{h\nu}{v} B_{31}(\nu)\left[n_3 - n_1 \frac{B_{13}(\nu)}{B_{31}(\nu)}\right]. \qquad (8)$$

Kimutatható, hogy

$$\frac{B_{13}(\nu)}{B_{31}(\nu)} = \exp\left(-h(\nu_0 - \nu)/kT\right), \qquad (9)$$

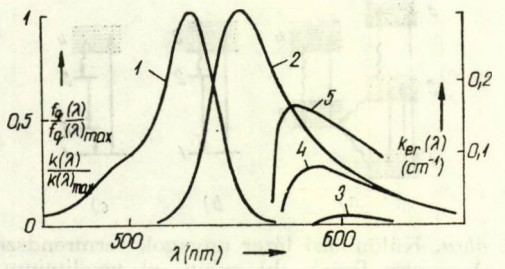
ahol ν_0 a tiszta elektron átmeneti frekvencia, s így

$$k_{er}(\nu) = \frac{h\nu}{v} B_{31}(\nu)[n_3 - n_1 \exp\{(-h(\nu_0 - \nu)/kT)\}]. \qquad (10)$$

Látható, hogy $k_{er}(\nu)$ értéke akkor pozitív, azaz akkor jön létre erősítés, ha

$$\frac{n_3}{n_1} > \exp\{-h(\nu_0 - \nu)/kT\}. \qquad (11)$$

Az erősítési koefficiens (10) kifejezéséből, valamint a (11) feltételből megállapíthatók azok az alapvető követelmények, amelyeket az aktív molekuláknak teljesíteni kell ahhoz, hogy az erősítés mértéke nagy legyen, továbbá tisztázható az erősítés néhány alapvető tulajdonsága. Mindenekelőtt látható, hogy azokat a molekulákat célszerű alkalmazni, amelyekhez tartozó $B_{31}(\nu)$ kényszerített emissziós együttható értéke nagy. Ennek a követelménynek szinte valamennyi festék molekula eleget tesz. A ν_0 tisztaelektron átmeneti frekvenciánál nagyobb ν frekvenciákra csak akkor lehetne erősítés, ha $n_3 > n_1$. A $\nu < \nu_0$ frekvenciáknál való erősítéshez ilyen feltétel nem szükséges, (11) teljesülhet $n_3 < n_1$ esetében is. Minél nagyobb $\nu_0 - \nu$, annál kisebb n_3/n_1 értékek mellett lehetséges erősítés. A kísérleti tapasztalatok azt mutatják, hogy több szerves festék esetében már $n_3/n_1 = 10^{-3}$ elegendő nagy erősítést biztosít a lézer működéséhez. Másrészről $\nu_0 - \nu$ nagy értékei kedvezőek az erősítés növelése szempontjából, s ez olyan anyagok esetében teljesülhet, amelyek széles lumineszcencia színképpel rendelkeznek.



2. ábra. Alkoholban oldott, $1 \cdot 10^{-4}$ mol/l koncentrációjú rodamin 6G 1. abszorpciós, 2. fluoreszcencia, valamint erősítési színképe $n_3/n_1 = 0{,}01$ (3), 0,05 (4), 0,1 (5) értékei mellett

A 2. ábrán látható egy tipikus szerves festék $k(\nu)$ abszorpciós és $f_q(\nu)$ fluoreszcencia, valamint $k_{er}(\nu)$ erősítési spektruma n_3/n különböző értékeinél.

Látható, hogy a széles abszorpciós és emissziós színképek mellett az erősítés is egy viszonylag széles tartományban jön létre. Generálást ott kaphatunk, ahol $k_{er}(\nu)$ értéke nagyobb, mint a rezonátorhoz tartozó $k_v(\nu)$ veszteségi együttható. A 2. ábrából is kitűnik, hogy ha $k_v(\nu)$ nem, vagy alig függ a frekvenciától, a generálás egy széles sávban jön létre. $k_v(\nu)$ frekvenciafüggővé tételére több módszer lehetséges, amelyre alább térünk ki.

További információt kaphatunk a generáló molekulák tulajdonságairól egy másik mennyiség a ν frekvencián való generálás küszöbéhez tartozó $U^k_{sz}(\nu)$ pumpáló energia kifejezéséből.

Stacionárius generálás esetében az erősítési együttható megegyezik a rezonátorhoz rendelhető veszteségi együtthatóval. Ezt figyelembe véve (8)-ból (1)—(7) felhasználásával kimutatható [2], hogy

$$U^k_{sz}(\nu) = \frac{\{k(\nu) + \varrho\}\dfrac{1}{\eta\tau}}{\eta\dfrac{\nu^2\eta}{8\pi\tau}\dfrac{f_q(\nu)}{\nu^2} - \{\varrho + k_i(\nu)\}} \qquad (12)$$

ahol ϱ a rezonátor veszteségi koefficiense, $k_i(\nu)$ az abszorpció azon részéhez tartozó együttható, amely lumineszcencia gerjesztéshez nem vezet. (12)-ből látható, hogy a ν frekvencián való generálás megindulásához szükséges pumpáló energia annál kisebb, minél nagyobb a fluoreszcencia η hatásfoka. Igen sok szerves festék lumineszcencia hatásfoka közel 100%, így ezt a követelményt kielégítik.

A fluoreszcencia τ csillapodási ideje általában kicsiny (10^{-8}—10^{-9} sec), ezért a festéklézer optikai pumpálására igen rövid, nagy teljesítményű fényimpulzusokat kell használni. A nagy pumpálási sebesség azért is szükséges, mert a festékmolekulák termrendszerében a szingulett gerjesztett állapotok mellett léteznek hosszú élettartamú (10^{-2}—10^{-7} sec) metastabilis triplett energia állapotok is (1a. ábra 2 és 4 energia nívói), amelyek a gerjesztés folyamán jelentős mértékben betöltődnek. A pumpálás és az erősítés az 1 és 3 szintek között jön létre. Amennyiben a pumpálás során a 2 szint betöltöttsége nagy, jelentős mértéket érhetnek el az ún. triplett-triplett $2 \rightarrow 4$ abszorpciós átmenetek, amelyek színképe az esetek többségében a generálás frekvencia tartományába esik. Ezek a triplett-triplett abszorpciós átmenetek növelik a veszteségeket.

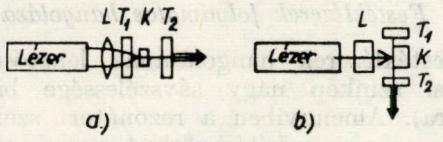
A fentiekből kitűnik, hogy szerves festékek oldataiban optikai erősítés és generálás hozható létre egy viszonylag széles frekvencia tartományban, amelynek a lumineszcencia színkép területén belül elfoglalt helyzete függ az aktív molekulák n koncentrációjától, a pumpálás intenzitásától és a rezonátor veszteségeitől.

Lézerrel pumpált festéklézerek

Festéklézerek esetében is a más lézereknél alkalmazott optikai rezonátorral való visszacsatolást kell megvalósítani. A rezonátor zárótükrének közel 100% a reflexiós együtthatója, a kicsatoló tükröré pedig az erősítési koefficiens nagyságától függően 10—80% között változhat. Mivel a tükrök reflexiós együtthatója 800—1500 Å széles tartományban közel állandónak vehető, az így épített rezonátorok nem szelektívek.

Nagy teljesítményű, rövid időtartamú pumpáló fényimpulzusok előállítására legjobban a rubin és Nd szilárdtest lézerek felelnek meg, amelyekkel óriás impulzus üzemben 20—50 nsec impulzus idejű, több száz MW teljesítményű fényimpulzusok állíthatók elő. Az óriás impulzusokat a rezonátor jósági tényezőjének modulálásával lehet előállítani. Modulátorként a rezonátorban oszcilláló fény hatására kifehéredő festékoldatot használnak (passzív Q kapcsoló), vagy a rezonátor záró tükrének nagy sebességű forgatásával, elektrooptikai zárakkal biztosítják a rövid időtartamú visszacsatolást (aktív Q kapcsoló). A szilárdtest lézerek óriás impulzusaival közvetlenül csak vörös és infravörös tartományba eső lézerfény gerjeszthető festékoldatokban, mivel a lézerfény hullámhossza mindig nagyobb, mint a pumpáló fényé. Annak megoldásához, hogy rubin, ill. neodimium lézerrel a látható tartományban is lehessen a festékoldatokban lézerfényt előállítani, a nem lineáris optika kifejlődése vezetett. Vannak olyan kristályok, pl. a káliumhidrogénfoszfát (KDP) ammóniumdihidrogénfoszfát (ADP), lítiumniobát, amelyekben egy adott irányba haladó, nagy teljesítményű lézerfény egy része a kristállyal való kölcsönhatás következtében átalakul kétszeres frekvenciájú sugárzássá. A rubin (6943 Å) vagy neodimium (10 600 Å) lézer által kibocsátott óriás lézerimpulzust megfelelően kimetszett frekvencia kétszerező kristályon átbocsátva ultraibolya (3471 Å), illetve zöld (5300 Å) fényt kapnak. Ezen kristályok fényátalakítási tényezője 20% alatt van, a hosszúhullámú fény egy része együtt halad a kristály után a kettőzött frekvenciájú nyalábbal. A két sugárnyaláb szétválasztható pl. egy prizmával, ill. az alapfrekvencia megfelelő szűrővel elnyelethető.

Festékoldatok gerjesztésére különösen alkalmas az ultraibolya tartományban sugárzó nitrogén-



3. ábra. Lézerrel pumpált festéklézerek gerjesztési módjai. T — tükör, L — lencse, K — küvetta

lézer [3]. A generálásban résztvevő N_2 molekulák tulajdonságaiból következően erősítés csak 5—10 nsec időtartam alatt lehetséges, ezért a lézerimpulzusok időtartama is ilyen rövid. A nitrogén gáz gerjesztése 15—30 kV feszültséggel táplált, néhány száz kA áramerősségű, 5—10 nsec idejű elektromos kisüléssel történik, ezért műszaki megvalósításához speciális követelményeket kell teljesíteni. Nitrogénlézerrel 1—2 MW teljesítményű, 3371 Å hullámhosszú ultraibolya lézerimpulzusokat állíthatunk elő.

A leggyakrabban alkalmazott két festéklézer pumpálási módot a 3. ábrán vázoltuk. Itt a pumpáló Q kapcsolt és frekvencia kétszerező kristállyal ellátott rubin vagy neodimium, ill. N_2 lézer fényét a gömbi ill. a henger lencse fókuszálja a festékoldatot tartalmazó küvettába. Az ún. hosszanti irányú gerjesztésnél (3a. ábra) a pumpáló nyaláb a festéklézer T_1 zárótükrén keresztül jut be az oldatba, ezért ennek a tükörnek áteresztőnek kell lenni a gerjesztő fény hullához tartományában és közel 100%-os reflexiójú kell hogy legyen a festéklézer által kisugárzott hullámhosszakra. Ez a követelmény teljesíthető, mivel a két hullámhossztartomány az esetek többségében távol van egymástól. A lencse fókusztávolságának alkalmas megválasztásával elérhető, hogy néhány mm vastag oldatrétegben a gerjesztő fénynyaláb keskeny legyen, ezáltal a gerjesztett centrumok nagy sűrűsége érhető el. A tükörpár alkotta rezonátor biztosítja a festékoldatban a fény visszacsatolását, és T_2 reflexiós együtthatójának alkalmas megválasztásával a rezonátorból való kicsatolását.

Kereszt irányú gerjesztésnél (3b. ábra) a hengerlencse a gerjesztő lézer nyalábját egy vékony vonallá képezi le a küvettában levő oldat elülső felületére.

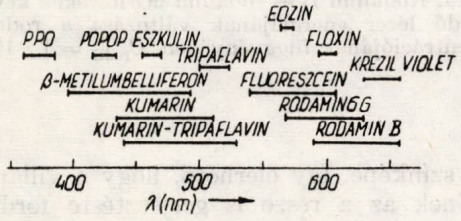
Az impulzusüzemű lézerekkel pumpált festéklézerek legfontosabb jellemzői a rövid időtartam 0,1—20 nsec, a nagy erősítés, a 10—20% körüli hatásfok és a gerjeszthető festékoldatok óriási száma.

A 4. ábrán látható az általunk megépített N_2 lézerrel gerjesztett festéklézerek generálási tartománya, amely a teljes látható tartományt átfedi. Az ábrából kitűnik, hogy a látható színkép különböző tartományában lumineszkáló oldatokat alkalmazva más-más hullámhosszú lézerfény állítható elő egyetlen berendezéssel.

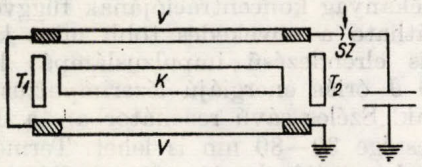
A lézerrel pumpált festéklézerek egy különleges osztálya a folytonos üzemű festéklézereké. Ezek gerjesztése folyamatos üzemű, 0,2—10 W teljesítményű argon-ion lézerrel történik, longitudinális elrendezésben. Itt a fő nehézséget annak megvalósítása jelenti, hogy a folytonos gerjesztés közben létrejövő 3 → 2 átmenetek után (1. ábra) a rendszer minél gyorsabban kerüljön alapállapotba. Ezt kémiai kioltókkal, és a lézeraktív oldatnak 10—20 m/sec sebességű áramoltatásával lehet biztosítani. Emellett az egyéb veszteségeket is minimálisra kell csökkenteni, amely igen kifinomult technikát és rendkívül gondos tervezést, kivitelezést igényel. Jelenleg 400—800 nm között működnek folyamatos festéklézerek, 30% körüli hatásfokkal, és 5—20 MHz spektrális sávszélességgel.

Impulzus lámpával pumpált festéklézerek

A festékoldatok optikai pumpálására használhatók speciális villanó lámpák, amelyek nagy teljesítményű, μsec időtartamú fényimpulzusokat sugároznak ki. Ezeket a Xe töltésű egyenes villanólámpákat nagyfeszültségre (10—30 kV) feltöltött speciális impulzus kondenzátorok ($c = 0{,}1—10\ \mu F$) kisütésével lehet működtetni. Ebben az esetben az aktív oldatot egy cső küvettába helyezik el. Általában két lámpát alkalmaznak a küvetta két oldalán (5. ábra), és a fény jobb kihasználása érdekében egy kettős elliptikus henger reflektorral veszik őket körül. A hengerek egyik-egyik fókusz vonalában az impulzuslámpák, a közös fókuszban pedig a küvetta helyezkedik el, ezáltal a lámpák által kisugárzott fény nagy része az oldatba jut. Mivel a Xe gázba való kisülésnél gyakorlatilag az ultraibolya színképtartományban kezdődő és az infravörösbe átnyúló széles spektrumú fény sugárzódik ki, ennél a pumpálási módnál a gerjesztés széles sávú. A gerjesztő fény ultraibolya része a festékmolekulák roncsolódásához vezet, ezért célszerű a küvettát egy folyadékszűrő réteggel körülvenni e színképtartomány kiszűrése céljából, amit kettősfalú küvetta alkalmazásával lehet megoldani. A festéklézer rezonátorának zárótükre 100%, a kicsatoló-



4. ábra. N_2 lézerrel gerjesztett festékoldatok generálási tartománya

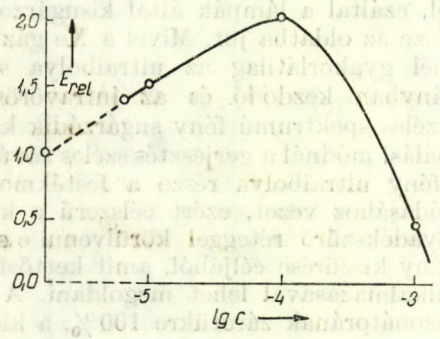


5. ábra. Villanólámpával pumpált festéklézer felépítése K — küvetta, V — villanólámpa, T — tükör, Sz — szikraköz

pedig 60—80% reflexiós együtthatójú lehet ebben az esetben.

Ennél az eljárásnál biztosítható a pumpáló fényimpulzus felfutási szakaszának 0,1—1,0 μsec-os értéke, s ez elég gyors pumpálás az optikai erősítés létesítéséhez. Azonban ilyen pumpálási feltételek mellett a festékmolekulák triplett állapota betöltődik, s ezért viszonylag kevés azon festékoldatok száma, amelyek lézerfelvillanást adnak. Jelentős mértékű lehet az oldatnak a pumpáló fény által kiváltott termikus torzulása is. A generálás néhány μsec-os időtartama alatt a követta sugarának irányában hőmérsékleti és törésmutató gradiens alakul ki, valamint lökéshullámok keletkeznek, amelyek együttesen a közeg olyan mértékű inhomogenitását idézik elő, hogy a generálás megszakad a pumpálás alatti olyan időpontban, amikor még a gerjesztett részecskék koncentrációja nagy.

A fellépő problémák ellenére ennek a lézertípusnak az az egyik előnye, hogy lézerfény előállításához nem kell egy másik lézert felhasználni, másrészt viszont egy lézerimpulzusban nagy energia vehető ki. A villanólámpával gerjesztett lézerek hatásfoka lényegesen javítható keverékoldatok segítségével [4]. A komponenseket ez esetben úgy kell megválasztani, hogy a generáló anyag abszorpciós színképére essen az adalékanyag emisz-



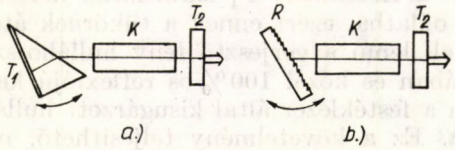
6. ábra. Rodamin B és rodamin 6G festékek keverékével működő lézer energiájának változása a rodamin 6G koncentrációjának függvényében. $C_{rodB} = 1 \cdot 10^{-4}$ mol/l

sziós színképe. Így elérhető, hogy a villanólámpa fényének az a része is gerjesztésre fordítódjon, amely egyébként nem nyelődött volna el a generáló anyagban. A 6. ábrán látható egy általunk vizsgált keverékoldat generálásának hatásfoka az adalékanyag koncentrációjának függvényében. Mint látható a növekedés több mint kétszeres. Speciális elrendezésű impulzuslámpás készülékkel 400 J óriás energiájú lézerimpulzust is előállítottak. Széles sávú rezonátorban a lézerfény sávszélessége 30—80 nm is lehet. Természetesen a festékek cseréjével a lézerfény hullámhossz tartománya ugyanúgy változtatható, mint lézerrel való pumpálás esetében.

Festéklézerek folyamatos hangolása

A festéklézerek hangolásának lehetőségét az erősítési színkép nagy sávszélessége biztosítja (2. ábra). Amennyiben a rezonátort szelektívvé tesszük, azaz az erősítési görbe tartományán belül egy keskeny sávban biztosítjuk a visszacsatolást, akkor a generálás nem az erősítési görbe maximumának környezetében, hanem abban a sávban jön létre, amelyikben a visszacsatolás biztosított. A keskeny sávú visszacsatolás és a sáv folyamatos változtatása több módon megvalósítható mindegyik fentebb említett pumpálási mód esetében.

A 7. ábrán prizmával való hangolás egyik megoldását vázoltuk. A tükrök alkotta rezonátor belsejében helyezkedik el a P hangoló prizma, amely csak megfelelő hullámhosszú, $\Delta\lambda$ sávszélességű sugárnyalábot juttat vissza a K küvettába. Elforgatva a prizmát, a hátsó lapjára rögzített tükörrel együtt, folyamatosan változtatható a visszacsatolás, és így a lézerfény hullámhossza. Az így elérhető sávszélesség 10 Å-nál kisebb lehet, a hangolás tartománya pedig 300—500 Å egy festékoldat esetében. A sávszélességet a prizma szögdiszperziója és a nyaláb divergenciája határozza meg.



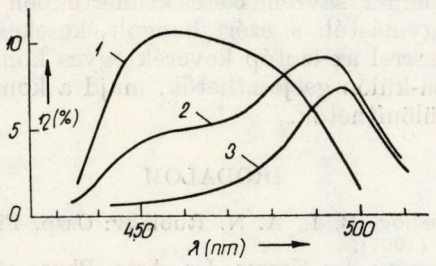
7. ábra. Festéklézer folyamatos hangolása a) prizmával, b) reflexiós ráccsal K — küvetta, T — tükör, R — reflexiós rács

Hasonló egyszerű hangolási lehetőséget biztosít, ha a zárótükör helyett reflexiós rácsot alkalmazunk (7b. ábra). A rács normálisának a rezonátor optikai tengelyével bezárt szögétől függően változik a visszacsatolás tartománya. Kis sávszélességek nagy osztású rácsokkal (1500—2000 vonal/mm) érhető el. Speciális holografikus rácsokkal 10^{-1} Å alá sikerült a lézerfény sávszélességét csökkenteni.

Megfelelő festékeket választva, amelyek erősítése elég közel esik egymáshoz, széles tartományban generáló, ill. hangolható festéklézereket valósíthatunk meg, keverékoldatok segítségével. Idevonatkozó méréseinkből a 8. ábrán egy- és kétkomponensű oldatok lézer-hatásfokát rajzoltuk fel a hangolás hullámhosszának függvényében. Hangoló elemnek 1800 vonal/mm osztású reflexiós rácsot alkalmaztunk, s így a generálás sávszélessége 0,5 nm volt. Látható, hogy kétkomponensű oldat alkalmazásával a generálás tartománya kiterjeszthető.

Amennyiben a rezonátorba Fabry-Perot interferométert helyezünk, a prizma ill. rács alkalmazása mellett további sávszűkítés érhető el (10^{-3} Å).

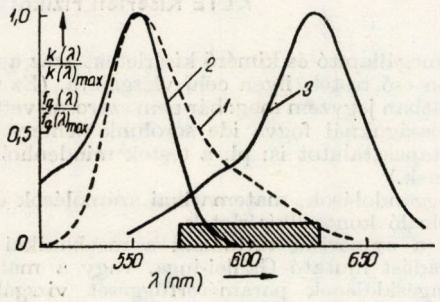
Sok esetben nem szükséges a lézerfény kicsiny sávszélességét biztosítani, elegendő a folyamatos



8. ábra. 7-dietilamino-4-metilkumarin és tripaflavin keverékoldat lézerhatásfokának a lézerfény hullámhosszától való függése. $C_{kum} = 2 \cdot 10^{-3}$ mol/l, C_{trip}: 1—0, 2—$2 \cdot 10^{-5}$, 3—5 $\cdot 10^{-5}$ mol/l

hangolást megvalósítani. Ilyenkor egyszerűbb hangolási eljárások alkalmazása lehetséges.

Hangolás valósítható meg a rezonátorba bevitt abszorbens [5] (pl. külön küvettákban bevitt festékoldat) felhasználásával. Az általunk elsőként kidolgozott ilyen hangolási eljárásnál olyan abszorbenst választottunk, amelynek abszorpciós színképe a rövidebb ill. a hosszabb hullámok tartományából nyúlik a generálás lehetséges sávjába (az ábrán vonalkázott tartomány). Attól függően, hogy melyik oldatot alkalmazzuk, a hosszabb ill. a rövidebb hullámok irányába az abszorbens koncentrációjától függő hangolás érhető el (9. ábra).

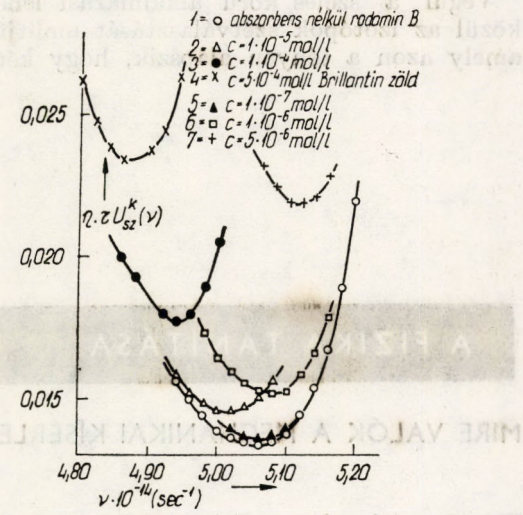


9. ábra. Festéklézer hangolása abszorbensekkel. 1 — a generáló rodamin 6G lumineszcencia színképe, satírozott tartományban lehetséges generálás, 2 — rodamin B, 3 — brillantin zöld hangoló oldatok abszorpciós színképe

A festéklézerekre kidolgozott elmélet alapján a hangolás leírható az oldatok lumineszcencia-spektroszkópiai jellemzőinek felhasználásával. Nyilvánvalóan a generálás azon a ν frekvencián jön létre, amelyen a (12)-vel adott $U^k_{sz}(\nu)$ függvénynek minimuma van. A kifejezésben az aktív oldat lumineszcencia spektroszkópiai módszerekkel meghatározott $k(\nu)$ abszorpciós, $f_q(\nu)$ lumineszcencia színképét, η hatásfokát, τ csillapodási idejét és n koncentrációját felhasználva, továbbá a rezonátor veszteségét megadva $U^k_{sz}(\nu)$ kiszámítható. A 10. ábrán különböző koncentrációjú hangoló oldat esetében kapott $U^k_{sz}(\nu)$ görbét ábrázoltunk, ahol a veszteségeket az abszorbens $k_a(\nu)$ abszorpciós együtthatójával $k_v(\nu) = k_a(\nu) + \varrho$ alakban adtuk meg. Ezen görbék minimum helyei és a kísérletileg mért lézerszínképek súlyponti hullámhosszai gyakorlatilag egybeesnek (11. ábra).

Festéklézerek alkalmazásai

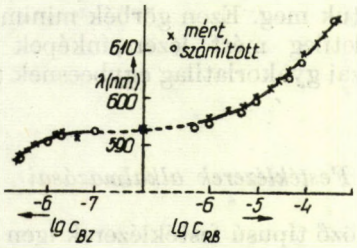
A különböző típusú festéklézerek igen sok alkalmazásra találnak a tudomány és technika területén [6]. A teljesség igénye nélkül, itt csak néhány kiragadott példát mutatunk be.



10. ábra. Az $U^k_{sz}(\nu)$ függvény helyzetének függése a hangoló oldat koncentrációjától, 1 — hangoló oldat nélkül, 2 — 7 különböző koncentrációjú hangoló oldat esetében

Az abszorpciós spektroszkópiát a gázok, a folyadékok és szilárdtestek vizsgálatánál kiterjedten alkalmazzák, ahol a festéklézerek nemcsak helyettesítik a hagyományos fényforrásokat, hanem a kis sávszélesség következtében a felbontóképesség megnő, a kis divergenciájú nyalábbal pedig igen hosszú rétegek vizsgálhatók.

Ha a vizsgálandó mintát egy széles sávú rezonátor belsejében helyezzük el (rezonátoron belüli spektroszkópiai módszer) a lézer szelektív kioltása jön létre a minta abszorpciós tartományában. Ilyen módszerrel a közönségesnél 3—5 nagyságrenddel érzékenyebb mérések végezhetők. Ezeknél a vizsgálatoknál a lézerek hangolhatósága lehetővé teszi azt, hogy abban a hullámhossz tartományban működjön a lézer, amelyben a vizsgált anyag abszorbeál. Ugyancsak ezért előnyös fotokémiai folyamatok, biológiai rendszerek vizsgálatánál vagy pl. az orvosi terápiában festéklézereket alkalmazni. A légkör, tengervíz szennyező anyagának azonosítása — az abszorpciós ill. reflexiós színkép alapján — hangolt festéklézer fényével vizsgálható a legjobban.



11. ábra. Rodamin 6G oldat lézer fényének mért és az $U^k_{sz}(\nu)$ minimum helye alapján számított súlyponti hullámhossza különböző hangoló oldatok esetében

Végül a széles körű alkalmazási lehetőségek közül az izotópok szétválasztását említjük meg, amely azon a tényen alapszik, hogy két izotóp atom energia sávrendszere kismértékben különbözik egymástól, s ezért hangolt, kesekeny sávú festéklézerrel az izotóp keverék egyes komponensei külön-külön gerjeszthetők, majd a komponensek elkülöníthetők.

IRODALOM

1. Sztyepanov, B. I., A. N. Rubinov: Uszp. Fiz. Nauk *95*, 45 (1967).
2. Ketskeméty I., Kozma L.: Acta Phys. et Chem. Szeged *19*, 429 (1973).
3. Ketskeméty I., Rácz B., Bor Zs., Kozma L.: Acta Phys. et Chem. Szeged *20*, 191 (1974).
4. Rácz B., Ketskeméty I., Kozma L.: Zsurnal Prikl. Szpektr. *15*, 914 (1972).
5. Ketskeméty I., Rácz B., Szalma I., Huhn E., Kozma L.: Acta Phys. et Chem. Szeged *17*, 9 (1971).
6. Schäfer F. P.: Dye Lasers, Springer Verlag, 1973.

A FIZIKA TANÍTÁSA

MIRE VALÓK A MECHANIKAI KÍSÉRLETEK?

Demény András
KLTE Kísérleti Fizikai Tanszék

Ebben az írásomban a fizikatanítás egyik legfontosabb összetevőjével, az oktatási kísérletekkel foglalkozom. Közismert, hogy a fizikát mai értelemben vett tudománnyá a kísérletezés tette, ezért alapvetően fontos, hogy ez a tény a középiskolai fizikaoktatásban is tükröződjön. Tanítványainknak itt kell megtanulni helyesen kísérletezni, a tapasztalatokat leíró konzisztens fizikai mennyiségeket bevezetni, ezek segítségével hipotéziseket tenni, majd pedig a sikeresnek bizonyuló hipotézisekből következő jóslásokat újabb kísérletekkel ellenőrizni, azaz módszereiben végigcsinálni azt, ahogy jelenlegi ismereteink kialakultak. Az ankét témájának megfelelően mechanikai kísérleteket fogunk elemezni, annál is inkább, mert a középiskolai kísérletekkel e témakörben szokott a legtöbb zavar, félreértés előfordulni. Ennek valószínű okairól Dede Miklós írásában már sok mindent hallottunk.

Mielőtt még a konkrét mechanikai kísérletek elemzésébe fognánk, talán hasznos lesz, ha végiggondoljuk, hogy milyen célból szoktunk kísérletezni az oktatás során. Megpróbálom jellegük és fontosságuk szerint csoportosítani a szokásos és előfordulható kísérleteket, mindegyik csoportba néhány példát is felsorolva. Az osztályozás bizonyos hierarchiát is jelent a kísérletek között, persze ezt nem kell nagyon mereven értelmezni, mert a felépítés módjától függően egyes kísérletek előbbre rukkolhatnak a rangsorban, de veszíthetnek is jelentőségükből. Nézzük tehát az egyes csoportokat fontossági sorrendben:

1. Megalapozó vagy fundamentális kísérletek.

Ide tartoznak: Valamilyen fizikai mennyiség bevezetését célzó, ill. valamilyen definíció konzisztens voltát biztosító kísérletek. Ilyen a tömeg és az imulzus definíciójához vezető ütközési kísérletsorozat, vagy a sztatikai indítású felépítésben az erő bevezetését biztosító kísérletek a csavarrugóval.

Törvényt megállapító kísérletek: ilyenek a Newton-törvényeket megalapozó kísérletek, továbbá az erőtörvényeket megállapító és kimérő kísérletek, azaz a rugó és a szabadon eső testek ilyen célú vizsgálata. (Ez utóbbiva kapcsolatban jegyzem meg: bár nem szorosan vett kísérlet de fontosságuknál fogva ide sorolunk néhány kollektív emberi tapasztalatot is: pl. a testek mindenhol a „Föld felé" esnek.)

2. Meggondolások, matematikai számolások ellenőrzésére szolgáló kontrollkísérletek.

Ebbe a csoportba tartoznak a mechanikai energiamegmaradást mutató Galilei-inga, vagy a matematikai inga lengésidejének paraméterfüggését vizsgáló kísérletek stb.

3. Fizikai törvények, jelenségek technikai alkalmazásának bemutatása.

Ilyen a rezgőnyelves frekvenciamérő, ruhacentrifuga, járművek stb. Egy óvatosságra intő körülmény: ezeknek az eszközöknek a működése meglehetősen bonyolult, ezért inkább csak mondanivalónk illusztrálására használjuk őket.

4. Kinematikai kísérletek.

A kinematika tárgyalásakor előforduló kísérletek igazából nem is kísérletek, csak kísérletes tevékenységgel járnak. Az itt bemutatott jelenségek csak arra szolgálnak, hogy tanítványaink lássák azt, hogy a természet valóban realizálja a kinematikában tanult egyszerű mozgástípusokat, továbbá, hogy az absztrakt matematikai szimbólumok érzékletessé váljanak számukra. Ezek a kísérletek kinematikai szempontból nem bizonyítanak semmit, vigyázni kell tehát a hangsúlyra használatuk közben, nehogy ilyesfajta következtetésre jussanak tanulóink a Mikola-cső tanulmányozása után: „Bebizonyítottuk, hogy a buborék által megtett út arányos az idővel", mint ahogy ezt már néhány fizika szakos jelölt egyetemi felvételi vizsgáján hallottuk.

5. Utolsóként említem az általunk „trükkös kísérlet" nek nevezetteket. Ezek a kísérletek váratlan, meghökkentő kimenetelük révén alkalmasak a figyelem felkeltésére, jó értelemben vett szórakoztatásra, az óra oldottabbá tételére. Ilyen például a közismert bűvészmutatvány:

Elhangzott az 1975. évi Országos Fizikatanári Ankéton.

hirtelen megrántva az abroszt, a terítéket az asztalon marad. Egy másik, szintén jól ismert elrendezés: vékony cérnán függ egy súlyos teher, amelyre egy vastagabb fonal van kötve. Lassan húzva a felső vékony cérna, hirtelen rántva az alsó vastag fonal szakad el. Az itt előforduló jelenségek meglehetősen bonyolultak, és a baj akkor szokott megtörténni, ha ezekben valamelyik alapvető természeti törvény tiszta jelentkezését véljük felfedezni, vagy egy jól meghatározott törvénnyel próbáljuk magyarázni őket. Ezt a két kísérletet éppen ilyen okok miatt elemezzük majd az „álkísérletek" között.

Itt a kísérletek elemzése közben is szólni kell a mechanika kiemelten fontos középiskolai szerepéről. Mivel ez a diszciplína a legelső, és a legteljesebben is tárgyalható középfokon, döntően befolyásolhatja a teljes képzés sikerét, talán még a felsőoktatásra is kiterjedően. A bevezetőben is vázolt program véghezvitelére — szerencsére — jó alap lehet a mechanika, sajnos van buktató is. Először a jó oldalt tekintve: aránylag kevés és egyszerűen megvalósítható kísérlet segítségével megalkotható és kiépíthető a tárgy fogalom- és törvényrendszere, továbbá a rendelkezésre álló, viszonylag egyszerű matematikai apparátus felhasználásával a teljesítőképességét is meg tudjuk mutatni. (Az egyszerű apparátuson elsősorban grafikus szerkesztést, numerikus algoritmusok használatát értem.) A buktató pedig abban rejlik, hogy a mechanikának léteznek egészen elmatematizált tárgyalási módjai is, ami a maga helyén egyáltalán nem megvetendő, de ha kényelmi szempontból a tárgy bevezetésekor ilyen változatot követünk, egyáltalán nem világos, mit is kell hát kísérletek segítségével megalapozni, bizonyítani. Mivel pedig megalapozó fizikai tárgynál kísérletezni illik, sőt kell; óhatatlan, hogy ne bizonytalan célú és jelentésű „szertartás-jellegű" kísérleteket végezzünk.

A bemutatandó kísérletek kiválasztásánál törekedni kell arra, hogy a vizsgálni kívánt jelenség lehetőleg tisztán, zavaró körülményektől mentesen valósulhasson meg, azaz teremtsünk ún. „tiszta kísérleti körülményeket". Két fő hibaforrás szokott előfordulni. Az egyik többnyire technikai jellegű, pl. surlódás, közegellenállás, leküzdése. A másik már inkább lehet elvi hibák kiindulópontja: olyan kísérletek bemutatása, melyeknek értelmezése során egyszerre több fizikai mennyiség bevezetése, törvény megsejtése szükséges, de tanári tekintélyünknél fogva megköveteljük, hogy tanítványaink is csak az általunk kiemeltet lássák benne, elmossa ezzel az értem — nem értem, bizonyítja — nem bizonyítja különbséget. Ezt elkerülendő válasszunk olyan kísérleteket, hogy lehetőleg lineáris rendben lehessen levonni belőlük a szükséges tapasztalatokat, gondosan ügyelve arra, hogy a tapasztalatok elemzése során csak már definiált fizikai mennyiségeket és ismert törvényeket használjunk, a kísérlet kimenetelét pedig csak olyan egyszerű állításokkal fogalmazzuk meg, melyeknek egyértelműségéről meg lehetünk győződve. Minden valószínűség szerint helyes, ha a tapasztalatokat a bekövetkezett események segítségével fogalmazzuk meg, és csak ezután kezdünk az új fogalmak kiépítéséhez.

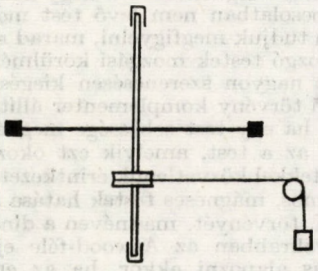
Két példa az előforduló hibákra:
Az egyik a szöggyorsulás-forgatónyomaték összefüggés megállapítását szolgáló, de a fogalmilag tiszta felépítést megakadályozó gyári eszköz (1. ábra). A készülék alapvető hibája az, hogy függőleges tengely körül van csapágyazva, így a terhet tartó fonál csak csigán átvetve csatlakozhat a tengelyhez. Mi itt a buktató? Egyszerűen az, hogy az éppen most bevezetésre kerülő törvényből tudjuk, hogy az elhanyagolható tehetetlenségi nyomatékú csiga fonala akkora erővel húzza az egyik végéhez kötött testet, mint amekkorával a másik végét a teher húzza. Holott, ha az eszköz tengelye vízszintes, a tengelyre tekert fonálra ható erőt a már előzőleg megismert törvények alapján szabatosan megállapíthatnánk. Másik: Egy eszközsorozattal végezhető kísérletek leírásában található a 2. ábrán látható rajz és az idézett szöveg. „Ugyanarra a rugóra függesszük előbb közvetlenül, majd fonal közbeiktatásával ugyanazt a testet. Következtetés: Az erő a hatásvonala mentén eltolható." Ezzel szemben a kísérlet pusztán annyit mutat, hogy ugyanakkora teher a rugón ugyanakkora egyensúlyi megnyúlást hoz létre.

Külön problémát jelenthet az is, hogy a fizikai fogalmaknak igen sokszor van köznapi megfelelője (a mechanikában szinte mindnek), és ha az ezekhez kötődő, többékevésbé bizonytalan jelentéstartalmat minden további elemzés, kritikai felülvizsgálat nélkül a fizikai fogalom sajátjaénak ismerünk el, a fogalom használata során igen sok nehézségbe ütközünk, ha olyan területre érkezünk, ahol ezekről köznapi tapasztalatok már nincsenek.

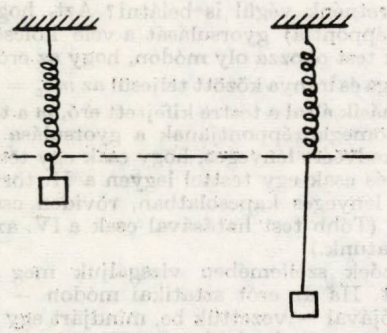
Hogy néz ez ki például a tömegnél? A tömeg szón életében először mindenki anyagmennyiséget értett, a későbbiek során pedig már nem csak azt. Az anyagmennyiség intuitív fogalom: bár ebben a formájában nem szabatosan definiált fizikai mennyiség, mindenképpen asszociálódik hozzá az additivitás tulajdonsága. Amikor a fizikában későbbi tanulmányaink során a tehetetlenség mértékét bevezetjük, és tömegnek nevezzük, az additivitást semmiképpen sem szabad ezt bizonyító kísérlet nélkül, pusztán az elnevezés azonossága jogán az új mennyiséghez hozzárendelni. (A dolog éppen fordítva van: A tehetetlenség mértéke additívnak bizonyult, éppen ezért tekinthetjük az anyagmennyiség — most már szabatosan értelmezett — mértékének is, célszerűen használva rá a már régebben is ilyesmit jelentő tömeg szót.) De ha pontosabb mérésekkel később kiderül, hogy mégsem additív, akkor sem fog tanulóinkból olyan görcsös ellenérzést kiváltani, mert az ő számukra nyitva hagytuk ezt a lehetőséget is.

Azt hiszem, többé-kevésbé egyetértésre talál az a kijelentésem, hogy a középiskolai fizikatanítás célja és módja nem a Newton-axiómák kijelentése és folyományainak dedukálása, hanem a mechanika alapfogalmainak és törvényrendszerének kiépítése, eljutva a Newton-törvényekig. Éppen ezért azokat a kísérleteket tárgyaljuk részletesen, amelyekre szokás ezeket a törvényeket alapozni.

Nézzük az első törvényt. Elég gyakori, hogy a tehetetlenség törvényének illusztrálására a megrántott abrosz — pohár példát hozzuk fel, mondván a következőt: „A pohár nagy tehetetlensége miatt maradt az asztalon." Ezek után pedig felmondjuk a tehetetlenség törvényét helyesen. Két szempontból is kifogásolható ez a kísérlet és a belőle levont tapasztalat. Az első az, hogy a tehetetlenség



1. ábra



2. ábra

törvénye nem kvantitatív törvény, azaz nem állít olyat, hogy a testek kevésbé vagy jobban tehetetlenek, hanem azt állítja, hogy a természetnek van olyan tulajdonsága, hogy a testek tehetetlenek, azaz mozgásállapotukat csak más testek hatására hajlandók megváltoztatni. Az a tény pedig, hogy értelmezhető a tehetetlenség mértéke nevű fizikai mennyiség, az az I. törvénytől független tapasztalatrendszeren alapul. A kísérlet azonban arra sem alkalmas, hogy a tehetetlenség mértékére következtethessünk belőle. Nézzük meg, mit is mutat valójában ez a kísérlet. Először is, ha lassan húzom, leesik a pohár, ha gyorsan, akkor nem. Másodsorban, erősen függ a kísérlet sikere mind az abrosz, mind az asztal hosszától. Jó szemű tanítványaink bizony észre is veszik, hogy rántás közben elmozdult a pohár. Ezek szerint az a bizonyos tehetetlenség sokkal inkább a körülményekre jellemző, mintsem a pohárra. Mi is történik? Amikor elkezdjük húzni a terítőt, a pohár is elkezd gyorsulni a fellépő tapadási surlódási erő miatt. A pohár nagy tömege miatt — itt a döntő pont — ez az erő nem elegendő a kívánt együttgyorsulás biztosítására, a pohár megcsúszik, a csúszási súrlódási erő az előbbinél még kisebb lévén, a helyzet ezután sem változik, és a pohár kisebb gyorsulása miatt lemarad az abroszról és az asztalon marad.

A kísérlet értelmezésénél a fő hiba ott van, hogy a tehetetlenség szót két értelemben használjuk: mint jelenséget, ill. mint a tehetetlenség mértékét, azaz a tömeget. Amit pedig a kísérlet valóban mutat az annyi, hogy a súrlódási erő korlátozott nagysága miatt a nagy tömegű testeken nem tud elegendő nagy gyorsulást létrehozni.

Hasonló az ellenvetés a vékony cérna-nagy test-vastag fonal kísérlettel szemben is. Ha hirtelen rántjuk meg az alsót, akkor ő szakad el, lassan (kvázisztatikusan) húzva pedig a felső. A kísérlet elvégzése után megint azt mondjuk: A test nagy tehetetlensége miatt az alsó vastag fonál szakadt el. Elemezzük a jelenséget. A fonál szakadása annak a következménye, hogy benne akkora feszültség ébredt, hogy azt már nem bírta el. A nagy feszültség pedig a nagy deformáció miatt jött létre. Amikor hirtelen rántunk, gyorsan elérjük az alsónál a szakadást kiváltó deformációt, mert a testre ható erő e rövid idő alatt nem tudott végeredményben akkora elmozdulást létrehozni, hogy a szakadás a felsőnél következzen be. A hiba itt is ugyan az, mint az előző kísérletnél.

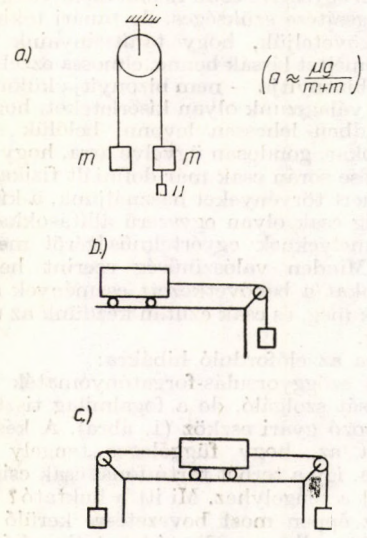
A helyes megoldás az I. törvény esetében nem könnyű, fogalmilag talán a legnehezebb a négy között. Mivel más testekkel kapcsolatban nem levő test mozgását a Föld felszínén nem tudjuk megfigyelni, marad az egyre kisebb lassulással mozgó testek mozgási körülményeinek extrapolálása. Ezt nagyon szerencsésen kiegészítheti viszont az, ha az első törvény komplementer állítását próbáljuk belátni; azaz ha egy test sebessége megváltozik, mindig megtalálható az a test, amelyik ezt okozta. Akár úgy, hogy más testekkel közvetlenük érintkezett, akár a Föld vagy elektromos, mágneses testek hatása alá került.

Newton II. törvényét, más néven a dinamika alaptörvényét leggyakrabban az Atwood-féle ejtőgépes kísérletekre szokás alapozni akkor, ha az erő a dinamika törvényeitől függetlenül már a sztatikában bevezetésre került. Az eredeti elrendezést a 3a. ábra mutatja (itt a végeredményt is felírjuk), de lényegében az eredetire vezethető vissza a többi használatos elrendezés is, melyeket a 3b. és 3c. ábra mutat.

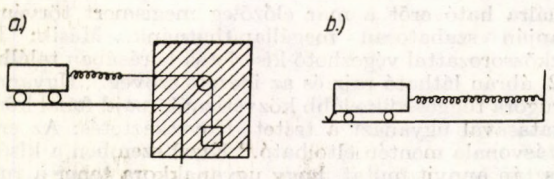
Mit szeretnénk végül is belátni? Azt, hogy egy test (tömegközéppontja) gyorsulását a vele kölcsönhatásban levő másik test okozza oly módon, hogy az erő és gyorsulás nagysága és iránya között teljesül az $m\bar{a}_c = \bar{F}$ törvény, ahol $\bar{F}$ a másik által a testre kifejtett erő, m a test tömege, $\bar{a}_c$ a test tömegközéppontjának a gyorsulása. A fogalmi tisztaság kedvéért lényeges, hogy csak egy test mozgását figyeljük, és csak egy testtel legyen a II. törvény szempontjából lényeges kapcsolatban, röviden csak egy erő hasson rá. (Több test hatásával csak a IV. axióma után foglalkozhatunk.)

Az előzőek szellemében vizsgáljuk meg az eredeti elrendezést. Ha az erőt sztatikai módon — csavarrugó deformációjával — vezettük be, mindjárt egy szembeötlő hiány: matematikai alakba öntött törvényt akarunk felfedezni, de nem tudunk erőt mérni, nincs erre alkalmas eszköz az elrendezésben. Pedig semmiképpen sem lehet ezt kikerülni, mert ennek hiányában csak a gyorsító erő, gyorsított össz-tömeg fogalmaival operálhatunk, amelyekről valójában magunk sem tudjuk, hogy micsoda, legfeljebb csak a végeredmény ismeretében adhatunk neki feladatonként más és más jelentést. A kísérlet elvégzése után kellő tétovasággal kimondjuk az $\bar{F} = const \cdot \bar{a}$ törvényt (formailag) helyesen, hozzátéve, hogy az állandó a tehetetlen tömeg. A kérdés most már csak az, hogy a képletben szereplő betűk mit jelentenek azon túl, hogy erő, tömeg, gyorsulás: azaz mire ható erő, minek a tömege, minek a gyorsulása. Nézzük: F a μg, ez az erő a túlsúlyra hat, de nincs egyedül, mert hat erre a testre a kötél is. De hol van a többi test, meg a többi erő? a minek a gyorsulása, egyik vagy másik testé? A tömegközépponté semmiképpen sem, pedig oda akarunk eljutni, hogy az erő a tömegközéppont gyorsulását határozza meg. (Vagy ha ezt még nem akarjuk mondani, akkor illendőbb lett volna csak transzlációs mozgást végző testet vizsgálni.) Úgy tűnik, menthetetlenül elveszett a törvény vektorjellege is. Végül az állandó, ami majd a tehetetlen tömeget fogja adni: a végeredmény szerint ez a „gyorsított össztömeg", ami egyik test tömegével sem azonosítható. A csiga szerepéről sem tudunk mondani semmit, annak szabatos tárgyalásához külön törvénycsoport kell.

Sötétnek tűnik a helyzet, pedig nem az. Igen könnyen tisztává válik minden, ha a 4a. ábrán látható elrendezést használjuk. Hitelesített rugót kapcsolunk a testhez, és azt vizsgáljuk, hogy a rugóhossz függvényében mekkora a testen okozott gyorsulás. A csiga a ráakasztott teherrel most csak arra szolgál — akár el is takarhatjuk a tanulók elől —, hogy a rugó állandó deformációját biztosítsa, azaz a rugó állandó erőt fejtsen ki a testre. (Hogy a csiga ezt miért teszi meg, azt még nem tudhatjuk, de most nincs is rá szükség.) Az $F/a = m$ mérési eredmény most valóban a II. törvényt igazolja, mert az F valóban a testre hat, és csak ő hat, a valóban a test gyorsulása, és az állandó valóban a test tehetetlen tömege. Az igazsághoz tartozik azonban, hogy a kísérlet elvégzése ebben az elrendezésben elég nehézkes, elsősorban a rugó berezgése miatt, de többkevesebb próbálkozás után azért elvégezhető.



3. ábra



4. ábra

Az oktatási szituációban talán még tisztább a 4b. ábrán látható megoldás. (A kísérleti bemutatón is láthattunk ilyen típusút.) Itt az út—idő függvény felvétele, ebből a gyorsulás—rugóhossz függvény kiértékelése szükséges. A változó gyorsulás miatt az út—idő függvényt pl. elektromos jelírással vehetjük fel.

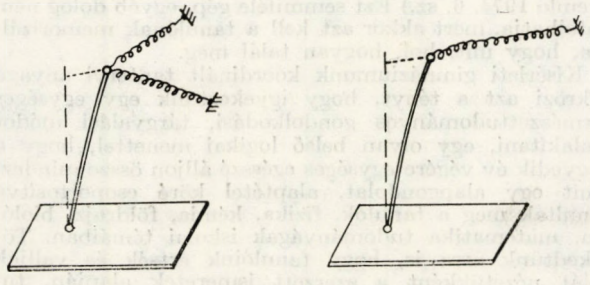
A dinamikai felépítési módban Newton II. törvényére perdöntő kísérlet nem létezik, mivel e törvény állítása az erőtörvények létezése. Az előző két kísérletnek azonban ebben a felépítésben is döntő szerepe van, mert az erőtörvények közül a rugalmas kölcsönhatás erőtörvénye olyan, hogy elsőként tárgyalva is tartalmazza az erőtörvények lényeges tulajdonságait. (A számba jöhető másik kölcsönhatás a gravitáció, de ez a tömeggel való arányossága miatt nem alkalmas az erőtörvényekkel való első ismerkedésre.) Itt a leszűrt tapasztalat: a rugó a hozzákapcsolt testnek a deformációja által egyértelműen meghatározott nagyságú és tengelyirányú impulzusváltozási gyorsaságot ($m\bar{a}$-t) okoz.

A III. törvényt nagyon tisztán és egyszerűen bizonyíthatjuk akármelyik felépítés keretében. A sztatikában: két hitelesített csavarrugót összeakasztva és meghúzva mérhetjük az egyenlő nagyságú és ellentétes irányú erőket. Bármiféle a Magdeburgi-féltekékre vagy a Guttmann-nadrág reklámjára emlékeztető összeállítás egy felesleges harmadik „erővezető" test közbeiktatásával a helyzetet elbonyolítja, a III. törvény jelentését pedig az egyensúly túlhangsúlyozásával, valamint a kényszererők szükségtelen belekeverésével félreviszi. A dinamikai felépítésében a III. törvény a párkölcsönhatásoknál tapasztalt impulzusmegmaradás direkt következménye, így ott semmi problémát nem jelent.

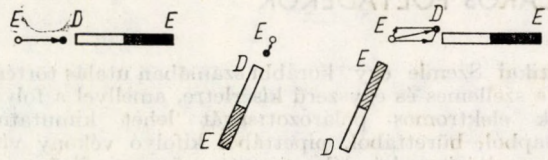
A IV. axiómával kapcsolatban elég furcsa a helyzet. A normál gimnáziumi osztályokban még csak említésre sem kerül hivatalosan, persze hallgatólagosan ott is használjuk, mert tárgyalunk olyan eseteket is, amikor egy testre több test is hat, és a IV. törvény állítása éppen erre az esetre vonatkozik.

Ha egy testre több erő is hat egyszerre, akkor az együttes hatást (ami a sztatikában egy rugalmas test valamelyik pontjának elmozdulása, a dinamikában a gyorsulás lehet) úgy kaphatjuk meg, hogy az egyes párkölcsönhatások hatását *lineárisan* szuperponáljuk. Azt, hogy egyenként, de az előbbivel azonos körülmények között mit fejtenek ki, azt a párkölcsönhatások *előzetes* vizsgálatából már tudjuk.

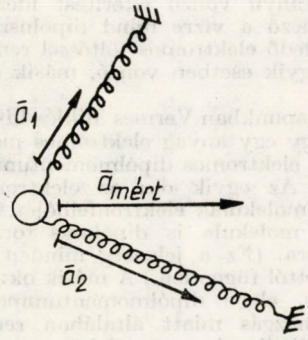
A IV. axióma oktatásának hiányát persze nem viseli el a tárgy, és a szuperpozíció elve alatt tanítunk is bizonyos kísérleteket. Leggyakrabban azt, amikor egy jól ismert szerkezet segítségével egyszerre indítunk két golyót; az egyiket szabadeséssel, a másikat vízszintes hajítással. A golyók egyszerre koppanása után azt mondjuk, hogy ez a szuperpozíció elvét bizonyította. Az igazság az, hogy nem. A kísérlet legfeljebb a gravitációs erő sebességfüggetlenségét bizonyította. A IV. törvény ugyanis *nem* időben egymás után ható erőkre vonatkozik, hanem az *egyszerre* hatókra. Az pedig, hogy ez a kísérlet a sebességkomponensek szuperpozícióját, azaz a sebesség vektorjellegét mutatja az egyszerűen rossz, mert a sebesség definíció szerint vektor, tehát nincs mit bizonyítani rajta.



5. ábra



6. ábra



7. ábra

A helyes eljárás a következő lehet. A sztatikai felépítés keretében elég nehéz dolgunk lesz, mert az erő vektorjellegét és a szuperpozíció elvét külön kell választani és külön kell bizonyítani, ami a szükségképpen nulla eredő miatt elég nehéz. Ez a szétválasztás pedig szükséges, mert a IV. axióma *nem* az erő vektorjellegének állítása. Az 5. ábrán látható megoldás javasolható. A test, amire hat a többi, legyen egy könnyen deformálható rugalmas test, pl. egy kötőtű. A kísérletből leszűrt állítás a következő: Két rugó együttes hatása helyettesíthető eggyel oly módon, hogy a helyettesítő rugó iránya egybeesik a két rugóerő nyíl-összegének irányával, nagysága megegyezik a két rugóerő nyíl-összegének nagyságával. Hogy az erőhatások függetlenségének elve nem üres, és nem a vektorjellegen van a hangsúly, a legmeggyőzőbben egy olyan eset tárgyalásával bizonyíthatjuk, amikor a IV. törvény állítása minden további feltételezés nélkül nem is tartható fenn. A vizsgált test legyen most is a kötőtű, de előzetesen mágnesezzük fel. Hozzuk kölcsönhatásba egymás után egy erős rúdmágnessel, azután egy lágyvasrúddal, majd mindkettővel egyszerre (l. 6. ábra). A könnyebb fogalmazhatóság kedvéért tételezzük fel, hogy a kötőtű végének az elmozdulása a rá ható erő lineáris függvénye. A tapasztalat pedig a következő: Az együttes hatásra bekövetkező elmozdulás nem rakható össze a tiszta párkölcsönhatásokból származó elmozdulásokból még vektorösszegezéssel sem. (Az ellentmondás feloldása az, hogy a lágyvas a mágneses térben polarizálódott, ahogy ezt a 6. ábrán a lágyvas vonalkázásával jelöltük. Tehát nem sikerült biztosítani az azonos körülményeket.)

A dinamikai felépítésben fogalmilag sokkal egyszerűbb a helyzet. A tiszta párkölcsönhatások erőtörvényeinek ismerete után igen könnyű a IV. törvény állítását megfogalmazni, ill. bizonyítani: Több test hatása alatt mozgó test gyorsulását megkapjuk, ha a párkölcsönhatásokból származó gyorsulások egyszerű nyíl-összegét vesszük. A kísérleti elrendezés a 7. ábra szerinti lehet. Mérni kell az együttes hatásra bekövetkezett gyorsulást, amit összerakhatunk a párkölcsönhatások hasonló körülmények között létrehozott gyorsulásaiból nyíl-összegzéssel.

POLÁROS FOLYADÉKOK

Marx György
ELTE Atomfizikai Tanszék

A Fizikai Szemle egy korábbi számában utalás történt arra a szellemes és egyszerű kísérletre, amellyel a folyadékok elektromos polározottságát lehet kimutatni. Vízcsapból, büretából, pipettából kifolyó vékony vízsugarat eltérít a közelébe tartott műanyag fésű vagy vonalzó, amelyet előzőleg dörzsöléssel elektromossá tettünk. (Az ellentétes töltésű megdörzsölt üvegrúd ugyanilyen irányú vonzó eltérítést idéz elő, tehát a elektromos mező a vízre mind dipólusra hatott, nem pedig mint eredő elektromos töltéssel rendelkező testre. Utóbbit az egyik esetben vonzó, másik esetben taszító hatás érné.)

Legutóbb lapunkban Vermes Miklós hívta fel a figyelmet arra, hogy egy anyag elektromos mezőben két okból mutathat elektromos dipólmomentumot (elektromos polarizációt.) Az egyik ok: az elektromos térerősség deformálja a molekulák elektronfelhőjét, így az eredetileg apoláros molekula is dipólussá torzul elektromos erőtér hatására. (Ez a jelenség minden esetben fellép és hőmérséklettől független.) A másik ok: ha a molekula eleve poláros, eleve dipólmomentummal rendelkezik, akkor a hőmozgás miatt általában rendezetlen kész molekuláris dipólusokat az elektromos erőtér többékevésbé rendezi. (Ez a jelenség csak poláros molekulák halmazában lép fel, és a hőmérséklet, hőmozgás csökkentésével fokozódik.)

A fentiekhez azt a kiegészítést szeretnénk fűzni, hogy szobahőmérsékleten nagy dielektromos állandóval azok az anyagok rendelkeznek, amelyek molekulái eleve polárosak. Ha tehát a „csurgatásos" kísérletben nagy eltérülést tapasztalunk, abból joggal következtethetünk a molekula eleve kész dipólus-jellegére. Ezt a mellékelt összeállítást bizonyítja.

Apoláros molekulák

Benzol, 6_6H_6	$d = 0$	$\varepsilon_r = 2{,}28$
Naftalin $C_{10}H_8$	0	2,54
Oktán C_8H_{18}	0	1,95
Széntetraklorid CCl_4	0	2,24

Poláros molekulák

Víz H_2O	$d = 1{,}85$	$\varepsilon_r = 78{,}54$
Nitrobenzol $C_6H_5NO_2$	4,22	34,9
Alkohol C_2H_5OH	1,66	20,1
Hangyasav HCOOH	1,52	58,5

A táblázatban a molekula d sztatikus dipólmomentumát (1 debye = $3{,}34 \cdot 10^{-30}$ C m egységekben) és relatív permittivitását tüntettük fel.

Fentiekből az a tanulság, hogy ha valaki egyértelműen szeretné szemléltetni egyes poláris molekulák dipólusjellegét, akkor pl. a víz nagymértékű eltérülését hasonlítsa össze a benzin (oktán) sokkal szerényebb eltérülésével. Az eredeti vízcsurgatásos kísérletben megfigyelt erős eltérülés valóban túlnyomórészt a H_2O molekua sztatikus dipólmomentumától ered. Ha ezt a benzines, benzolos, széntetrakloridos kísérlettel kiegészítjük, és megfigyeljük a kisebb, de nem zérus kitérést, akkor az elektronfelhő deformálhatóságát is szemléltetni tudjuk.

Ez a kísérlet mindenesetre egyszerűbb és szemléletesebb (ugyan nem olyan kvantitatív), mint valamely szokásos, kondenzátor kapacitását kimérő kísérlet

A TERMÉSZETTUDOMÁNYOS TÁRGYAK KOORDINÁLT OKTATÁSA ÉS A VILÁGNÉZETÜNK ALAPJAI TÁRGY EGY ISKOLAI KÍSÉRLET KERETÉBEN

Fürst Istvánné
Budai Nagy Antal Gimnázium, Budapest

A Fizikai Szemle 1973. 12., 1974. 3. és 6. számában a gimnáziumokban tervezett ill. folyó korszerűsítési törekvésekről olvashattunk. E törekvések egyike távlati elképzelés, másika a Budapesti Budai Nagy Antal Gimnáziumban folyó koordinált ill. komplex jellegű kísérlet. Mindegyikből egyaránt kitűnik a dialaktikus materialista természetszemlélet kialakítására való törekvés, hogy a tanulók képesek legyenek az őket körülvevő világot történeti fejlődés eredményének tekinteni, „amely egyszerűbb állapotból alakult ki, az általános mozgástörvényekből megérthető módon, nem pedig megérthetetlen természetfeletti beavatkozás eredményeként" — mondja Erdey Grúz Tibor professzor.

Az ismertetett tantervi anyagok közelítően híven tükrözik a valós világot, annak tudományos eredményeit. Vagyis egységes természettudományos világkép bemutatása a fontos, a tárgyak maximális összehangolásával. Az MTA Elnökségi Közoktatási Bizottságának anyagában a természettudományos műveltség tartalmi vonatkozásait így összegezi Marx György és Kedves Ferenc professzor:

. . . „A természettudományos műveltség négy összetevőjének a következőket tartjuk:

a) Az anyag mozgásában megnyilvánuló kisszámú általános elv ismerete . . .

b) Tájékozódás a természetben és műszaki környezetben az általános elvek alapján . . .

c) A világ természettudományos megismerésének módszertana, mint az elsajátított cselekvési készség . . .

d) A természettudományok hozzájárulása a dialektikus materialista világnézet alátámasztásához."

Budai Nagy Antal Gimnáziumban folyó kísérletek nevelési és oktatási céljai között egyaránt szerepel, a sokoldalúan képzett, okosan tanuló, gondolkodó ember kialakítása, bizonyos tárgyi alapismeret elsajátításával.

. . . „Valóban az a helyzet, hogy a gondolkodásra nevelés, mint fő feladat hangsúlyozása nem kis mértékben háttérbe szorította azt a tagadhatatlan tényt, miszerint a gondolkodni tudás alapja mégis csak egy nem kis csekély mennyiségű konkrét ismeretanyag, ha tetszik adathalmaz, amely igenis saját agyunkban raktározandó, hiszen ez az egzakt gondolkodás nyersanyaga." (Wolfram Ervin: Néhány realitásról, Felsőoktatási Szemle 1974. 6. sz.) Ezt semmiféle gép, egyéb dolog nem pótolhatja, mert akkor azt kell a tanulónak memorizálnia, hogy mit, hol, hogyan talál meg.

Kísérleti gimnáziumunk koordinált tantervi anyaga tükrözi azt a tényt, hogy igyekeztünk egy egységes természettudományos gondolkodási, tárgyalási módot kialakítani, egy olyan belső logikai menettel, hogy a negyedik év végére egységes egésszé álljon össze mindaz, amit egy alapgondolat, alaptétel köré csoportosítva tanultak meg a tanulók, fizika, kémia, földrajz, biológia, matematika tudományágak iskolai témáiban. Törekedtünk arra is, hogy tanulóink értsék és vallják saját nézetükként a szerzett ismeretek alapján, tudományosan megalapozva, hogy

— világmindenség, a természet, a társadalom való dolog, maga a valóság, az objektív valóság, amelynek egyértelmű filozófiai alapfogalmi meghatározása: *ANYAG*, ez emberi tudattól független, térben és időben létező, fajtái, féleségei mozgásának függvénye.

A MOZGÁS az anyag belső lényegi tulajdonsága,

benne rejlő immanens sajátja. Az anyag és mozgás egymástól elválaszthatatlan, a mozgás maga a kölcsönhatás, állapotának jellemzői: a térbeliség, időbeliség, energia, sebesség. A mozgás milyensége, a kölcsönhatás szintje határozza meg az ANYAGFAJTÁKAT.

— Az ANYAGFAJTÁK hierarchiájában vannak folytonos (kontinuum) anyagfajták; hullámtermészetűek, ezekre alapvetően jellemző az anyagiság-mozgás-energia, és vannak részecske-természetűek (korpuszkulárisak), ezekre alapvetően jellemző: anyagiság-mozgás-energia-tömeg.

— Hogy az adott anyagfajta térbeliségére az adott időben mi jellemző, ez határozza meg a STRUKTÚRÁT. A struktúra a szerkezet és funkcióegységét foglalja magába; vagyis a rész-rész, rész-egész, egész-környezet közötti kölcsönhatást. Alapvető jellemzője a térbeliség.

— Különböző struktúrák rendszerekké szerveződnek, rendeződnek. A RENDSZER lehet: zárt, (nincs kölcsönhatás a rendszer és a környezet között) és nyitott (van kölcsönhatás), lehet homogén (rész= egész) és heterogén (rész≠egész), lehet természeti (anorganikus, kémiai, élő, stb.) és társadalmi. Minél bonyolultabb egy rendszer belső struktúrája annál többféle kölcsönhatást tud létrehozni. Ez megnyilvánulhat az ALKALMAZKODÁSBAN — ÁTALAKULÁSBAN, de mindenkor mennyiségi ill. minőségi változást eredményez. A változás a FEJLŐDÉS maga, amelynek során a rendszerek egymásba átalakulhatnak; szakaszosan, ugrásszerűen vagy folyamatosan. Mindez időben történik, mivel minden folyamatnak, szakasznak van kezdete, van vége s ezt „n"-szer véve, mivel mindegyik vég valaminek a kezdete, maga a VÉGTELENSÉG: A folyamatoknak, átalakulásoknak iránya van, amely lehet

progresszív
⟶
⟵
regresszív

A világmindenségre e folyamatok sorának végtelensége jellemző, és így időbelisége ÖRÖK.

— A „világmindenség egysége anyagiságában van", s az anyag fejlődése során hozta létre az AGYAT, s annak termékét a TUDATOT;

Kísérletező kollégáimmal együtt tárgyainkon és a világnézetünk alapjai tárgyon belül is bátran és következetesen igyekszünk feltárni a tanulóknak az ellentétek dialektikáját: Nem kész tételeket tanítunk állandóan, hanem feltárjuk előttük a tényeket, ... „amelyekből ellentétek derülnek ki és segítjük őket annak felismeréséhez, hogy az ellentétek feloldására milyen vélemények lehetségesek és melyik ezek között az elfogadható." (Erdey Grúz Tibor: A pedagógus szerepe a tudományos-technikai forradalom korszakában Ped. Szemle 1974. 6. sz.)

Segítjük a tanulót, (abban is) hogy ismerje fel saját szerepét, funkcióját, legyen önértékelése, józan reális igényei önmagával és másokkal szemben is. Mindent nem tanulhat meg, de útbaigazítást nyerhet, hogy tovább hogyan juthat el.

A már megismert tantervi anyag és a Világnézetünk alapjai tárgy első óráinak, így többek között a „Dialektikus materialista természetszemlélet alapjai" anyagrész témavázlatának bemutatásával igyekeztünk felnőtt pedagógus fejjel „diákeszünket" elővenni — Németh Lászlóval szavaival élve — és tanulóinknak úgy segíteni, hogy velünk együtt dolgozzanak meg a sikerért. A kísérletezőket ösztönzi a legalkalmasabb módszerek megteremtése, a tanulókat a széles körű ismeretek megszerzésének érdekes játéka vagyis az órák mindegyik percében mindkét félnek észtornára, gondolkodásra van szüksége. Vagyis nemcsak a tanulók élvezzék a tanár óráját, hanem a tanár is — " a maga számára is újjá teszi azzal, amit olvasott, gondolt hozzá, az óráit úgy eszeli ki, mint kitűnő csínyeket ..., s az elevenség circulus pretiosusa indul meg." (Németh László: Pedagógiai Kísérletek, Kortárs 1974. 3. sz.)

A kialakított koordinált természettudományos kísérleti oktatás s az alkalmazott módszerek helyességét híven tükrözi az 1974/75. tanév elején, az egyik kísérleti osztályban végzett részleges tudásszint-felmérés. A felmérés a legelső Világnézetünk alapjai tanóra keretében volt. A felmérés célja: hogy közvetlenül a kéthónapos szünet után, mennyire képesek a tanulók visszaadni mindazt, amit az eltelt 3 év alatt tanultak, mennyire mélyek ismereteik, mennyire képesek a tanultak alapján általánosítani, hogy tudják önállóan megfogalmazni ismereteiket, hogyan alkalmazzák azokat.

A világnézeti összefüggéseket tükröző kérdéseket hagyományos oktatásban részt vett tanulóknak is feltettük. A felmérésből kitűnt, hogy a koordinált ill. komplex jellegű oktatási kísérletben részt vett osztály tanulóinak sikerült magukévá tenni mindazt a tényt, fogalmat, amely a világmindenségre, a mozgásra, fejlődésre, az élet lényegére s mindezek kölcsönhatásaira vonatkozott, mert hisz ezeket a kérdéseket valamennyien igen következetesen, tudatosan igyekeztünk elmélyíteni bennük az eltelt 3 év alatt.

A feltett kérdésekből a leglényegesebbeket emelem ki:

Kérdés	Teljesítmény %-os aránya	
	kísérleti csoportnál	kontroll csoportnál
1. Miben van a világmindenség egysége?	100	17,1
2. Miben különböznek egymástól a fizikai, kémiai, biológiai, földrajzi jelenségek?	80,6	14,1
3. Mi az élet lényege?	90,3	22 2
4. Hogyan értelmezed az anyag fejlődését mutasd be egy példán kersztül?	90 3	66 6
5. Milyen összefüggést látsz az anyag a mozgás a tömeg és energia között?	93 0	44 4
Összteljesítmény	90 8	32 8

Az elképzelt helyes válaszok közlésénél a két csoport reagálása is eltérő volt, így a kontroll csoport tagjai, akkor döbbentek rá, hogy „igen rémlik, valahol már volt szó róla", a másik csoport csak azon meditált, hogy „nem egészen így, vagy jobban meg kellett volna fogalmazni a választ" stb. módon értékelték saját teljesítményüket.

A 4. és 5. kérdésre adott válaszok mindkét csoportnál a legjobb teljesítményt tükrözték, mivel mind a tankönyvek, mind a tanári magyarázatok a legegyértelműbbek, a legegységesebbek ezen a téren. A többi kérdésre adott válaszokhoz kapcsolódó példákban is érdekes különbségek adódtak, míg a kísérleti csoport többségében természettudományos jellegű, a természetből vett példákat hozott, addig a kontrollcsoport történelmi, társadalmi és technikai példákkal (néha kissé erőltetett) támasztotta alá válaszait.

A felmérést követő órákon a dialektikus materialista természetszemlélet alapjai téma szerepelt, ahol a kérdések, gondolatok, problémák, megvilágítását szolgáló jó példák tömegével kamatoztatták mindazt, amit az eltelt évek alatt tanultak a tanulók, s több idő jutott az egyes kérdések mélyebb, alaposabb megvilágítására, megvitatására, túl a tankönyvi anyagon (pl. a dialaktika lényege Hegelnél, Engelsnél, vagy a korszerű anyagfejlődés lényege.)

Természetesen a visszaadott anyagismeretük, véleményünk valójában majd csak évek múlva tisztul le, válik önmaguk előtt is egyértelművé, meggyőződéssé, tudományosan megalapozott marxista világnézetté. De ezt a kontrollt mi magunk közvetlenül nem tudjuk már

lemérni, legfeljebb csak azoknál, akikkel a munka vonalán találkozunk. De már most látjuk, hogy eddigi nevelésünk során is jellemzi őket a:
— műveltség, sokoldalúság, gondoskodás
— helytállás, a munka szeretete, megbecsülése, igénye
— a közéleti aktivitás
— a szocialista módon élés a magánéletben, szabadidőben

E néhány mondatból is kitűnik, nem elég oktatni, nevelni is kell. A szaktanári munka ezeket nem nélkülözheti, ha a tanár életcéljának az oktatást és nevelést; a gyakorlati pedagógiát választotta.

ANYAGFEJLŐDÉS 1975

Oktatási konferencia Sárospatakon, 1975. június 28—július 8. Megnyitó

Törő Imre
Budapest

Szeretettel köszöntöm a konferenciának minden kedves résztvevőjét. A konferencia, melyet az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, a Magyar Kémikusok Egyesülete, a Magyar Biológiai Társaság, az Akadémia Természettudományi Oktatási Albizottsága, valamint az Országos Pedagógiai Intézet közös rendezése hívott életre, a Műszaki és Természettudományi Egyesületek Szövetsége szervezésében, közvetlen folytatója annak a munkának, melyet az MTA Elnökségi Közoktatási Bizottsága kezdett. E munka igen nagy jelentőségű s szorosan összefügg a magyar szocialista társadalom művelődésének, illetve nevelésének kérdésével.

Az emberiség életében a természettudományoknak mind nagyobb szerep jut. Összefügg ez általában a tudomány gyors fejlődésével, de azzal is, hogy ma már mindenki előtt világos, hogy a természettudománynak a szocialista társadalom életében nélkülözhetetlen szerepe van nemcsak a helyes világnézet kialakítása szempontjából, hanem a népgazdaság, az emberi társadalom jóléti igényének állandó emelkedése szempontjából is. A természettudomány gyors előretörése mind fokozottabb társadalmi igényt támaszt az általános természettudományos műveltségre. Ennek kielégítése iskolai oktatásunk és nevelő munkánk feladata, melynek teljesítését nem háríthatjuk el magunktól. A természettudományos műveltség megszerzése ma már nem lehet csak egy szűk tárdadalmi kategória feladata, hiszen a termelés minőségi javítása követelőleg lép fel az egész társadalommal szemben. Iskolai oktatásunk keretei már ma is pattanásig feszítettek, de még inkább azok lesznek a jövőben, ezért kell már ma komolyan foglalkoznunk olyan korszerű reformokkal, melyek a fenti követelményeknek a jövőben meg fognak tudni felelni.

Oktatásunk tantárgyi beosztása gátja lehet a további fejlődésnek is, ha nem tudunk elszakadni a fizika, kémia, biológia stb. tantárgyi beosztástól. Gondolkodnunk kell azon, hogy ezen mereven elválasztott tantárgyak helyett egységesen tanítható természettudományos tananyagot és tantervet dolgozhassunk ki. Ezt a feladatot írja elő az októberi párthatározat is, kimondva: „Keresni kell a jelenlegi tantárgyi szétaprózottság felszámolásának útjait, a több tudományág keretébe tartozó és jelenleg külön tantárgyakban oktatott ismeretanyag közös tantárgy keretében történő integrált oktatásának lehetőségét." Hogy ezt megtehessük, pedagógusaink képzésében szemléletváltozásra van szükség, mert csak ennek eredményessége teszi lehetővé, hogy a felnövő fiatal generációk már ezt az egységes természettudományos műveltséget vigyék magukkal az életbe.

Tavaly ősszel a Magyar Biológiai Társaság didaktikai szekciójától indult el annak gondolata, hogy a fizikai, kémiai és biológiai egyesületek nyújtsanak lehetőséget a három tárgyat oktató gimnáziumi tanárok számára ilyen szemléletet kialakító munka elkezdése érdekében, a tájékoztatásra és gondolatcserére, amely elgondolás íme most megvalósult.

Biztató jelnek lehet venni, hogy az MTA Elnökségi Közoktatási Bizottságának állásfoglalása máris befolyásolta a Tantervi Főbizottság 1975. február 5-i határozatát, amennyiben a gimnáziumi óratervben a fizika, kémia és biológia oktatása úgy van elosztva a négy évre, hogy a biológia oktatása már építhet a kémia és fizika anyagára.

Reméljük, mostani tanácskozásunk sem marad eredmény nélkül. És most, amidőn szeretettel üdvözlöm ismét a konferencia előadóit és minden kedves résztvevőjét, a konferenciát ezennel megnyitom.

*



A Sárospatakon megrendezett konferencia megnyitó előadása.

ANYAGFEJLŐDÉS
(Fizika-, kémia- és biológiatanárok tanácskozása Sárospatakon)

Néhány nappal a pataki konferencia előtt egy Pest környéki gimnázium biológia tanára kérdezte tőlem berzenkedve: „Azt nevezitek ti integrálásnak, hogy fizikust beszéltettek kémiáról, kémikust biológiáról, biológust geofizikáról?" Nem sokkal előbb az MTA kísérleti program (Fizikai Szemle 1973. 12.) szerint tanuló első gimnazisták évvégi összefoglalóján a gyerekek mondták el: „Az enzimek működési alapelvének, a H_2-molekula képződésének, a fémek vezetőképességének megértése egyaránt az elektron viselkedésének értésén alapszik." És egyáltalán nem érdekelte őket, hogy tanáruk diplomájában a fizika, kémia vagy a biológia tanári cím szerepelt-e.

*

A Sárospatakon 1975. június 30. és július 8. között rendezett konferencia két szakaszban zajlott. Az első részben — a csaknem száz fős hallgatóság előtt — *A légkör evolúciója*, *A makromolekulák* és *A szabályozás* témakörben hallhattunk előadásokat. A légkör evolúciója főcím alatt megtartott előadások a Fizikai Szemle múlt számában jelentek meg. Törő Imre, a Magyar Biológiai Társaság elnökének meleghangú, szép bevezetője a Szemle e számában jelent meg. E cikkek és a többi pataki előadás is mutatta, hogy az egyes tudományágak komolyan elvárják más tudományágak gyors fejlődését és eredményeinek átadását. E konferencia eredeti célja a tanártársadalom tájékoztatása a tudományágak határterületeinek gyors fejlődéséről. Az előadások frisseségét és talán méginkább az integrálódás objektív létét igazolja, hogy az előadók, akik kutatók, tudósok voltak, csaknem kivétel nélkül lelkes hallgatóivá váltak más szakterületek kutatóinak.

Az előadóknak úgy kellett beszélniük, hogy a tudományos kutatás gyakorlatától elszakadt, a természettudományoknak esetleg egy másik ágát tanító tanár is értse, élvezze az elmondottakat. És ezzel két szép eredményt értünk el: a tanárok megízleltek valamit a ma tudományos kutatásából, a más-más szakos kutatók pedig végre „közérthetően", a szaktudomány szlengje nélkül, a szinte kötelező szakirodalmi „nagyképűségtől" mentesen beszélhették meg közös problémáikat. A résztvevő kutatók sűrűn hangoztatták: több i l y e n közös konferenciára lenne szükség, egyáltalán nem ártana ez a tudománynak.

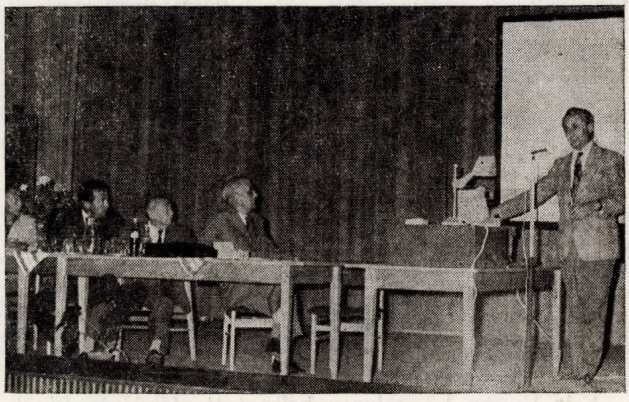
*

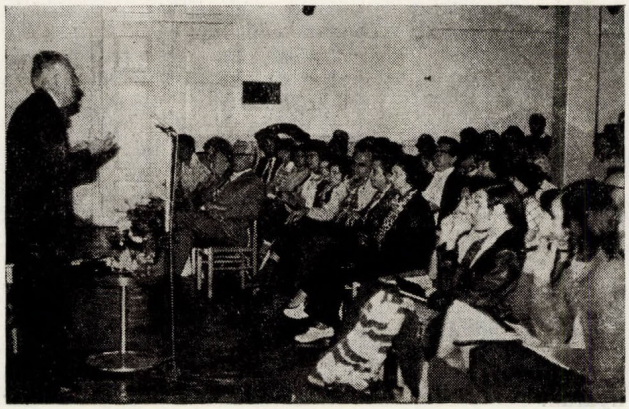
A lüktető, szervesen egymáshoz kapcsolódó természettudományos előadások közé két „fórumot" iktatott a szervező bizottság. Mindkettő a természettudományok tanításáról szólt, *Mi a fizika, mi a kémia, mi a biológia?* és *Tantervi problémák* alcímmel. Az elsőt Szentágothai János, a másodikat Kontra György vezette. E fórumok, talán a túlzottan inhomogén hallgatóság, vagy a nem eléggé körülhatárolt téma miatt szétesőkké váltak. Különböző kísérleti oktatások kiragadott részletproblémái, egy-egy tudományág szakmai kérdései, szervezési nehézségek, nevelési-neveléselméleti kérdések kerültek terítékre összefüggéstelen egymásutánban. A viták érdekessé, hasznossá válhattak volna, hiszen sok értékes gondolat is elhangzott . . . Tekintsük inkább pozitívnak, hogy a fórumoknak nem a véleményhiány vetett véget, hiszen a fórumokon felvetett problémákról a valóban termékeny vita a Pinceklubban alakult ki.

*

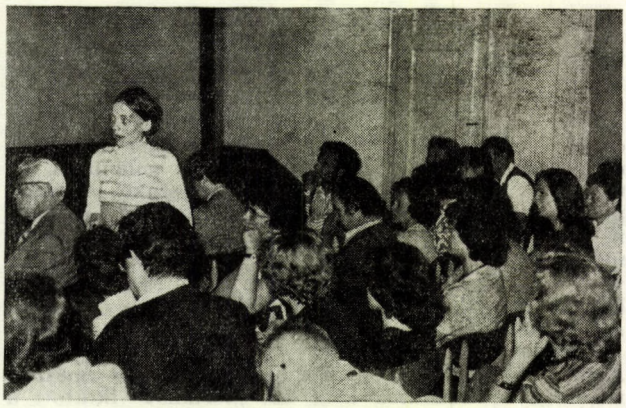
Érdemes néhány szót szólni a kulturális programokról, amelyek nemcsak rendkívül színessé, hangulatossá tették a pataki napokat, hanem szervesen illeszkedtek a konferencia programjához. Láttuk *A Nap nyomában* c. tévésorozat két szép darabját, az *Illumináció* c. lengyel játékfilmet egy fizikus pályakezdéséről és a Balázs Béla













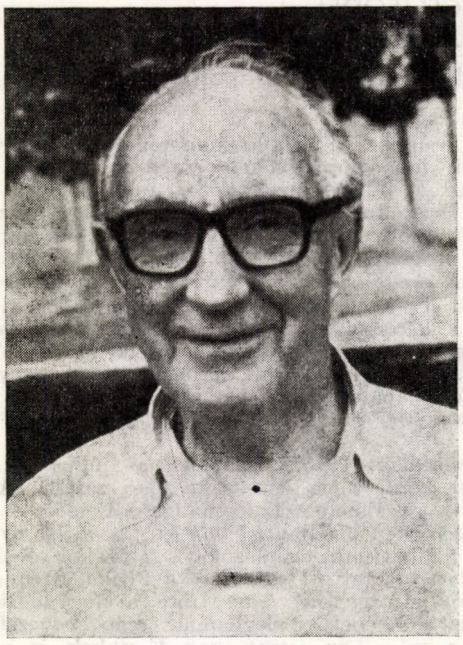
Stúdió megrázó dokumentumfilmjét egy pedagóguscsalád életéről. A *Mindenség szerelme* esten Juhász Ferenccel találkoztunk a pataki vár lovagtermében, majd a költő baráti beszélgetésre jött közénk a Pinceklubba. A pataki konferenciára nehéz visszaemlékezni a pinceklubbeli parázs viták, oldott baráti beszélgetések felidézése nélkül. Az egész konferencia meleg hangulatú megszervezéséért Abonyi Ivánnénak mondunk köszönetet.

*

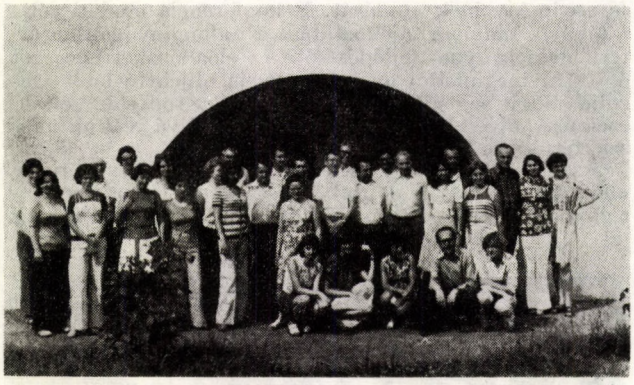
A konferencia második fele munkaértekezletté alakult. Kevesebb résztvevővel, azokkal, akik az MTA természettudományi programját dolgozzák ki, akik között általában már nem a program bevezetésén, hanem a megvalósítás módján, annak finomításán folyt a vita. A közösen meghallgatott előadások elsősorban a biológiához kapcsolódó határterületek oktatásáról, középiskolai lebontásáról szóltak. E közös megbeszélések két kiemelkedő élménye: Eric Rogers princetoni egyetemi tanár előadásai és a Nyelvészet—matematika—természettudomány találkozó volt.

Eric Rogers hivatalosan beiktatott előadásán kívül, amit *Korai találkozás az energiával* címmel tartott, nap mint nap meglepett bennünket a természettudományok tanításában jól hasznosítható, szellemes, kedves ötlettel. Eric Rogers az Angliában több mint egy évtizede megindult Nuffield kísérleti oktatás tervezésében vesz részt. Éppen ezért megnyugtató volt, hogy a magyar programban megoldottabbnak ítélte a fizika és kémia egybehangolását.

Szombat délután a Fiatal Nyelvészek Munkaközösségének tagjai élményszerűen ismertették az új, kísérleti nyelvtanoktatás alapelveit, illusztrálták azokat a már elkészült tankönyv ötletes feladataival. Majd a középiskolai matematika anyag új feldolgozásáról és a kísérleti oktatási tapasztalatokról tájékoztatott Bartal Andrea, e program kidolgozóinak egyike. Ezek az ismertetések nem voltak öncélúak. Intenzíven kerestük a kapcsolatot, különösen a gondolkodásmód fejlesztésében, a módszertan egybehangolásában, a közös nevelési célokban. A gimnázium első osztályában, úgy tűnik, a modellalkotásos gondolkodás mód kialakítása, készségszintű elsajátíttatása mindhárom tantárgyban elsőrendű feladat.



Eric Rogers



A konferencia második felében, az idő nagyobb hányadában a fizika, kémia, biológia sajátos problémáit: a konkrét metodikát, a tankönyvek felépítését, a tanmeneteket vitatták meg szekciókban a hallgatók. A kísérleti oktatási program első két évéről szerzett konkrét tapasztalatok, a megvalósítás lehetőségébe vetett hit, a lehiggadt, felelős munka jellemezte ezeket a kisebb csoportokban folytatott beszélgetéseket.

*

Hadd válaszoljunk a berzenkedő biológia tanárnak e konferencia után a következőképpen: Ha a pataki konferencián fizikatanár mutatott be a biológiaórákon esetleg már régről ismert enzimes kísérleteket, az nem azt jelentette, hogy naivul a hozzáértő biológia tanárt akarta megtanítani ezen kísérletek biológiai vonatkozásaira. Pusztán azt akarta megmutatni, hogy a világegyetem *enzim* nevű darabkáit sem más törvények írják le, mint a szabadon szaladó vagy H-atombeli elektront, vagy a paraffinmolekulát és a mosószereket. Csak annyit akart megláttatni, hogy a természet nem gyártott külön anyagfajtát és külön törvényeket az élőanyag számára, elegendőek voltak a kvantumkémia törvényeit követő végtelenül gazdag mozgáslehetőségű atomok, elektronok.

Ezt tanultuk meg leginkább Sárospatakon, 1975 nyarán.

Tóth Eszter

RELATIVITÁSELMÉLET — KÖZÉPISKOLÁSOKNAK
(Az Einstein-féle speciális relativitáselmélet alapjai)

Blészer Jenő
Pécs, Széchenyi István Gimnázium

I. A speciális relativitáselmélet alapelvei

1. A fizika törvényeinek érvényességi köre

A fizikai törvények megállapítása, kikísérletezése mindig egy meghatározott koordinátarendszerben történik, így érvényességük is mindenekelőtt ezen koordinátarendszerben mondható ki.

Kérdés azonban, hogy a kapott törvények kizárólag csak a szóbanforgó rendszerben érvényesek-e, vagy pedig vannak vele egyenértékű egyéb rendszerek is?

A mechanikai törvények érvényességi körét tekintve már régóta ismeretes, hogy ezek minden inerciarendszerben érvényesek. Inerciarendszernek azt a rendszert nevezzük, amelyben az inercia-(tehetetlenségi)-elv érvényes: minden test, melyre erő nem hat, nyugalomban marad, vagy egyenesvonalú egyenletes mozgást végez. Ha egy inerciarendszert ismerünk, akkor minden rendszer, mely ehhez képest egyenesvonalú egyenletes mozgást végez, szintén inerciarendszer.

Az inerciális koordinátarendszerek között fennálló kapcsolatokat a Galilei-transzformáció fejezi ki. Ezzel bármelyik rendszerbeli mérési adatok átszámíthatók egy másik rendszerbe.

Végezzen K' a K rendszerhez képest egyenesvonalú egyenletes mozgást. Egyszerűség kedvéért az x tengelyek legyenek egybeesők, az y és z tengelyek pedig egymással párhuzamosak (1. ábra). Ekkor a két rendszer koordinátái közti kapcsolatot a K' rendszernek a K-hoz viszonyított v sebessége esetén az alábbi egyenletek fejezik ki:

$$\begin{aligned} x' &= x - v \cdot t \\ y' &= y \\ z' &= z \\ t' &= t \end{aligned} \qquad (1)$$

Utóbbi egyenlet azért áll fenn, mert mindkét rendszer órái egy normál-óra szerint vannak összeigazítva, így az egyes rendszerekben mért idők azonosak.

A dinamika egyenleteit Galilei-transzformációnak alávetve változatlan alakú egyenleteket kapunk, így is kifejezve azt a tényt, hogy az inercia rendszerek a mechanika szempontjából mind egyenértékűek. Ui. ha a törvény más alakú lenne, ez a jelenségnek másképpen való lefolyására is utalna.

Példaként mutassuk ki, hogy a dinamika II. törvénye minden inerciarendszerben azonos alakú!

Legyen F a K rendszerben az x tengelyen levő m tömegű testre ható olyan erő, mely a testet az x tengely mentén gyorsítja a_x gyorsulással. Ekkor

$$F = m \cdot a_x \qquad (2)$$

Alkalmazzuk a Galilei-transzformáció egyenleteit.

Ha a tömegpont K rendszerben $x = x(t)$ függvény szerint mozog, akkor ezen rendszerben a sebesség $v_x = \frac{dx}{dt}$, a gyorsulás $a_x = \frac{dv_x}{dt}$.

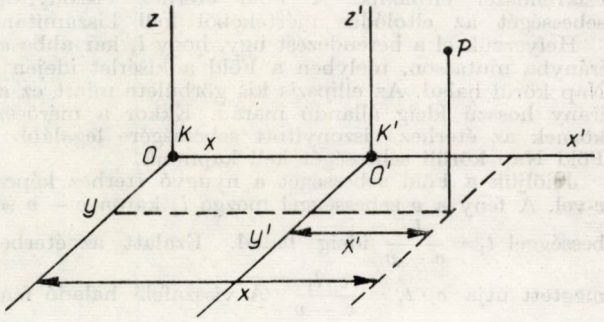
Az (1) egyenletcsoport alapján a K'-ben észlelt sebesség

$$v'_x = \frac{dx'}{dt'} = \frac{d}{dt'}(x - vt) = \frac{d}{dt}(x - vt) = \frac{dx}{dt} - v = v_x - v,$$

a gyorsulás pedig

$$a'_x = \frac{dv'_x}{dt'} = \frac{d}{dt}(v_x - v) = \frac{dv_x}{dt} - 0 = a_x.$$

Mivel $m = m'$ és $F = F'$ a klasszikus felfogás szerint, (2) átmegy $F' = m' \cdot a'_x$ alakba. (3)



1. ábra

A mechanika egyenleteinek vizsgálata után további kérdésként vethető fel, hogy vajon az elektrodinamika egyenletei (Maxwell egyenletek) is a rendszerek sokaságában érvényesek-e?

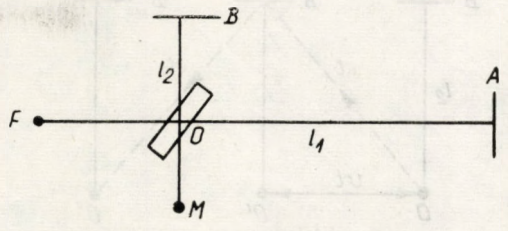
A törvények szerkezetéből mindenekelőtt az következik, hogy abban a koordinátarendszerben, amelyben érvényesek, a fény minden irányban ugyanazon c sebességgel terjed. Hosszú ideig az a felfogás uralkodott, hogy ilyen koordinátarendszer csak egyetlenegy lehet, amelynek az elektromágneses hatásokat közvetítő anyaga (éter!) abszolút mozdulatlan, nyugvó. Hiszen ha egy ehhez képest egyenesvonalú és állandó v sebességgel haladó K' rendszert gondolunk el, akkor abban a haladás irányában kibocsátott fényjel sebességét $c - v$-nek, ellentétes irányban haladó jel, esetén $c + v$-nek találjuk, tehát semmiképpen sem állandónak. Ui. az elindított fényjel — a korabeli felfogás szerint a hangjelekhez hasonlóan — az észlelő mozgásától vagy nyugalmi állapotától függetlenül a közeg rugalmassága által megszabott c sebességgel halad; az észlelő az előzők szerint első esetben „szökik" a jel elől, második esetben „elébe fut", ezért észleli az említett mérés révén az iránytól való függést.

Tehát: bár a mechanika törvényei szempontjából az inercia rendszerek egyenértékűek, úgy látszik, ugyanezt nem lehet elmondani az elektrodinamika egyenleteiről.

De ekkor jó lenne néhány információt megtudni erről az igen kitüntetett szerepű, az abszolút nyugvó éter koordinátarendszeréről. Legalább annyit, hogy Földünk mekkora sebességgel halad hozzá képest. Ennek megállapítására volt hivatott a Michelson kísérlet.

2. A Michelson kísérlet

Az F fényforrásból fénnyaláb esik az irányához képest 45°-os szög alatt hajló félig ezüstözött O-beli üveglemezhez, mely részben átengedi a fényt A felé, részben visszaveri B felé. Az A-ból visszaverődő fény O-ban újból visszaverődve jut az M megfigyelő távcsőbe, a B-ből jövő fény O-n áttörve szintén M-be jut. A készülék O-n átmenő, a rajz síkjára merőleges tengely körül elforgatható (2. ábra).



2. ábra

A távcsőbe jutó két fénysugár különböző utakat fut be, tehát interferencia csíkoknak kell keletkezni. A rendszer O körüli negatív 90°-os elforgatása után az útkülönbségek megváltoznak, az előző interferencia csíkrendszer eltolódik. A Föld éterhez viszonyított sebességét az eltolódás mértékéből kell kiszámítani.

Helyezzük el a berendezést úgy, hogy l_1 kar abba az irányba mutasson, melyben a Föld a kísérlet idején a Nap körül halad. Az ellipszis kis görbülete miatt ez az irány hosszú ideig állandó marad. Ekkor a mérőeszköznek az éterhez viszonyított sebességére legalább a Föld Nap körüli sebességét kell kapnunk.

Jelöljük a Föld sebességét a nyugvó éterhez képest v-vel. A fény a v sebességgel mozgó l_1 karon $c - v$ sebességgel $t_1 = \frac{l_1}{c - v}$ ideig halad. Ezalatt az éterben megtett útja $c \cdot t_1 = \frac{c \cdot l_1}{c - v}$. A visszafelé haladó fény $c + v$ sebességgel halad az l_1 karon $t_2 = \frac{l_1}{c + v}$ ideig, az éterben megtett útja $c \cdot t_2 = \frac{c \cdot l_1}{c + v}$. Az l_1 karon oda-vissza futás alatt az éterben megtett teljes út

$$s_1 = c \cdot l_1 \left(\frac{1}{c - v} + \frac{1}{c + v} \right) = \frac{2 l_1}{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \qquad (1)$$

Az l_2 kar befutásánál azt kell látnunk, hogy a kar önmagával párhuzamosan tolódik el v sebességgel, így a fény útja az éterben egy „cikk-cakkos" vonal (3. ábra). Legyen t az az idő, amely alatt a fény az éterben az OB' utat megteszi. Ekkor

$$(c \cdot t)^2 = (v \cdot t)^2 + l_2^2,$$

melyből

$$t = \frac{l_2}{\sqrt{c^2 - v^2}}$$

és az út

$$c \cdot t = \frac{c \cdot l_2}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{l_2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

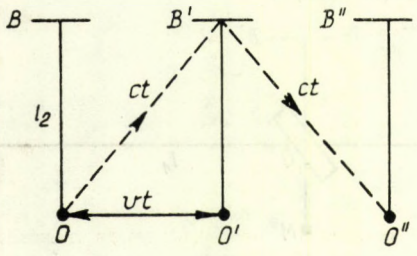
Az éterbeli oda-vissza út

$$s_2 = \frac{2 l_2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \qquad (2)$$

Az M pontba jutó fénysugarak útkülönbségének megállapításánál csak az l_1 és l_2 karokon létrejövő útkülönbségeket kell figyelembevenni, mert FO szakaszon és OM szakaszon együtthalad a két fénysugár. Így az útkülönbség (1) és (2) felhasználásával

$$s_1 - s_2 = \frac{2 l_1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} - \frac{2 l_2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \qquad (3)$$

Ha a mérőkészüléket 90°-kal úgy forgatjuk el, hogy l_2 essék a Föld keringési irányába, akkor az előző gondolatmenettel



3. ábra

$$s_1' - s_2' = \frac{2 l_1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - \frac{2 l_2}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \qquad (4)$$

adódik az útkülönbségre.

Mivel a két útkülönbség nem egyenlő, az elsőízben kirajzolódott interferenciacsík-rendszer megváltozik, eltolódás lesz.

A kísérletben azonban az a meglepő, hogy a várakozással ellentétben semmiféle eltolódás nem jelentkezik! Az 1887-ben elvégzett kísérletnek ezt az eredményét csak 18 évvel később, Einstein tudta megmagyarázni.

(Megjegyzés: A karok hosszát eleve nem lehet teljesen egyenlő hosszúságúra méretezni. Tehát e vélt egyenlő méretezés mellett is célszerű a rendszer fenti elforgatását végrehajtani, mert ezáltal a karok közti kicsiny eltérés is elveszti fontosságát.)

3. A Michelson kísérlet értelmezése

A kísérletnek nem várt negatív eredményét az alábbi módokon lehet magyarázni.

1. Földünk a világűrt kitöltő éterhez képest állandóan nyugalomban van. Ekkor $v = 0$, így $s_1 - s_2 = s_1' - s_2'$, tehát interferencia csíkokban eltolódás nem várható. Ez a lehetőség azonban elfogadhatatlan, hiszen Földünk az állócsillagokhoz képest többszörösen összetett mozgást végez, így elképzelhetetlen, hogy legyen egy kiválasztott koordinátarendszer melyben állandó jelleggel nyugalomban van.
2. A mozgás irányába eső hosszról tételezzük fel, hogy $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ arányban megrövidül. Így a (3) képletben l_1 helyett

$$l_1 \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}},$$

(4)-ben l_2 helyére

$$l_2 \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

írandó. A helyettesítést elvégezve

$$s_1 - s_2 = \frac{2 l_1 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 - \frac{v^2}{c^2}} - \frac{2 l_2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{2 l_1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - \frac{2 l_2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$s_1' - s_2' = \frac{2 l_1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - \frac{2 l_2 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{2 l_1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - \frac{2 l_2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Mivel a kétféle útkülönbség egyenlő, interferencia-csík eltolódást nem tapasztalhatunk.

Ezen feltételezést elfogadva a test mozgásirányú hosszának megrövidülése direkt méréssel nem is volna megállapítható, mert a testhez illesztett mérőrúd is megrövidülne. Elesünk tehát annak a lehetőségétől is, hogy a rövidülés mértékéből következtethessünk a test éterbeli sebességére. Ez a felfogás fizikai realitást tulajdonítana egy olyan közegnek, mely nem mutatható ki (az ezen pontban javasolt magyarázat Lorentztől ered).

3. Az Einstein által adott magyarázat szerint nincs vivőközeg, éter nem létezik, így a fény sebessége mindig ugyanakkora, függetlenül a mérőberendezés, a megfigyelő, vagy a fényforrás sebességétől. Ha ezt az álláspontot elfogadjuk, (1) és (2) összefüggések fel sem írhatók, fel sem lép $c - v$ és $c + v$, amelyek miatt az interferencia képek eltolódására lehetett számítani.

4. A speciális relativitás elméletének alapelvei

Láttuk, hogy a mechanikai jelenségek minden inerciarendszerben azonosan játszódnak le. Ismeretes, hogy az elektrodinamikai jelenségek olyan rendszerben játszódnak le azonosan, amelyben a fénysebesség iránytól függetlenül állandó. A Michelson kísérlet eredménye szerint ez a követelmény a Földhöz rögzített inerciarendszerben is érvényes, sőt minden egymáshoz képest egyenletes sebességgel mozgó inercia-rendszerek sokaságában is. Tehát inerciarendszerben az elektrodinamika törvényei is érvényesek, vagyis természetleírás szempontjából minden inerciarendszer egyenértékű. Ezen észrevétel következménye, hogy semmiféle kísérlettel nem lehet megállapítani, hogy egy megfigyelő inerciarendszere mozgásban van-e: nyugodtan tekintheti rendszerét nyugvónak is, hiszen semmiféle jelenség nem utal rendszerének mozgásállapotára.

A fentiek alapján a speciális relativitáselmélet a következő alapelvekre épül:

1. A relativitás elve: a természetben minden inerciarendszer egyenrangú, bármilyen fizikai jelenségről legyen szó.
2. A fénysebesség állandóságának elve: a fénysebesség minden inerciarendszerben iránytól függetlenül állandó.

Az elmélet azért kapta a „speciális" jelzőt, mert megállapításai inercia rendszerekre érvényesek.

Az a kijelentés, hogy az inerciarendszerek egyenértékűek, azt jelenti, hogy az „igazi" természettörvények minden inerciarendszerben azonos alakúak. Különben minden alaki különbség arra utalna, hogy a történés másképpen megy végbe. Ebből az következik, hogy az inerciarendszereket olyan transzformáció kapcsolhatja össze, amely a törvények alakját változatlanul hagyja, vagyis a törvényeknek a transzformációra nézve invariánsaknak kell lenniök.

A Galilei-transzformáció a mechanika törvényeit változatlan alakba viszi át, de az elektrodinamika egyenleteit megváltoztatja. Így:

1. vagy a Newton-egyenletek az igazi természettörvények és a Galilei-transzformáció fejezi ki a helyes kapcsolatot — ekkor pedig az elektrodinamikai egyenletek korrekcióra szorulnak
2. vagy az elektrodinamika törvényei az igazi törvények, s ekkor a Newton egyenletek és a Galilei-transzformáció módosítandók; viszont ezen esetben meg kell határozni azt a transzformációt, mely az elektrodinamikai egyenletek invarianciáját biztosítja s ugyanakkor a módosított Newton egyenleteket is változatlan alakba viszi át.

A Newton törvények korrekciójának kívánalma mellett szólnak az atomfizikai kísérleti eredmények, melyek a nagysebességű részecskék mozgásánál hoznak ki jelentős eltérést a mechanikai alaptörvényektől; Ugyanakkor a Maxwell-egyenletek a rádióhullámoktól a legrövidebb elektromágneses rezgésekig igen pontosan írják le a jelenségeket, tehát javításuk nem indokolt. Einstein úgy döntött, hogy az elektrodinamikai egyenleteket fogadja el, így tehát keresendő ezek változatlanságát biztosító transzformáció, valamint végrehajtandó a mechanikai törvények korrekciója.

A kérdéses transzformációt Lorentz találta meg.

(Megjegyzés: A relativitás alapelveiből kiindulva több, a józan ésszel ellenkező eredmény vezethető le. De mi is a józan ész szerepe a fizikában? Einstein szerint a kb. 18 évig összegyűjtött tapasztalatok alapján a józan ész segítségével következtetni tudunk még tény legesen nem látott, vagy végre nem hajtott kísérletekben. A józan ész kiváló vezető a mindennapos megfigyelések világában, de vajon elfogadható-e irányítónak pl. a nagyon nagy sebességek körében, amelyekre vonatkozólag nincsenek konkrét tapasztalataink? Itt a józan ész nem sok támpontot adhat. Nem kell tehát meglepődnünk, ha a mindennapi tapasztalatainkon kívüleső területeken olyan problémák merülnek fel, melyek ellen a józan ész tiltakozik: ha a helyesnek elfogadott fenti két alapelvből helyes matematikai eljárással kapunk eredményeket, azok realitását el kell fogadnunk!)

5. Mérési eljárások egymáshoz képest egyenletes mozgást végző koordinátarendszerek esetén

Mivel a Lorentz-transzformáció alapfeladata annak megállapítása, milyen összefüggés van egy bizonyos inerciarendszerben lezajló esemény itt mért hely és idő adatai, és ugyanezen eseménynek egy másik inerciarendszerből észlelt hely és idő adatai között, a következőkben meg kell tárgyalnunk néhány mérési eljárást.

A mérések lebonyolításához előre azonosan elkészített méterrudakra és azonos méretezés szerint készített órákra van szükség. Így bármelyik rendszer rendelkezhet azonos hossz és időegységekkel.

A mértékegységek és mérőeszközök birtokában ugyanazon rendszeren belül elvégzendő mérések nem jelentenek problémát. A nehézség akkor jelentkezik, amikor az egyik rendszerben lejátszódó esemény vagy tárgy adatait egy hozzá képest mozgó másik rendszerből kell megállapítani.

1. Az időadatok összehasonlítására minden rendszerbeli órát össze kell igazítani egy normál-órával, azonkívül a különböző rendszerek óráit is egymással össze kell igazítani.

Lehetne azt ajánlani, hogy egy meghatározott helyen valamennyi órát igazítsuk össze. Azonban az óráknak a megfelelő helyekre való széthordása csak gyorsulás útján lehetséges, ennek pedig az órák járására kifejtett esetleges hatásától eleve függetleníteni akarjuk magunkat. Hogy a nagy gyorsulások valóban befolyásolják az órák járását, köztudott: a leejtett óra meg is állhat. Éppen ezt elkerülendő, az órákat a fényjel felhasználásával szinkronizálják, minden mozgatás nélkül.

Legyen K rendszerben minden helyi órának az origótól vett r távolsága előre kimérve. A megfigyelők azt az utasítést kapják, hogy a kezdőpontból $t = 0$ időben kibocsátott fény felvillanásakor a megfigyelési helyükön levő órát $t = \frac{r}{c}$ időre állítsák. Így a K rendszerben minden óra egyforma időt mutat mindenkor, hiszen mindegyik annyival van későbbre állítva, mint amennyivel több időre van szüksége a fénynek egyik órától a másikig való eljutáshoz. Vagyis egységes rendszeridő létesül.

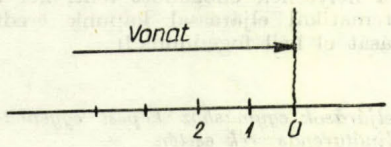
A K-hoz képest egyenletesen mozgó K' rendszer óráit is összehangolhatjuk az előző módon. Amikor a két origó egybeesik, a $t = 0$ időpillanatban fényjelet bocsátunk ki azzal, hogy mindegyik rendszerbeli megfigyelő az előre kimért r ill. r' megfigyelési helyén a fény észlelésekor óráját $t = \frac{r}{c}$ ill. $t' = \frac{r'}{c}$ időre állítsa. Mivel a tér egy kiválasztott helyén levő K ill. K' rendszerbeli megfigyelő saját origójától vett távolságai nem egyeznek, $r \neq r'$, így $t \neq t'$.

2. A fenti összeigazítással lehetővé válik bármely rendszeren belül az időtartamok mérése.

De lehetővé válik egy rendszer időtartamának egy másik rendszerből való megmérése is. A megfigyelőhöz képest mozgó rendszerbeli időtartam értékét a megfigyelő rendszeréből mérve mozgási időtartamnak nevezzük. Ez a következőképpen mérhető meg:

Tegyük fel, hogy pl. K'-ben egy rögzített helyen levő órán a mutató a 12-es számról az 1-esre megy — ez legyen az esemény. Amikor a mutató a 12-esen van, a K'-beli óra egy K-beli órával esik egybe, amely pl. t_1 időpillanatot jelez ekkor. Amikor a K'-beli óra mutatója az 1-es számra kerül, ezen esemény pillanata az egybeeső K-beli órán legyen t_2. A K'-beli esemény mozgási mérőszámának a $t_2 - t_1$ időtartamot nevezzük.

3. Hosszúságmérésekkel egyazon rendszeren belül nincs probléma. A nehézség a megfigyelőhöz képest mozgó rendszeren levő hosszúság lemérésekor jelentkezik. Az így mért hosszat a hosszúság mozgási mérőszámának nevezzük. A mérés kivitelezése a következőképpen történhet.



4. ábra

Gondoljunk arra, hogy pl. egy vasúti kocsi hosszát kell megmérni a töltésről. A töltésen álló megfigyelő a sín mentén mérőszalagot fektet végig a menetiránnyal szemben (4. ábra). A szalag mentén sűrűn megfigyelőket állít fel, szinkronizált órákkal. Ő maga a kocsi elejének elhaladási idejét jegyzi fel, a többiek a végének közvetlenül előttük való elhaladásának pillanatát. A végén a megfigyelő kiválasztja azon megfigyelőt, akinek időfeljegyzése megegyezik az ő saját megfigyelési időpillanatával. E két megfigyelőnek a töltésen lemért távolsága adja a kocsi hosszát, az ún. mozgási hosszát.

A fenti mérési eljárásoknál az időadatokat mindig az esemény helyén levő órákon olvastuk le, hogy a fény terjedéséből adódó korrekciókat ne kelljen figyelembevenni, vagyis a lehető legegyszerűbb mérési eljárásokat adtuk meg.

6. *A Lorentz-féle transzformáció*

Szükség van annak meghatározására, hogy ha a K rendszer $(x;\ y;\ z)$ helyén t időpillanatban történik egy esemény, akkor ezt K'-ben mely $(x';\ y';\ z')$ helyen és melyik t' időpillanatban észlelhetjük (és fordítva!).

A transzformáció olyan kell legyen, hogy az elektrodinamikai egyenletek invariánsak maradjanak hatására. Ez a követelmény más szóval azzal azonos, hogy olyan transzformációt kell keresni, mely a relativitáselmélet 4. pontbeli két alapelvének megfelel. A transzformációt a már következetesen használt speciális K és K' rendszer esetére fogjuk meghatározni.

Induljunk ki az órák szinkronizálásánál megismert tényből. A tér ugyanazon helyén levő két megfigyelő órája a K rendszerben $t = \frac{r}{c}$, a K' rendszerben $t' = \frac{r'}{c}$ időt mutat. Ha a megfigyelők csak a saját rendszerükkel törődnek, bármelyik úgy okoskodhat, hogy a fényjel az ő saját origójából indult ki s pillanatnyilag a gömbhullám hullámfrontjában ő naga tartózkodik. A c sebességgel terjedő hullámokra tehát egyik $x = c \cdot t$, a másik $x' = c \cdot t'$ (1) összefüggésekre jut.

(1) felírásában a fénysebesség állandóságának elve figyelembe van véve. De a relativitási elvet is tartalmazza, mert azonos alakú törvények írják le mindkét inercia rendszerben a fény terjedését. Így az a feladatunk, hogy az (1) egyenleteket egymásba átvivő transzformációt keressünk.

A transzformációs képletek direkt előállítása helyett gazdaságosabb, ha felírjuk az állítólagos transzformációs összefüggéseket és belátjuk, hogy azok az (1) alatti összefüggéseket egymásba viszik át.

A Lorentz-transzformáció képletei:

$$x' = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}(x - vt) \qquad x = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}(x' + vt')$$

$$y' = y \qquad (2) \qquad y = y'$$

$$z' = z \qquad z = z' \qquad (3)$$

$$t' = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\left(-\frac{v}{c^2}x + t\right) \qquad t = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\left(\frac{v}{c^2}x + t\right)$$

$$\left(\text{Szokásos még az } \alpha = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \text{ rövidítés bevezetése}\right).$$

Mivel a képletekben négyzetgyökös kifejezés is szerepel, célszerűbb az (1) egyenletcsoportot $x'^2 - c^2 \cdot t'^2 = 0$ ill. $x^2 - c^2 \cdot t^2 = 0$ alakba írni és ezeken belátni, hogy a Lorentz transzformációs képletek egymásba viszik át azokat.

$$x'^2 - c^2 \cdot t'^2 = \frac{1}{1-\frac{v^2}{c^2}}(x^2 - 2vt \cdot x + v^2t^2) -$$

$$- \frac{c^2}{1-\frac{v^2}{c^2}}\left(\frac{v^2}{c^4}x^2 - \frac{2vxt}{c^2} + t^2\right) = \frac{c^2}{c^2-v^2}x^2 - \frac{2c^2vx}{c^2-v^2} \cdot t +$$

$$+ \frac{v^2c^2}{c^2-v^2}t^2 - \frac{v^2}{c^2-v^2}x^2 + \frac{c^4}{c^2-v^2} \cdot \frac{2vx}{c^2}t - \frac{c^4}{c^2-v^2}t^2 =$$

$$= x^2 - c^2\left(\frac{c^2-v^2}{c^2-v^2}t^2\right) = x^2 - c^2t^2 = 0.$$

II. A speciális relativitáselmélet kinematikájának néhány eredménye

1. Távolságok nyugalmi és mozgási mérőszámának összehasonlítása

a) Mérjük meg a K rendszerből egy K'-beli szakasz hosszát, mely az x' tengelyen nyugszik. Az I/5. pontban ismertetett mérési eljárás szerint a szakasz végpontjaival egyazon t időpontban szembenálló K-beli megfigyelők x_1 és x_2 távolságadatai, valamint a t időpillanat a mérési adatok. Ezekből a K'-beli szakasz végpontjai

$$x_1' = \alpha(x_1 - vt)$$

$$x_2' = \alpha(x_2 - vt)$$

Ezekből $x_2' - x_1' = \alpha(x_2 - x_1)$ és $x_2 - x_1 = \frac{x_2' - x_1'}{\alpha}$.

Mivel $\alpha > 1$, a mozgási hossz kisebb, mint a nyugalmi hossz.

b) Hasonló eredményre jutunk, ha a K-beli x tengelyen fekvő szakasz hosszát K'-ből mérjük meg. Ekkor K'-ben mérési eredményeink x_1', x_2' és t'. Ezen adatokból kell a K-beli x_1 és x_2 értékét meghatározni.

Az inverz transzformációs képletek szerint

$$x_1 = \alpha(x_1' + vt')$$

$$x_2 = \alpha(x_2' + vt')$$

A megfelelő oldalak különbségét képezve

$x_2 - x_1 = \alpha(x_2' - x_1')$, melyből $x_2' - x_1' = \frac{x_2 - x_1}{\alpha}$.

Az eredmény ismét az, hogy a mozgási hossz a nyugalmi hossznál kisebb.

2. Időtartamok nyugalmi és mozgási mérőszámának összehasonlítása

a) Mérjük meg egy K'-beli esemény időtartamát egy K rendszerből. Az I/5. pontban leírt mérési eljárás szerint járunk el. Az esemény kezdő és végpontjának időadatai t_1' és t_2', a történés helye az x' tengelynek egy x' koordinátájú helye. Ugyanezen esemény kezdete és vége a K-beli órákon leolvasva t_1 és t_2.

$$t_1 = \alpha\left(\frac{v}{c^2}x' + t_1'\right)$$

$$t_2 = \alpha\left(\frac{v}{c^2}x' + t_2'\right).$$

A megfelelő oldalak kivonásával

$$t_2 - t_1 = \alpha(t_2' - t_1')$$

Mivel $\alpha > 1$, a mozgási mérőszám nagyobb a nyugalminál.

b) Hasonló eredményre jutunk, ha egy K-beli esemény időtartamát állapítjuk meg K'-ből.

Ekkor a K-beli esemény x helykoordinátájából, valamint a kezdetét és végét jelentő t_1 és t_2 adatokból kell a K'-beli időadatokat megállapítani. A transzformációs képletek szerint

$$t'_1 = \alpha\left(-\frac{v}{c^2} + t_1\right)$$

$$t'_2 = \alpha\left(-\frac{v}{c^2} + t_2\right)$$

A megfelelő oldalak kivonásával $t'_2 - t'_1 = \alpha(t_2 - t_1)$, melyből ismét az következik, hogy a mozgási mérőszám nagyobb a nyugalminál.

c) Az előzőkben az esemény egy rendszer rögzített helyén zajlott le és az észlelés egy másik rendszer két különböző helyén ment végbe. Vannak azonban olyan esetek is, amikor az esemény egy rendszer különböző helyein történő két egymásutáni jeladás, s az észlelés egy másik rendszer ugyanazon helyén történik, mégpedig akkor, amikor az utóbbi rendszerbeli észlelő az esemény kezdetének ill, végének helyével éppen szembenáll. Pl. a vasúti töltés rögzített helyén a pályaőr a vonat két különböző helyén leadott jelet észlel, amikor a jelzések helyei éppen vele szemben vannak (5. ábra) Történjék egy igen rövid jeladás a K'-beli x'_2 helyen t'_2 időpillanatban, melyet a K-beli megfigyelő x helyen t_2 időpontban észlel. Hasonlóan a K'-beli x'_1 helyen leadott rövid jeladás időpontja legyen K'-ben t'_1, melyet a K-beli x helyen levő megfigyelő t_1 időpontban észlel. A transzformációs képletek alapján

$$x = \alpha(x'_1 + vt'_1) \qquad t_1 = \alpha\left(\frac{v}{c^2}x'_1 + t'_1\right) \tag{1}$$

$$x = \alpha(x'_2 + vt'_2) \qquad t_2 = \alpha\left(\frac{v}{c^2}x'_2 + t'_2\right) \tag{2}$$

(2) és (1) megfelelő oldalainak kivonásával

$$t_2 - t_1 = \alpha\frac{v}{c^2}(x'_2 - x'_1) + \alpha(t'_2 - t'_1) \tag{3}$$

illetve

$$0 = \alpha(x'_2 - x'_1) + \alpha v(t'_2 - t'_1),$$

innen

$$x'_2 - x'_1 = -v(t'_2 - t'_1) \tag{4}$$

(4)-et (3)-ba helyettesítve

$$t_2 - t_1 = \alpha\frac{v}{c^2}[-v(t'_2 - t'_1)] + \alpha(t'_2 - t'_1) =$$

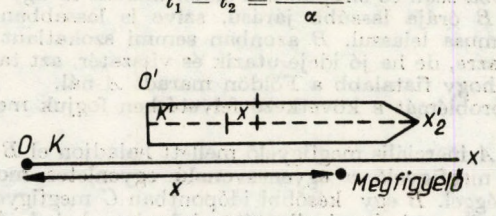
$$= -\alpha\frac{v^2}{c^2}(t'_2 - t'_1) + \alpha(t'_2 - t'_1) = (t'_2 - t'_1)\cdot\left(\alpha - \alpha\frac{v^2}{c^2}\right) =$$

$$= \alpha(t'_2 - t'_1)\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}\cdot(t'_2 - t'_1)\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}\times$$

$$\times\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{t'_2 - t'_1}{\alpha},$$

azaz

$$t_1 - t_2 = \frac{t'_1 - t'_2}{\alpha} \tag{5}$$



5. ábra

Mivel $\alpha > 1$, az időtartam mozgási mérőszáma a vázolt észlelés esetében kisebb, mint a nyugalmi mérőszám.

(Megjegyzés a II/1 és II/2 pontokkal kapcsolatban:

1. Nem szabad azt gondolnunk, hogy a mozgási hossz észlelésekor a mért szakasz hosszában tényleges megrövidülés lép fel. Ui. mérjük meg egy K-beli szakasz hosszát egy hozzá képest v_1 sebességgel mozgó K_1, ill. v_2 sebességgel mozgó K_2 rendszerből. A mozgási hosszra kétféle mérőszám adódik: a szakasz nem rövidülhet meg „ténylegesen" kétféle módon (esetleg még más észlelőrendszerek esetén többféleképpen!). Csupán arról van szó, hogy egy szakasz valódi hosszának kérdése értelmetlenné válik. Minden szakasz hosszának mérőszáma a sebesség függvénye és ez a mért hossz a mérést végző megfigyelő számára létező hosszúság, a „valódi" hossz.

2. Az időtartamok II/2/c pont szerinti mérése felvethető pl. a μ mezonnal kapcsolatban. Ui. a világűrből a Föld térségébe érkező mezont észlelhetik a sztratoszférába belépéskor fent, majd lent a felszínen. Ha az észlelés pillanatait egy-egy rövid jeladás kíséri, akkor ezen jeleket a mezonról figyelve (a jelenséget a mezonról értelmezve!) rövidebb tartamúaknak találjuk.)

3. Események sorrendje. Az ok–okozati viszony felcserélhető-e?

Legyen K-ban egy igen rövid esemény x_1 helyen t_1 időpontban, majd ez váltson ki egy másik eseményt az x_2 helyen t_2 időpontban. Legyen $x_2 > x_1$, így $t_2 > t_1$. K'-ben a megfelelő időpontok

$$t'_1 = \alpha\left(t_1 - \frac{vx_1}{c^2}\right)$$

$$t'_2 = \alpha\left(t_2 - \frac{vx_2}{c_2}\right)$$

Lehetséges-e, hogy $t'_1 > t'_2$ legyen? Ekkor teljesülnie kellene az alábbi egyenlőtlenségnek:

$$\alpha\left(t_1 - \frac{vx_1}{c_2}\right) > \alpha\left(t_2 - \frac{vx_2}{c^2}\right).$$

Ezt továbbalakítva

$$\left(t_1 - \frac{vx_1}{c^2}\right) > \left(t_2 - \frac{vx_2}{c^2}\right),$$

$$\frac{v}{c^2}(x_2 - x_1) > t_2 - t_1,$$

$$\frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} > \frac{c^2}{v}$$

teljesülne, ahol a baloldal a jel v_x terjedési sebessége. Így $v_x > \frac{c^2}{v} > \frac{c^2}{c} = c$, azaz $v_x > c$ lenne!

Azonban a transzformációs képletek — melyek inercia rendszerek között állapítanak meg összefüggéseket — $v > c$ esetben értelmetlenné válnak. Így az inercia rendszerbeli hatás sebessége nem lehet nagyobb a fény terjedési sebességénél.

Ekkor viszont az ok–okozati viszony sem cserélhető fel!

4. Események egyidejűségének kérdése

a) Játszódjék le K' rendszerben x'_1 és x'_2 helyen megegyező t' időpontban egy rövid esemény. Ezt K-ban x_1 és x_2 helyen észlelik t_1 és t_2 időpontokban. (Ha esetleg $t_1 = t_2$ lenne, ennek a levezetésből adódnia kell)

$$t_1 = \alpha\left(\frac{v}{c^2}x'_1 + t'\right)$$

$$t_2 = \alpha\left(\frac{v}{c^2}x'_2 + t'\right).$$

A megfelelő oldalakat kivonva

$$t_2 - t_1 = \alpha \frac{v}{c^2}(x_2' - x_1')$$

Mivel $x_2' - x_1' \neq 0$, így $t_2 - t_1 \neq 0$, tehát a két esemény nem egyidejű. Ha azonban az esemény K'-ben ugyanazon a helyen történik, akkor K-ban is egyidejű.

b) Ugyanezen eredményre jutunk, ha a fenti módon lezajló esemény K rendszerben történik és K'-ben végzünk észlelést. Ui. a K rendszer x_1 és x_2 helyén azonos (K-ban mért) t időpillanatban lezajló igen rövid esemény K'-beli észlelési időpillanatai legyenek t_1' és t_2'. (Ismét feltevés számba menne, ha ezeket egyenlőnek mondanánk ki előre!). A megfelelő transzformációs egyenletekkel

$$t_1' = \alpha\left(-\frac{v}{c^2}x_1 + t\right)$$

$$t_2' = \alpha\left(-\frac{v}{c^2}x_2 + t\right).$$

A megfelelő oldalakat kivonva

$$t_2' - t_1' = -\frac{v}{c^2}\alpha(x_2 - x_1).$$

Mivel $x_1 \neq x_2$, így $t_1' \neq t_2'$.

5. *A térköz. Időszerű és térszerű térköz*

Egy igen rövid eseményhez 3 tér-adat és 1 idő-adat tartozik. Szokás úgy mondani, hogy egy eseménynek 4 koordinátája van: 3 térbeli és 1 időbeli, azaz $x;\ y;\ z;$ t.

Ha egy rendszerben ismeretesek egy esemény kezdetének és végének adatai (nem pillanatnyi eseményről van szó!), ezen adatokat egy másik rendszerbeli megfigyelő az előzőektől eltérő értékűeknek fogja találni. Az esemény kezdő és végpontjának térbeli távolsága és időtartama egyaránt eltér az első rendszerben mért értéktől.

Éppen ezért meglepő, hogy ha bármelyik megfigyelő a saját mérési adataiból az alábbi kifejezést képezi:

$$(t_2 - t_1)^2 - \frac{1}{c^2}[(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2],$$

ill. az I/1 fejezetben alkalmazott speciális koordinátarendszer esetére

$$(t_2 - t_1)^2 - \frac{1}{c^2}(x_2 - x_1)^2, \qquad (1)$$

ennek értéke minden vonatkoztatási rendszerben egyenlő!

Állításunkat így láthatjuk be:

Képezzük a K'-beli mérési adatokból az (1) típusú kifejezést.

$$(t_2' - t_1')^2 - \frac{1}{c^2}(x_2' - x_1')^2$$

A transzformációs képletek alapján t_2', t_1', x_2', x_1' értékeit helyettesítve

$$\left[\alpha\left(-\frac{v}{c^2}x_2 + t_2\right) - \alpha\left(-\frac{v}{c^2}x_1 + t_1\right)\right]^2 - \frac{1}{c^2}[\alpha(x_2 - vt_2) -$$

$$-\alpha(x_1 - vt_1)]^2 = \alpha^2\left[-\frac{v}{c^2}(x_2 - x_1) + (t_2 - t_1)\right]^2 -$$

$$-\frac{\alpha^2}{c^2}[(x_2 - x_1) - v(t_2 - t_1)]^2 =$$

$$= \alpha^2\left[-\frac{v}{c^2}\Delta x + \Delta t\right]^2 - \frac{\alpha^2}{c^2}[\Delta x - v\Delta t]^2 =$$

$$= \alpha^2\left[\frac{v^2}{c^4}\Delta x^2 - \frac{2v}{c^2}\Delta x\Delta t + \Delta t^2\right] -$$

$$-\frac{\alpha^2}{c^2}[\Delta x^2 - 2v\Delta x\Delta t + v^2\Delta t^2] = \frac{\alpha^2 v^2}{c^4}\Delta x^2 - \frac{2v}{c^2}\alpha^2\Delta x\Delta t +$$

$$+\alpha^2\Delta t^2 - \frac{\alpha^2}{c^2}\Delta x^2 + \frac{2\alpha^2 v\Delta x\Delta t}{c^2} - \frac{\alpha^2 v^2}{c^2}\Delta t^2 =$$

$$= \Delta x^2\left(\frac{\alpha^2 v^2}{c^4} - \frac{\alpha^2}{c^2}\right) + \Delta t^2\left(\alpha^2 - \frac{\alpha^2 v^2}{c^2}\right) =$$

$$= \frac{1}{c^2}\Delta x\left(\frac{\alpha^2 v^2}{c^2} - \alpha^2\right) + \Delta t^2\alpha^2\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) =$$

$$= \frac{1}{c^2}\Delta x^2\alpha^2\left(\frac{v^2}{c^2} - 1\right) + \Delta t^2\alpha^2\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) =$$

$$= \frac{1}{c^2}\Delta x^2\frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}}\left[-\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)\right] + \Delta t^2\frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \times$$

$$\times\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) = -\frac{1}{c^2}\Delta x^2 + \Delta t^2 = (t_2 - t_1)^2 - \frac{1}{c^2}(x_2 - x_1)^2.$$

Vagyis a

$$(t_2' - t_1')^2 - \frac{1}{c^2}(x_2' - x_1')^2 = (t_2 - t_1)^2 - \frac{1}{c^2}(x_2 - x_1)^2.$$

Az (1) kifejezést térköznek nevezzük. Ha benne $(t_2 - t_1)^2 > \frac{1}{c^2}(x_2 - x_1)^2$, a térközt időszerűnek, ha $(t_2 - t_1)^2 < \frac{1}{c^2}(x_2 - x_1)^2$ térszerűnek nevezzük.

Ha $(t_2 - t_1)^2 = \frac{1}{c^2}(x_2 - x_1)^2$ azaz $x_2 - x_1 = c(t_2 - t_1)$, tehát a hatás fénysebességgel terjed: a térköz fényszerű.

Jelöljük az időszerű térközt τ^2-tel:

$$\tau^2 = (t_2 - t_1)^2 - \frac{1}{c^2}(x^2 - x_1) \qquad (2)$$

Ha egy jelenség a K rendszer azonos helyén játszódik le, akkor

$$\tau^2 = (t_2 - t_1)^2, \text{ mivel } x_2 - x_1 = 0.$$

Tehát most τ azt az időtartamot jelenti, melyet a jelenség lejátszódásának helyén levő órán olvasunk le. Ezt az időtartamot sajátidőnek nevezzük. Ezt az időtartamot érezzük „valódinak". A τ^2 invarianciája miatt azonban bármelyik megfigyelő számítja ki saját mérési adataiból az (1) típusú kifejezést, ugyanezt az eredményt kapja. Vagyis amikor a különböző megfigyelők egy jelenség időtartamára különböző értékeket mérnek, létezik egy szabványos mennyiség, melyet egyetlen megfigyelő sem tud közvetlenül megmérni, de saját mérési adataiból ki tud számítani: ez a sajátidő.

A II/2/a fejezet szerint a K'-ben ugyanazon helyen lezajló jelenségre $t_2 - t_1 = \alpha(t_2' - t_1')$, melyben értelmezésünk szerint $t_2' - t_1' = \tau$, $t_2 - t_1 = t$ pedig a sajátidőnek egy más megfigyelési rendszerből észlelt tartama, Így tehát

$$t = \alpha\tau \text{ és } \tau = \frac{1}{\alpha}t = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}\,t \qquad (3)$$

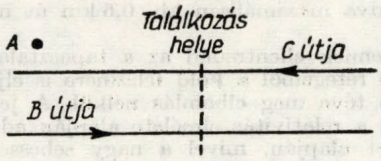
6. *Az ikerparadoxon*

Az iker-vagy óraparadoxonnak nevezett probléma a következő:

Két testvér közül A a Földön marad, B nagy sebességű űrhajóba száll és elrepül. A Földön maradt A úgy látja, hogy B órája lassúbb járású, szíve is lassabban ver, életritmusa lelassul. B azonban semmi szokatlant nem vesz észre, de ha jó ideje utazik és visszatér, azt tapasztalja, hogy fiatalabb a Földön maradt A-nál.

E problémát a következő felvetésben fogjuk megtárgyalni.

Az A inerciális megfigyelő mellett haladjon el B inerciális megfigyelő v egyenesvonalú egyenletes mozgási sebességgel. B egy későbbi időpontban C megfigyelővel találkozik, aki B-vel ellentétes irányban halad A felé



6. ábra

v sebességgel (6. ábra). Mindhárom megfigyelő azonos szerkezetű órákkal rendelkezik. A-nál A és B az óráikat $t = 0$ időre állítják, majd C — a B-vel való találkozás pillanatában — óráját a B által mutatott időre állítja. Kérdés, hogy C órája az A-val való találkozáskor ugyanazt az időt mutatja-e, mint A órája?

A válasz többféle úton is adódik. Ezek közül gondoljunk végig kétféle megoldást. Egyik a transzformációs képletekre támaszodik, a másik pedig egy „elemi" megoldás, mely csak a relativitáselmélet két alapelvének ismeretét igényli.

a) megoldás.

A II/5 fejezet (3) képlete szerint $\tau = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \cdot t$.

Ha tehát B utas szerint az űrhajó rendszerében τ idő (sajátidő, mert az űrhajó rendszerében azonos helyen mért érték!) telt el, ez az A megfigyelő inerciarendszerében t időtartamot jelent. Ugyanez mondható a C űrhajós rendszerében észlelt ugyancsak τ időtartamról is az A által észlelt időhöz viszonyítva, mivel B és C teljesen szimmetrikus szerepet tölt be egymáshoz képest. Így B elindulása és C megérkezése között 2τ idő telt el C órája szerint, ill. $2t$ idő A órája szerint. Mivel

$$\tau = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \cdot t,$$

$$2\tau = 2t\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \qquad (1)$$

Ha B és C megfigyelők útját egyetlen megfigyelővel járatjuk be az A-tól való elindulástól az ide visszaérkezésig, az ikerparadoxon megoldása áll előttünk egy speciális mozgás esetén. Ui. ez a mozgás nem teljesen azonos a két megfigyelővel elgondolt mozgással, mert míg utóbbi esetben B és C inerciális megfigyelők voltak, a teljes utat egyedül bejáró megfigyelő már nem inerciális lesz: a sebességváltozások induláskor, visszafordításkor gyorsulást eredményeznek. Azonban, ha a gyorsulásokat igen rövid időtartamokra korlátozzuk az utazás teljes idejéhez viszonyítva, akkor (1) eredményünk jó közelítéssel alkalmazható. Eszerint a Földön maradt megfigyelő többet öregszik, mint az űrutazásban résztvevő ikertestvére. ($2t > 2\tau$!)

b) megoldás.

Legyen az A és B inerciális megfigyelők azonosan járó óráiknak kettyenési időtartamai h értékűek. Ha A az órájának minden kettyenésekor rövid fényjelet bocsát ki, B azt találja, hogy a beérkező jelek időköze nem azonos az ő órájának kettyenési időtartamaival. Ui. ha pl. B közvetlenül A mellett észleli az egyik fényjelet, a következőt a kettyenés után annyival később észleli, mint amennyi időre a fénynek szüksége van ahhoz, hogy elérje az előle „elfutó" B-t. Vagyis a beérkező jelek időtartama $k \cdot h$ lesz, ahol k egy 1-nél nagyobb szorzó, tényleges értéke most számunkra nem lényeges.

Ha az A-tól távolodó B egy olyan C megfigyelőhöz közeledne, aki A-hoz képest nyugszik, és az A-tól kapott fényjeleket késedelem nélkül C felé továbbítaná, akkor C számára a jelenség olyan lenne, mintha A jeleit közvetlenül észlelné: a B által kibocsátott jelek időtartamát C az A jel-tartamaival egyezőnek, h értékűnek találná. Azonban B egy-egy jelének tartama $k \cdot h$, így C k-szor rövidebb tartamú jeleket észlelne.

Vagyis: egy fényforrás h tartamú jeleit egy tőle távolodó inerciális megfigyelő k-szor hosszabbnak, egy hozzá az előző sebességgel közeledő megfigyelő k-szor rövidebbnek észleli (Ui. az 1. alapelv szerint B-t is tekinthetjük nyugvónak, amikor tehát C közeledik B felé és B $k \cdot h$ tartamú jeleit h hosszúságúaknak észleli).

Ezek előrebocsátása után tárgyaljuk meg az ikerparadoxon kérdését az említett A, B, C megfigyelők fentebb vázolt mozgásának elemzésével.

Legyen C megérkezése A-hoz az A óráján leolvasva $2t$. Ekkor A órája állása szerint okoskodva B és C találkozásáig t idő telt el, mivel B és C két szimmetrikus megfigyelő. Ha B az órájának minden kettyenésekor lead egy fényjelet, A szerint B első és utolsó jelének észlelése között

$$t + \frac{vt}{c} \qquad (2)$$

idő telt el, mivel B az utolsó jelet t-kor bocsátotta ki, de ennek $v \cdot t$ távolságból A-ba kellett érkeznie $\frac{v \cdot t}{c}$ idő alatt.

Ha C megérkezését A-hoz a C óráján leolvasva 2τ-nak tételezzük fel (feltevés számba menne, ha 2τ tartamát $2t$-vel eleve azonosnak vennénk), B és C szimmetrikus volta miatt B órája a találkozás pillanatában τ időt mutatott. Mivel B órájának ketyegési időtartama h, így $\frac{\tau}{h}$ alkalommal ketyegett, ill. ennyi számú jelet sugárzott ki. Mivel A a távolodó B jeleit k-szor hosszabbnak találja, egy jel tartama szerinte $k \cdot h$, így a $\frac{\tau}{h}$ számú jelé

$$k \cdot h \cdot \frac{\tau}{h} = k\tau. \qquad (3)$$

Mivel (2) és (3) egyaránt azt az időtartamot jelenti, amely alatt A veszi a B jeleit, az alábbi egyenlőség adódik:

$$t + \frac{v \cdot t}{c} = k \cdot \tau. \qquad (4)$$

Nézzük most, hogy A mennyi időn keresztül észleli C jelzéseit!

C első jelzése (egyben B utolsó jelzése) A órája szerint okoskodva $t + \frac{v \cdot t}{c}$ időpillanatban ért A-ba, utolsó jelzése $2t$ időpontban. E két jelzés között eltelt idő

$$2t - \left(t + \frac{v \cdot t}{c}\right) = t - \frac{vt}{c}. \qquad (5)$$

Ha A a C órája állása szerint okoskodik, akkor — mivel C τ ideig bocsátott ki jeleket — C közeledése miatt C h tartalmú jeleit $\frac{h}{k}$ hosszúságúaknak észleli. A kisugárzott jelek száma $\frac{\tau}{h}$, így a teljes jel-továbbítási időtartam

$$\frac{\tau}{h} \cdot \frac{h}{k} = \frac{\tau}{k}. \qquad (6)$$

Mivel (5) és (6) egyaránt azt az időt jelenti, amely alatt A a C jelzéseit észleli, a következő egyenlőség írható fel:

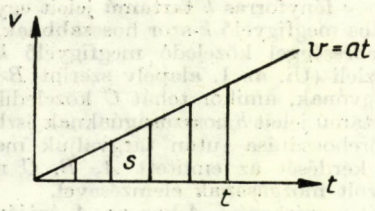
$$t - \frac{vt}{c} = \frac{\tau}{k} \qquad (7)$$

(4) és (7) megfelelő oldalainak összeszorzásával

$$t^2 \cdot \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) = \tau^2, \quad \text{majd} \quad \tau = t\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}, \quad \text{s végül}$$

$$2\tau = 2t\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \qquad (8)$$

adódik, mely megegyezik (1) eredménnyel.



7. ábra

Levezetésünkben az inerciarendszerek egyenértékűségének elvét használtuk fel, amikor B és C megfigyelők szimmetrikus szerepét vettük figyelembe, továbbá a fénysebesség állandóságának elvét, amikor a megfigyelők fényjeleinek terjedési sebességét — saját v sebességüktől függetlenül — c-nek vettük.

*

Levezetéseink eredménye alapján jogosan vetődik fel a kérdés, hogy az inerciarendszerek egyenértékűségének elve alapján miért nem azt tapasztaljuk, hogy a Földön maradt iker a fiatalabb? Ennek oka az, hogy a két iker vonatkoztatási rendszerei nem egyenértékűek, mert az űrhajós rendszere gyorsuló rendszer. A gyorsulás pedig már megkülönbözteti egymástól az egyes rendszereket. (pl. induló vagy megálló vonatban a csomagok megmozdulnak, vagyis a mozgás jellege belső megfigyelésekkel is megállapítható). (8) eredményünk szerint tehát a tehetetlenségi mozgások azok, amelyek jobban „öregítenek".

Eredményeink szemléltetésére álljon itt az alábbi táblázat, mely $2t = 20$ év időtartamot feltételezve megadja a tárgyalt speciális mozgás esetére azt az időkülönbözetet, amennyivel az űrutas fiatalabb marad a Földön maradó társánál, valamint az ezen időkülönbséget okozó sebességgel elérhető távolságot $2t = 20$ év alatt.

v km/s	v/c	időkülönbözet	elérhető távolság
1 600	0,0054	2 óra 32 perc	20 fénynap
16 000	0,054	10,6 nap	0,54 fényév
150 000	0,5	2 év 8 hónap	5 fényév, azaz túl a legközelebbi csillagon
240 000	0,8	8 év	8 fényév

Eredményeinket a kis időtartamra korlátozott nagy gyorsulások miatt nem alkalmazhatjuk az emberre. Bármilyen legyen azonban a gyorsulás, az űrhajós érezni fogja ennek tényét. Éppen ezért nem szabad meglepődnie, ha visszatérve kevesebbet öregedett, mint itthon maradt testvére. Mint ahogy egy kanyargós utat befutó autós sem lepődik meg azon, hogy a megtett kilométerek száma nagyobb nála, mint azon társánál, aki egyenes pályán haladt. Két ember, aki különböző eseményeket élt át, azok következményeit is eltérő módon viseli el. Valójában tehát esetünkben nincs szó paradoxonról.

Az ikerparadoxonnal kapcsolatos eredményünket az egyes megfigyelők óráinak jelzései alapján mondtuk ki. Kérdés azonban, hogy az emberi szervezet is hasonlóan reagálna-e, mint a két iker órája?

Minden óra valamilyen fizikai folyamaton alapszik, annak ütemét jelzi. Ha feltennénk, hogy pl. egy rugós óra és a mellette levő élőlény folyamatai, életfunkciói nem egyformán lassulnának le, akkor az űrhajós a két „óra" közti eltérésből meghatározhatná az űrhajó sebességét csupán belső kísérlettel. Ez pedig ellentmondana a relativitáselmélet 1. alapelvének, mely az inerciarendszerek egyenértékűségét mondja ki.

A mozgással lassuló idő, tényleges megfigyelésére jó példát szolgáltatnak a μ mezonoknak nevezett elemi részecskék. Ezek átlagosan $2{,}15 \cdot 10^{-6}$ s ideig léteznek, majd elbomlanak. Élettartamuk alatt közel fénysebességgel haladva maximálisan kb. 0,6 km út megtételére képesek.

Viszont ennek ellentmond az a tapasztalat, hogy a légkör felső rétegeiből a Föld felszínére is eljutnak kb. 20 km utat téve meg elbomlás nélkül. A jelenségre a magyarázat a relativitás elmélete alapján adható meg: (8) képlet alapján, mivel a nagy sebességű mezon élettartama $\tau = 2{,}15 \cdot 10^{-6}$ s és sebessége $v = 299\,865$ km/s, t-re $66{,}8 \cdot 10^{-6}$ s adódik. Ennyi idő alatt 20,3 km út megtételére is képes, tehát még elbomlás előtt átér a légkörön.

Az ikerparadoxon közvetlen megfigyelésére is van ma már lehetőség. Ui. az ikrek szerepét betöltheti két atom is, pl. két vas atom. Két vas kristály esetén, melyek hőmérséklete eltérő, így az atomok hőmozgási átlagsebessége is különbözik, a kisugárzott fotonok frekvenciájában olyan jellegű eltérés mutatkozik, hogy a gyorsabb mozgású kristály atomjainak kisugárzott fényében a frekvencia lecsökken: azaz kevesebb rezgés, kevesebb „óra kettyenés" kevesebb öregedés mutatható ki.

7. Relativisztikus sebesség összetevés

Tegyük fel, hogy egy test az x' tengely irányában (a K' rendszer v sebességének irányában) x'_1-től x'_2-ig egyenletes mozgást végez $t'_2 - t'_1$ idő alatt. Ekkor sebessége K'-ben

$$v'_x = \frac{x'_2 - x'_1}{t'_2 - t'_1}. \tag{1}$$

Kérdés, K-ban mekkorának mérik ezt a sebességet? A klasszikus felfogás szerint nyilván $v_x = v'_x + v$. A relativitáselmélet azonban más eredményt ad!

Legyen az x'_1, x'_2, t'_1, t'_2 adatok K-ban mért értéke sorrendben x_1, x_2, t_1, t_2.

Ekkor a sebesség K-ban

$$v_x = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \frac{\alpha(x'_2 + vt'_2) - \alpha(x'_1 + vt'_1)}{\alpha\left(\frac{v}{c^2}x'_2 + t'_2\right) - \alpha\left(\frac{v}{c^2}x'_1 + t'_1\right)} =$$

$$= \frac{x'_2 - x'_1 + v(t'_2 - t'_1)}{\frac{v}{c^2}(x'_2 - x'_1) + (t'_2 - t'_1)} = \frac{\frac{x'_2 - x'_1}{t'_2 - t'_1} + v}{\frac{v(x'_2 - x'_1)}{c^2(t'_2 - t'_1)} + 1} = \tag{2}$$

$$= \frac{v'_x + v}{1 + \frac{v'_x v}{c^2}} \quad \text{azaz} \quad v_x = \frac{v'_x + v}{1 + \frac{v'_x v}{c^2}}.$$

Ez a törvény különös következménnyel jár. Ui. legyen az anyagi pont sebessége K'-ben $v'_x = c$. Ekkor azt várnánk, hogy a K-ból mért sebesség $v_x = c + v$, azaz túllépi a fénysebességet. A (2) képletet alkalmazva

$$v_x = \frac{c + v}{1 + \frac{cv}{c^2}} = \frac{c^2(c + v)}{c^2 + cv} = \frac{v^2(c + v)}{c(c + v)} = c,$$

vagyis a fénysebesség semmiféle sebességösszetevéssel nem növelhető.

III. A speciális relativitás elméletének dinamikája

1. Általános megjegyzések a relativisztikus dinamikával kapcsolatban

A relativitás elmélet dinamikájának az a feladata, hogy a mozgástörvényeket olyan formában fogalmazza meg, mely a Lorentz transzformációval szemben invariáns marad.

A Newton féle első törvényt, a tehetetlenség törvényét természetesen a relativitás elméletében is elfogadjuk, hiszen ezzel definiáltuk az inercia rendszereket.

A Newton féle második törvényről az I/1. fejezetben kiderült, hogy Galilei transzformációval szemben in-

variáns, amiből egyúttal az is következik, hogy a Lorentz transzformáció megváltoztatja alakját. Ezért a törvény a relativitás elmélet szempontjából nem fogadható el igazi természettörvénynek, módosításra szorul. Ha azonban e törvény eredeti Newton féle megfogalmazást fogadjuk el, mely szerint az erő a mozgásmennyiség időegységre eső megváltozása, azaz

$$F = \frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t}, \qquad (1)$$

megfelelő egyenletet kapunk. Az $I = \mathrm{m} \cdot v$ képlet azonban átértékelendő: a tömeg nem a klasszikus fizika állandó tömege, hanem sebességfüggést mutat (l. III/2. fejezet).

Ugyancsak elfogadjuk a Newton féle harmadik törvényt, a hatás–ellenhatás törvényét.

Elfogadunk továbbá a relativisztikus dinamikában is bizonyos, a klasszikus dinamikában szereplő megmaradási törvényeket. Így pl. zárt rendszerre a mozgásmennyiség megmaradásának törvényét, a tömegmegmaradás törvényét, továbbá a munka-tételt, mely szerint az erő munkája a kinetikai energia megváltozásával egyenlő vagy más szóval: a kinetikai energia időegységre eső megváltozása az erő munkájának időegységre eső változásával egyenlő:

$$\frac{\mathrm{dW}}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}(F \cdot s)}{\mathrm{d}t} = F \cdot \frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t} = F \cdot v \qquad (2)$$

állandó erő esetén, ha az erő a sebesség irányába hat.

2. A tömeg sebességfüggése

A K' rendszer x' tengelye mentén két egyenlő m' tömegű test mozog egymással szemben V' és $-V'$ sebességgel, majd rugalmatlanul ütköznek.

K-ban az első golyó sebessége II/7 fejezet szerint

$$V_1 = \frac{V' + v}{1 + \frac{V'v}{c^2}} \quad (1) \qquad \text{ill.} \qquad V_2 = \frac{-V' + v}{1 - \frac{V'v}{c^2}} \quad (2)$$

Külön feltevésszámba menne, ha a tömegeket K-ban egyenlőknek tekintenénk, így legyen a két golyó tömege m_1 ill. m_2 (ha egyenlők, a végeredménynek ezt tükröznie kell!)

A tömeg és mozgásmennyiség megmaradásának törvényeit K-ban felírva

$$m_1 + m_2 = \text{állandó} \qquad (3)$$

$$m_1 V_1 + m_2 V_2 = (m_1 + m_2) v \qquad (4)$$

(4)-ben a jobboldalon azért szerepel v, mert ütközés után a testek K'-ben nyugalomba jutnak, így haladási sebességül K-ban K és K' kölcsönös haladási sebessége. (ui. K'-ben egyenlő tömegek egyenlő nagy, de ellentétes értelmű sebességekkel ütköznek).

(1) és (2) értékeit (4)-be írva

$$m_1 \frac{V' + v}{1 + \frac{V'v}{c^2}} + m_2 \frac{-V + v}{1 - \frac{V'v}{c^2}} = (m_1 + m_2)\, v$$

$$m_1 \left(\frac{V' + v}{1 + \frac{V'v}{c^2}} - v \right) = m_2 \left(v - \frac{-V' + v}{1 - \frac{V'v}{c^2}} \right), \quad \text{ebből}$$

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{v - \frac{-V' + v}{1 - \frac{V'v}{c^2}}}{\frac{V' + v}{1 + \frac{V'v}{c^2}} - v} = \frac{v - \frac{-V'v^2}{c^2} + V' - v}{1 - \frac{V'v}{c^2}} = \frac{V' + v - v - \frac{V'v^2}{c^2}}{1 + \frac{V'v}{c^2}} =$$

$$= \frac{V'\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) : \left(1 - \frac{V'v}{c^2}\right)}{V'\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) : \left(1 + \frac{V'v}{c^2}\right)} = \frac{1 + \frac{V'v}{c^2}}{1 - \frac{V'v}{c^2}}, \text{ azaz}$$

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{1 + \frac{V'v}{c^2}}{1 - \frac{V'v}{c^2}} \qquad (5)$$

(5) jobboldalát alakítsuk át a következőképpen:

$$\sqrt{1 - \frac{V_1^2}{c^2}} = \sqrt{\frac{c^2 - \left(\frac{V' + v}{1 + V'v/c^2}\right)^2}{c^2}} =$$

$$= \sqrt{\frac{c^2 - \frac{V'^2 + 2V'v + v^2}{\left(1 + \frac{V'v}{c^2}\right)^2}}{c^2}} = \sqrt{1 - \frac{\frac{V'^2}{c^2} + \frac{2V'v}{c^2} + \frac{v^2}{c^2}}{\left(1 + \frac{V'v}{c^2}\right)^2}} =$$

$$= \sqrt{\frac{1 + \frac{2V'v}{c^2} + \frac{V'^2v^2}{c^4} - \frac{V'^2}{c^2} - \frac{2V'v}{c^2} - \frac{v^2}{c^2}}{\left(1 + \frac{V'v}{c^2}\right)^2}} =$$

$$= \frac{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2} - \frac{V'^2}{c^2} + \frac{V'^2v^2}{c^4}}}{1 + \frac{V'v}{c^2}} = \frac{\sqrt{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)\left(1 - \frac{V'^2}{c^2}\right)}}{1 + \frac{V'v}{c^2}}.$$

Hasonló állítható elő $\sqrt{1 - \frac{V_2^2}{c^2}}$ is.

Tehát

$$\sqrt{1 - \frac{V_1^2}{c^2}} = \frac{\sqrt{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)\left(1 - \frac{V'^2}{c^2}\right)}}{1 + \frac{V'v}{c^2}} \qquad (6)$$

$$\sqrt{1 - \frac{V_2^2}{c^2}} = \frac{\sqrt{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)\left(1 - \frac{V'^2}{c^2}\right)}}{1 - \frac{V'v}{c^2}} \qquad (7)$$

(7)-et (6)-tal osztva

$$\frac{\sqrt{1 - \frac{V_2^2}{c^2}}}{\sqrt{1 - \frac{V_1^2}{c^2}}} = \frac{1 + \frac{V'v}{c^2}}{1 - \frac{V'v}{c^2}}. \qquad (8)$$

Mivel (5) és (8) jobboldala azonos, így a baloldalak egyenlítésével

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{\sqrt{1 - \frac{V_2^2}{c^2}}}{\sqrt{1 - \frac{V_1^2}{c^2}}}. \qquad (9)$$

A (9)-nek megfelelő m_1 és m_2 a következő alakba írható:

$$m_1 = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{V_1^2}{c^2}}} \quad \text{és} \quad m_2 = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{V_2^2}{c^2}}} \qquad (10)$$

m_0 jelentése a következő.

Ha az 1. golyó K rendszerben nyugalomban van, $V_1 = 0$, így $m_0 = m_1$.

Tehát m_0 egy test nyugalmi tömege. Vagyis a tehetetlen tömeg sebességfüggést mutat, nagy sebesség esetén

sokszorosan felülmúlhatja a nyugalmi tömeget. A fénysebességgel mozgó test tömege végtelen nagy lenne, így is kifejezve azt, hogy a fénysebesség a határsebesség szerepét tölti be inerciarendszerben.

Összefoglalva: a v sebességgel mozgó test tömege a relativitás elmélet szerint

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \tag{11}$$

3. A mozgó test energiája

A III./2 fejezet (11) képletének átalakításával

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$m^2 = \frac{m_0^2}{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$m^2\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) = m_0^2$$

$$m^2 \frac{c^2 - v^2}{c^2} = m_0^2$$

$$m^2c^2 - m^2v^2 = m_0^2c^2$$

$$m^2c^2 = m^2v^2 + m_0^2c^2.$$

Deriváljuk mindkét oldalt a t idő szerint (m a sebességtől függ, a sebesség pedig az időtől!).

$$\frac{d(m^2c^2)}{dt} = \frac{d(m^2\,v^2)}{dt}$$

mivel $m_0^2c^2$ állandó.

$$\frac{d(mc)^2}{dt} = \frac{d(mv)^2}{dt}.$$

A szorzat és közvetett függvény deriválási szabálya szerint

$$2\,mc\frac{d(mc)}{dt} = 2\,mv\frac{d(mv)}{dt}$$

$$\frac{d(mc^2)}{dt} = v\frac{d(mv)}{dt}$$

melyből $\frac{d(mc^2)}{dt} = v \cdot \frac{dI}{dt} = v \cdot F$ (1)

Eredményünket a III/1 fejezet (2) képletével összevetve $W = m \cdot c^2$, vagy m értékét III/2 fejezet (11) képletből beírva

$$W = \frac{m_0c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \tag{2}$$

A képletből megállapítható, hogy $v = 0$ esetben is van a testnek $W_0 = m_0c^2$ energiája, az ún. nyugalmi energia. A gyorsító erő hatására nő a test sebessége, ezzel együtt tömege is, így az $m \cdot c^2$ szerint az energiája is.

(Megjegyzés: A felsőbb matematika sorbafejtési eljárásával

$$m \cdot c^2 = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}c^2 = m_0\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}} \cdot c^2 = m_0c^2 \times$$

$$\times \left(1 + \frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2} + \ldots\right) = m_0c^2 + \frac{1}{2}m_0v^2 + \ldots,$$

ahol a pontozott rész gyakorlatilag elhanyagolható járulékot jelent kis sebességek esetén. Ekkor a teljes energia a nyugalmi és a szokásos mozgási energia összege.)

(2)-ben a mozgási energia

$$W_{\text{Kin.}} = \frac{m_0c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - m_0c^2. \tag{3}$$

Ha egy test energiát vesz fel, ez tömegnövekedéssel is jár (2) szerint, az energia kisugárzás pedig tömegcsökkenéssel. A tömeggyarapodást nem szabad úgy elképzelnünk, hogy atomok vagy elektronok érkezbek a testbe. A tömeggyarapodás közben az atomok darabszáma ugyanannyi marad. Mindazon atomok tömege növekszik egy kicsit, amelyek részesek voltak az energia felvételében. A tömeg és energia együttes megjelenése ill, távozása cáfolja azt az idealista felfogást, hogy a tömeg „általakul" energiává és fordítva. Ha a tömeg eltűnik valahonnan, akkor mc^2 energia is eltávozik; ahol pedig W energia megjelent, ott $\frac{W}{c^2}$ tömeg is megjelent. Mivel a tömeg a tehetetlenség mértéke és mivel az energiának tehetetlen tömege is van, az energia gravitációs erőt is képes kifejteni, mint a szokványos tömegek.

4. Állandó erő hatására bekövetkező mozgás törvényei

Ha a K rendszer x tengelyének pozitív irányában ható állandó erő hatására mozgás létesül, a klasszikus fizika szerint $s = \frac{a}{2}t^2$ és $v = at$ képletek írják le a mozgást, ahol $a = \frac{F}{m}$. A relativista dinamika szerint nem számolhatunk a fenti képletekkel, mert hosszabb időn át a sebesség túlléphetné a fénysebességet, ami lehetetlen.

Valójában az történik, hogy a sebesség növekedésével a tömeg is növekedik, így a változatlan erő egyre kisebb gyorsulást okoz, s amint látni fogjuk a következőkben, nem jutunk ellentmondásra a határsebességgel.

A Newton féle II. törvényt a III./1 fejezet (1) képlete szerint vesszük érvényesnek:

$$\frac{d(m\,v)}{dt} = F \tag{1}$$

A mozgató erő kezdetben az m_0 nyugalmi tömegen létrehoz egy $a_0 = \frac{F}{m_0}$ gyorsulást (a képlet kis sebességek esetén jó közelítéssel alkalmazható!) A továbbiakban az $F = m_0a_0$ erő nagyságát és irányát tartsuk változatlannak. Ez pl. úgy érhető el, hogy az űrhajóban rugós erőmérőre akasztunk egy testet és mindig annyi üzemanyagot adagolunk, hogy az erőmérő azonos kitérést mutasson. Ennél a mozgásnál természetesen a gyorsulás nem lesz állandó, a test nem egyenletesen gyorsul.

a. A $v(t)$ függvény

(1)-et a jelenlegi esetre alkalmazva

$$\frac{d}{dt}\frac{m_0v(t)}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = m_0a_0$$

Ha egy kifejezés deriváltja m_0a_0 állandó, a kifejezés m_0a_0t lehet:

$$\frac{m_0v(t)}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = m_0a_0t$$

$$\frac{v(t)}{\sqrt{1 - \frac{v^2(t)}{c^2}}} = a_0t$$

$$v(t) = \frac{a_0t}{\sqrt{1 + \frac{a_0^2}{c^2}t^2}} \tag{2}$$

(2) tovább alakítva

$$v(t) = \frac{a_0 t}{\sqrt{1+\frac{a_0^2 t^2}{c^2}}} = \frac{1}{\frac{1}{a_0 t}\cdot\sqrt{1+\frac{a_0^2 t^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{a_0^2 t^2}\cdot\frac{c^2}{c^2}+\frac{1}{c^2}}} =$$

$$= \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{c^2}\left(\frac{c^2}{a_0^2 t^2}+1\right)}} = \frac{1}{\frac{1}{c}\sqrt{1+\left(\frac{c}{a_0 t}\right)^2}} = \frac{c}{\sqrt{1+\left(\frac{c}{a_0 t}\right)^2}},$$

vagyis

$$v(t) = \frac{c}{\sqrt{1+\left(\frac{c}{a_0 t}\right)^2}} \tag{3}$$

$t \to \infty$ esetben $v(t) \to c$, tehát nem lépi át a fénysebességet.

b. Az a(t) függvény

(3) képletünket felhasználva

$$a = \frac{dv}{dt} =$$

$$= \frac{0 - c\cdot\frac{1}{2}\left[1+\left(\frac{c}{a_0 t}\right)^2\right]^{-\frac{1}{2}}\cdot 2\frac{c}{a_0 t}\cdot\left(-\frac{c}{a_0}\cdot\frac{1}{t^2}\right)}{1+\left(\frac{c}{a_0 t}\right)^2} =$$

$$= \frac{\frac{c^3}{a_0^2 t^3}}{\left(\sqrt{1+\left(\frac{c}{a_0 t}\right)^2}\right)^3} = \frac{\frac{c^3 a_0}{a_0^3 t^3}}{\left(\sqrt{1+\left(\frac{c}{a_0 t}\right)^2}\right)^3} = \frac{a_0}{\frac{\left(\sqrt{1+\left(\frac{c}{a_0 t}\right)^2}\right)^3}{\frac{c^3}{a_0^3 t^3}}} =$$

$$= \frac{a_0}{\left[\frac{a_0 t}{c}\sqrt{1+\left(\frac{c}{a_0 t}\right)^2}\right]^3} = \frac{a_0}{\left(\sqrt{\frac{a_0^2 t^2}{c^2}+\frac{a_0^2 t^2}{c^2}\cdot\frac{c^2}{a_0^2 t^2}}\right)^3} =$$

$$= \frac{a_0}{\left(\sqrt{\left(\frac{a_0 t}{c}\right)^2+1}\right)^3}$$

Tehát

$$a(t) = \frac{a_0}{\left(\sqrt{1+\left(\frac{a_0 t}{c}\right)^2}\right)^3} \tag{4}$$

Ha $t \to \infty$, $a(t) \to 0$, vagyis hosszú idő múlva gyakorlatilag egyenletes mozgássá alakul az állandó erő hatására létrejövő mozgás.

c. Az s(t) függvény

Ismeretes, hogy a $v(t)$ grafikon alatti terület a megtett utat adja. Pl. az egyenletesen változó mozgásnál (7. ábra) a terület

$$\frac{a\cdot t}{2}\cdot t = \frac{a}{2}t^2$$

Általános sebességfüggvény esetén a területet integrál számítással nyerjük.

$$s = \int_0^t v(t)\,dt = \int_0^t \frac{a_0 t}{\sqrt{1+\left(\frac{a_0 t}{c}\right)^2}}\,dt$$

Deriválással ellenőrizhető, hogy a primitív függvény

$$P(t) = \frac{c^2}{a_0}\sqrt{1+\left(\frac{a_0 t}{c}\right)^2}$$

Így

$$s = \int_0^t v(t)dt = \left[\frac{c^2}{a_0}\sqrt{1+\left(\frac{a_0 t}{c}\right)^2}\right]_0^t = \frac{c^2}{a_0}\sqrt{1+\left(\frac{a_0 t}{c}\right)^2} -$$

$$- \frac{c^2}{a_0} = \frac{c^2}{a_0}\left[\sqrt{1+\left(\frac{a_0 t}{c}\right)^2} - 1\right].$$

Tehát

$$s(t) = \frac{c^2}{a_0}\left[\sqrt{1+\left(\frac{a_0 t}{c}\right)^2} - 1\right] \tag{5}$$

Elegendő sok idő elmúltával $\left(\frac{a_0 t}{c}\right)^2$ mellett 1 elhanyagolható, így $s = \frac{c^2}{a_0}\frac{a_0 t}{c} = ct$, vagyis az űrhajó gyakorlatilag a fénysebességet megközelítő sebességgel egyenletesen mozog.

d. A mozgó testen észlelt sajátidő és a külső rendszerből mért t idő kapcsolata állandó erő hatására történő mozgásnál.

A II/5 fejezet (3) szerint a sajátidő az esemény helyéhez képest egyenletes mozgást végző K rendszerből mért idővel így függ össze:

$$\tau = \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}\cdot t$$

Ha K-ban az eseményt hordozó test mozgása nem egyenletes, hanem változó mozgás, akkor e mozgást igen rövid időtartamonként egyenletes mozgással helyettesíthetjük és így az egymásnak helyet adó inerciarendszerekben érvényes lesz az idézett összefüggés:

$$d\tau = \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}\,dt$$

A teljes sajátidő

$$\tau = \int_0^t \sqrt{1-\frac{v^2(t)}{c^2}}\,dt \tag{6}$$

$v(t)$ helyére (2) összefüggést helyettesítve, az integrandus

$$\sqrt{1-\frac{v^2(t)}{c^2}} = \sqrt{1-\frac{a_0^2 t^2}{1+\frac{a_0^2 t^2}{c^2}}\cdot\frac{1}{c^2}} = \sqrt{1-\frac{\frac{a_0^2 t^2}{c^2}}{1+\frac{a_0^2 t^2}{c^2}}} =$$

$$= \sqrt{\frac{1+\frac{a_0^2 t^2}{c^2}-\frac{a_0^2 t^2}{c^2}}{1+\frac{a_0^2 t^2}{c^2}}} = \sqrt{\frac{1}{1+\frac{a_0^2 t^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{a_0 t}{c}\right)^2}}.$$

Így τ (6) alatti kifejezése

$$\tau = \int_0^t \frac{dt}{\sqrt{1+\left(\frac{a_0 t}{c}\right)^2}} \tag{7}$$

Legyen $\frac{a_0 t}{c} = y$, akkor $\frac{dy}{dt} = \frac{a_0}{c}$ és $dt = \frac{c}{a_0}dy$, vagyis (7) új alakja

$$\tau = \frac{c}{a_0}\int_0^{\frac{a_0 t}{c}} \frac{dy}{\sqrt{1+y^2}} \tag{8}$$

A primitív függvény

$$P = {}^{e}\log(y+\sqrt{y^2+1}), \tag{9}$$

mivel

$$\frac{dP}{dy} = \frac{1}{y+\sqrt{y^2+1}}\cdot\left(1+\frac{1}{2}\frac{1}{\sqrt{y^2+1}}\cdot 2y\right) =$$

$$1+\frac{y}{\sqrt{1+y^2}}=\frac{\sqrt{1+y^2}+y}{\sqrt{1+y^2}}=\frac{1}{y+\sqrt{y^2+1}}=\frac{1}{\sqrt{1+y^2}}$$

Így (9)-et felhasználva

$$\tau=\frac{c}{a_0}\int_0^{\frac{v_0 t}{c}}\frac{dy}{\sqrt{1+y^2}}=\frac{c}{a_0}\left[{}^{e}\log(y+\sqrt{y^2+1})\right]_0^{\frac{a_0 t}{c}}=$$

$$=\frac{c}{a_0}\,{}^{e}\log\left(\frac{a_0 t}{c}+\sqrt{1+\left(\frac{a_0 t}{c}\right)^2}\right) \qquad (10)$$

A mozgás kezdetén a kétféle idő gyakorlatilag megegyezik, később azonban a sajátidő sokkal kevesebb, (mint pl. űrhajózás esetén a Földről mért idő az űrhajóban eltelt időhöz viszonyítva), amint ezt az alábbi táblázat mutatja, $a_0 = 10\ m/s^2$ kezdeti gyorsulás mellett.

τ saját idő év	t idő a Földről mérve év	s út a Földről mérve (fényév)
1	1,19	0,54
2	3,83	2,83
5	86	86
8	2520	2520
10	10300	10300
20	5930000 00	5930000 00

Elvben tehát az ember számára elviselhető gyorsulás mellett egy emberélet alatt megjárható a ködfoltok világa, de visszatérve, a Föld sokmillió évet öregedett.

IRODALOM

Novobátzky Károly: A relativitás elmélete
Vermes Miklós: A relativitáselmélet
Gombás—Kisdi: Bevezetés az elméleti fizikába

ESEMÉNYEK

SZIMPÓZIUM A CIKLOTRONOK INTERDISZCIPLINÁRIS FELHASZNÁLÁSÁRÓL A FIZIKÁBAN, KÉMIÁBAN, BIOLÓGIAI-ORVOSI TUDOMÁNYOKBAN ÉS A GYAKORLATBAN

Debrecen, 1975. augusztus 25-27.

Az 1975. évi vándorgyűlésünk és közgyűlésünk a fizika más tudományágakban betöltött szerepének, illetve Társulatunk más tudományos egyesületekkel történő együttműködésének volt szentelve. Jelképesnek is tekinthető, hogy a vándorgyűlés befejezése után rögtön egy olyan tudományos találkozó kezdődött, az Interdiszciplináris Ciklotron Szimpózium, amelyet Társulatunkkal együtt rendezett az MTA Matematika és Fizikai Osztálya és az MTA Atommag Kutató Intézete és amelyet még további nyolc egyesület, testület illetve intézmény támogatott, nevezetesen a Gépipari Tudományos Egyesület Anyagvizsgáló Szakosztálya, a Kossuth Lajos Tudományegyetem, a Magyar Biofizikai Társaság, a Magyar Biológiai Társaság, a Magyar Kémikusok Egyesülete, a Magyar Orvostudományi Nukleáris Társaság, az MTA Orvostudományok Osztálya és az Országos Röntgen és Sugárfizikai Intézet.

A három napos szimpózium célja az volt, hogy széles tudomány és alkalmazási területen dolgozó kutatók és szakemberek aktív részvételével feltárja azokat a lehetőségeket, amelyeket hazánkban egy ciklotron létesítése megnyitna. A ciklotron ugyanis, amely nem is olyan régen szinte kizárólag a magfizikai laboratóriumok kutatási eszköze volt, az utóbbi években egyre szélesebb alkalmazást talál a természettudomány különböző ágaiban, sőt a népgazdaság és a gyakorlati élet számos területén, így az ipari anyagvizsgálatban, napi agrobiológiai feladatok megoldásában, valamint az orvosi diagnosztikában és terápiában.

A természettudományok, de különösen a fizika fejlődésében törvényszerűnek tekinthető az a folyamat, hogy a felfedezések és jelentős kísérleti berendezések előbb-utóbb kilépnek szaktudományuk kereteiből és más tudományágakat is megtermékenyítenek, sőt hozzájárulnak az ipari-mezőgazdasági gyakorlat és általában a mindennapi élet által felvetett igények kielégítéséhez.

A szimpózium mintegy 120 résztvevője és 21 előadója között kb. egyenlő súllyal találjuk meg a fizikusokat, kémikusokat, biológusokat és orvosokat.

Ami az előadások és viták tárgyát illeti, bevezető jellegű előadások után először is a modern ciklotronok jelentőségéről volt szó a magreakciós és magspektroszkópiai kutatásokban, majd a szilárdtestfizikai alkalmazások kerültek megtárgyalásra. Még a kérdés ismerőit is meglepte a lehetőségeknek a szilárdtestfizika területén jelentkező gazdag spektruma, amelyik átvezet a nukleáris energetika problémáihoz és a biológiához is a reaktor szerkezeti anyagok károsodásának kutatásán, illetve a ciklotronban előállított vírusszűrők sokoldalú felhasználásán keresztül.

A második napon a kémiai-anyagvizsgálati és biológiai alkalmazások szerepeltek a műsoron. A ciklotronnal végezhető töltött részecske és gyors neutron aktivációs analízis részben szervesen egészíti ki a reaktorokon végezhető aktivációs analízist pl. a könnyű elemek (Be, B, C, O, N, P, S) nyomanalitikájában, részben az utóbbinál sokoldalúbb lehetőséget biztosít a bombázó energia és részecske változtathatóságával. Mindezek a lehetőségek már is egyre nagyobb mértékben alkalmazást találnak a modern ipari anyagvizsgálatban (félvezetőkben oxigén, szén, stb. nyomok kimutatása és a finom kohászatban) és a mezőgazdaság szempontjából annyira fontos fehérje meghatározásban. A kémiai tudományos alkalmazások közül ki kell emelnünk az ún. forró kémiát, a nagyenergiájú atomok kémiáját, amelyről szintén nagyon érdekes előadás hangzott el. A ciklotronban történő izotóptermelés is részben tudományos érdekű, részben — közvetve — számos gyakorlati területen katalizáló szerepet tölthet be.

A biológia tudományágban is sokoldalú az alkalmazások lehetősége. Nemcsak a nyomanalitika, a rövidéletű oxigén, szén és nitrogén izotópok nyomjelzőként történő alkalmazásáról van szó, hanem a különböző fajtájú és energiájú sugárzások molekuláris és sejtbiológiai hatásáról, amely gyakorlati szempontból is nagy jelentőségű. És ez már átvezet bennünket az utolsó nap előadásaihoz, amelyek a ciklotronból nyert gyorsneutronok és nagyenergiájú töltött részecskék alkalmazását tárgyalták a rákterápiában, amelyek éppen a megfelelő sejttani vizsgálatokra alapulva egy új és egyre inkább kihasznált gyógymódot jelentenek ezen a fontos orvosi területen. A ciklotront azonban a klinikai gyakorlatban nemcsak besugárzási terápiára használják, hanem izotópelőállításra is, az izotópok pedig a lokális terápia- és diagnosztikában bírnak egyre nagyobb jelentőséggel.

A szimpózium kerekasztal vitával zárult, amely igen élénk eszmecserére adott alkalmat a különböző szakterületek képviselői között, aláhúzva a ciklotron és annak inter- és multidiszciplináris megközelítésben történő létesítésének és kihasználásának fontosságát.

B. D.

NEMZETKÖZI TANULÓVERSENYEK FIZIKÁBÓL 1974-BEN

Az elmúlt évben két nemzetközi rendezvényen vettek részt tanulóink. Egyik a Nemzetközi Fizikai Diákolimpia, második egy szűkebb európai teljesítménybemutató volt.

A Nemzetközi Fizikai Diákolimpia — sorrendben a VII. — rendezését Lengyelország vállalta. A verseny ezúttal is Varsóban volt júl. 9-én és 11-én. Varsóban került 1967-ben az első fizikai olimpia megrendezésre. Nyolc ország (Bulgária, Csehszlovákia, Lengyelország, Magyarország, az NDK, az NSZK, Románia és a Szovjetunió) képviseltette magát 5—5 tagból álló versenycsapattal és 2—2 vezetővel. Az állandó tagok közül Jugoszlávia már a harmadik éve nem jelenik meg, viszont új színt adott az NSZK csapata. Ezzel másodízben volt nyugati résztvevője a versenynek (1972-ben Romániában a franciák vettek részt). Egy ízben, ugyancsak Romániában Kuba is megjelent és egy svéd megfigyelő. A Nemzetközi Matematika Olimpiákon 1964-ben már 18 ország szerepelt versenycsapattal.

A versenyszabályok némi módosításával az első napon 3 elméleti feladatot, a második napon (egy közbeiktatott pihenőnap után) egy gyakorlati, kísérleti feladatot kellett megoldani 5—5 óra munkaidő alatt. Az előbbi olimpiák tapasztalatai alapján a varsói egyetem oktatói által kitűzött feladatok kevesebb számolást igényeltek, viszont igen szellemesek voltak. A verseny rendezése, a dolgozatok elbírálása minden szempontból kifogástalannak mondható. A kialakult szokás szerint a teljesítményt a teljes elnyerhető pontszám százaléka alapján állapították meg. Egy-egy elméleti feladat hibátlan megoldásával 10 pontot, a gyakorlati feladat hibátlan megoldásával kétszer tíz, tehát 20 pontot lehetett nyerni. Az elért legmagasabb pontszám 46 volt. Ezt 100%-nak véve I. díjat azok a versenyzők kaptak, akik 42—46 pontot (legalább 90%-ot), II. díjat azok, akik 36—41 pontot (legalább 78%-ot), III. díjat azok, akik 30—35 pontot (legalább 65%-ot), végül dicséretet akik legalább 23 pontot (50%) értek el. Ezek alapján a Nemzetközi Bizottság kiadott három I. díjat két lengyel és egy magyar versenyzőnek Jarislaw Deminet, Meszéna Géza és Jerzy Tarasiuk), nem adott ki második díjat és kiadott nyolc III. díjat (köztük Pálfalvi Györgynak és Vladár Károlynak) és hét dicséretet.

A záróünnepélyen az okleveleket és különféle értékes díjakat Jerzy Kuberszky iskolaügyi miniszter osztotta ki. A vezetők a lengyel oktatási bizottság megalapításának (a művelődésügyi minisztérium elődje) 200. évfordulójára alapított emlékérmet kapták. A résztvevők nevében a magyar delegáció vezetője mondott köszönetet. Az NDK delegációjának vezetője bejelentette, hogy a VIII. Nemzetközi Fizikai Diákolimpia 1975-ben Güstrowban (NDK) lesz. A lengyel sajtó igen meleg hangon ünnepelte a magyar és lengyel sikereket.

A nemzetközi tanulóversenyeken hivatalos csapatverseny természetesen nincs. Ha az elért pontszámot csapatonként összegezzük, akkor a következő képet nyerjük: Bulgária 69, Csehszlovákia 107 (2 harmadik díj), Lengyelország 138 (2 első díj), Magyarország 137 (1 első és 2 harmadik díj), NSZK 31, NDK 135 (2 harmadik díj és 2 dicséret), Románia 116 (2 dicséret). Szovjetunió 150 (2 harmadik díj, 3 dicséret). A mi eredményünkhöz azt kell hozzáfűzni, hogy legerősebb jelöltjeink most is a matematika olimpián vettek részt (így a Középiskolai Fizikai Tanulmányi Verseny I., III. és VII helyezettje, továbbá a múlt évi verseny VII. helyezettje) és így nem szerepelhettek a fizika versenycsapatban. Ehhez mérten elég szép sikert értünk el.

Az olimpiával kapcsolatos országjárás keretében a résztvevők megtekintették Varsó és Krakkó nevezetességeit, a lengyel Fiat műveket, a krakkói Atomfizikai Intézetet, a jdrzejowi napóra múzeumot, Oszwiecomot és tutajoztak a Dunajecen.

A fizikai olimpián kitűzött feladatokat — a statutum értelmében — úgy kell megválasztani, hogy a középiskolai anyag négy fő területét (mechanika, hőtan, fénytan, elektromosság) érintse. Mivel a feladatok száma három, az egyes problémák lehetőség szerint komplex jellegűek, esetleg modern fizikát is tartalmaznak. A varsói olimpia feladatai a következők voltak:

1. Egy alapállapotban levő nyugvó hidrogénatommal ütközik egy v sebességgel mozgó másik hidrogén atom. A Bohr modell alapján határozzuk meg azt a v_0 kritikus sebességet, melynél kisebb sebességértékek esetén az atomok ütközése rugalmas. A hidrogén atom ionizációs energiája E_i, tömege m_H. Ha a sebesség eléri a v_0 értéket, az atomok közti ütközés rugalmatlanná válhat, és az ütközést sugárzás kibocsátása kíséri. Számoljuk ki a különbséget az észlelt frekvenciákban, ha a foton a v sebességgel mozgó hidrogén atom sebességének irányába, vagy vele ellentétesen sugárzódik ki. Adjuk meg a két frekvencia relatív különbségét százalékban a két frekvencia számtani közepére vonatkoztatva. (A hidrogén atom ionizációs energiája $E_i = \frac{m_e e^4}{2h^2} =$ $= 13{,}6$ eV $= 2{,}18 \cdot 10^{-18}$ joule. A hidrogén atom tömege $m_H = 1{,}67 \cdot 10^{-27}$ kg.

2. Adott egy planparallel lemez, amelynek törésmutatója az $n = \frac{n_A}{1 - x/R}$ összefüggés szerint változik. Az $x = 0$ koordinátával jellemzett O pontban a lemezre merőlegesen beesik egy fénysugár. A fénysugár, amint az ábrán látható, a lemezt a B pontban alfa szögben hagyja el. Számoljuk ki: *a)* A törésmutató értékét az A pontban! b) A B pont x_B koordinátájának értékét! c) A lemez d vastagságát! (Adatok: $n_A = 1{,}2$ $R = 13$ cm; $\alpha = 30°$.

3. Egy lakatlan szigeten tartózkodó tudományos expedíció kimerítette összes rendelkezésére álló energiaforrásait. A szigeten szél nem fúj, folyók nincsenek, az eget egy vastag felhőréteg borítja, a légnyomás állandó, a környező teljesen mozdulatlan oceánnak és a légkörnek a hőmérséklete éjjel-nappal ugyanaz. Felfedeznek a szigeten egy gázforrást, amelyből az inaktív gáz egy nyíláson át egyenletesen áramlik kifelé. A kiáramló gáz nyomása és hőmérséklete megegyezik a légkör nyomásával és hőmérsékletével. Az expedíció tagjainak rendelkezésére áll két félig áteresztő membrán (hártya), amelyek közül az egyik a gázmolekulákat átengedi, a levegőmolekulákat nem, a másik pedig a levegőmolekulákat engedi át és a gázmolekulákat nem. Az expedíció tagjai tudnak egyszerű berendezéseket összeállítani pl, dugatytyúkból, hengerekből, csövekből, csapokból, és elhatározzák, hogy szerkesztenek egy erőgépet. Bizonyítsuk be, hogy nincs elméleti határa olyan ideális gép teljesítményének, mely ezt a gázt használja ki.

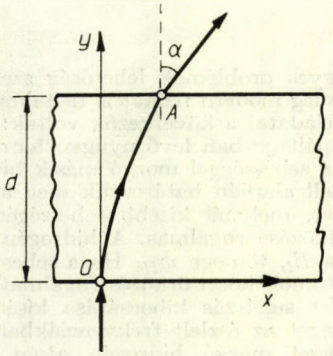
4. (Gyakorlati feladat.) A versenyzők kapnak egy dobozt, melyről tudják azt, hogy benne két egyforma félvezető dióda és egy ohmikus ellenállás alkot valamilyen egyszerű áramkört. A rendelkezésre álló eszközöket használva, határozzák meg az ellenállás értékét! (A mérés szempontjából feltesszük, hogy a diódán az áram csak az egyik irányban folyhat.) Eszközök: 2 univerzális műszer (csak áram és feszültség mérésére használható, közvetlen ellenállásmérésre nem!), elem, tolóellenállás vezetékek, milliméterpapír. Adjunk indokolást az alkalmazott eljárásra. (A doboz a verseny után emlékül elvihető!)

(A Középiskolai Matematikai Lapok 1974. évi novemberi száma közli a feladatok részletes diszkusszióját Vermes Miklós feldolgozásában, kissé módosított szöveggel.)

Az Olimpián résztvevő versenycsapatot Gosztonyi János államtitkár fogadta. A tanulók (Ábrahám Tibor, Meszéna Géza, Németh Tibor, Pálfalvi György és Vladár Károly) pénzjutalmat, a vezetők (Kunfalvi Rezső és Tichy Géza) miniszteri dicséretet kaptak.

Az eddig lezajlott hét Nemzetközi Fizikai Diákolimpián a magyar versenyzők által elért eredmény és a legtöbb pontszámot elért csapatok sorrendje a következő:

1967. Varsó: I. Szalay Sándor, IV. Mihály László,



VI. Marossy Ferenc. Magyarország 107, Lengyelország 104, Csehszlovákia 103 pont.

1968. Budapest: II. Takács László, III. Mihály László. IX. Marossy Ferenc. Magyarország 93, Csehszlovákia 85, Lengyelország 84 pont.

1969. Brünn: I. díj: Kálmán Péter, Maróti Péter, Spitzer József II. díj: Andor László, Horváthy Péter. Csehszlovákia 222, Magyarország 214, Szovjetunió 207 pont.

1970. Moszkva: II. díj: Kereszturi András, Ormos Pál III. díj: Nagy András dicséret: Sailer Kornél; emléklap: Gyimesi Ferenc, Horváthy Péter. Szovjet-, unió 301, Csehszlovákia 238, Lengyelország 236, Magyarország 224 pont.

1971. Szófia: I. díj: Tichy-Rács Ádám; II. díj: Mosó Tamás; III. díj: Gács Lajos, Iglói Ferenc; dicséret: Szabó Zoltán. Magyarország 197, Szovjetunió 192, Románia 184 pont.

1972. Bukarest: I. Szabó Zoltán; III. díj: Éber Nándor, Imhof Gyula, Kövér András; dicséret: Gács Lajos. Románia 223,8, Magyarország 218,4, Szovjetunió 216,6 pont.

1973. Olimpia nem volt.

1974. Varsó: I. díj: Meszéna Géza; III. díj: Pálfalvi György, Vladár Károly. Szovjetunió 150, Lengyelország 138, Magyarország 137 pont.

Néhány éve részt veszünk az Unesco támogatásával Brüsszelben működő „Comité International de Coordination pour l'Initation a la Science et le Developpement des Activitées Scientific Extrascolaire" által rendezett teljesítménybemutatókon, melyeken ifjú természettudósok szerepelnek kísérletező-kutató munkáikkal. Ezeken a találkozókon 15—20 ország szokott megjelenni matematika, fizika, biológia, kémia, műszaki- és földtudományok köréből választott témákkal. 1974-ben ez a találkozó nem került megrendezésre, helyette a „Fördergemeinschaft für naturwissenschaftliche Jugendarbeit" hívott meg néhány országot, köztük Magyarországot is, egy egészen szűk körű teljesítménybemutatóra Wuppertalba (NSZK).

Erre a rendezvényre az Oktatási Minisztérium vezetésemmel 4 tanulót küldött ki. Rajtunk kívül 5 svájci és 4 francia tanuló jelent meg. Bemutatásra került a következő 6 változatos témájú dolgozat:

Franciaország: Légköri megfigyelések céljára készített rakéták demonstrálása

Magyarország: Elektronpályák mechanikai modellezése műanyag hártyákkal (Györgyi Géza és Zimányi Gergely)

A fényképezés alapjelenségei (Bereczky Géza és Forró Tibor)

Svájc: Egy negyedfokú egyenlet általános megoldása

Zajártalom vizsgálatok Winterthurban

Bibic-családok szokásainak megfigyelése Luzern környékén

A kis létszám lehetővé tette, hogy a dolgozatokat és a velük kapcsolatos dokumentációs anyagot a résztvevők alaposan megvitassák. Díjkiosztás nem volt.

A programon sok tanulságos szakmai kirándulás szerepelt. Így látogatás a következő intézményekben:

Ruhrvidéki egyetem fizikai intézete Bochumban 8 Mev-es ióngyorsító. Theta-pinch rendszerű plazmagenerátor.

Aerodinamikai kutatóintézet Porz-Wahnban. Szélcsatornák, űrszimulációs kamra, laser-interferométer, színes filmek aerodinamikai kutatásról.

Bayer művek. Gyógyszerkutató laboratórium. Modern kémiai laboratórium. Környezetszennyezési problémák. Állatkísérletek.

Vorwerk háztartási gép-gyár. Motorgyártás. Termelésszervezés a nyersanyagtól a kész termékig.

Más jellegű kirándulások: Friedrich Engels otthona, munkásmozgalmi múzeum. Iskolakombinát és sportcentrum Wuppertalban. Római-germán történeti múzeum és dóm Kölnben. Műszaki-természettudományos múzeum és régi képtár Münchenben.

Egészében a tanulmányút hasznos volt. Tanulóink sokat láttak és külföldön eredményesen dokumentálták az iskolán kívüli természettudományos oktatás színvonalát. A két dolgozat a Középiskolai Matematikai Lapok Fizika Rovatának pályázatán elért eredmény alapján került kiválasztásra. *K. R.*

VÉLEMÉNYEK

FIZIKA VAGY FOXTERRIER?

Marx György
ELTE Atomfizikai Tanszék

A fizikusok általában érzékenyen figyelik azt a képet, amelyet a társadalom széles rétegei alkotnak magukban a fizikáról. Az ilyen irányú érdeklődés az utóbbi időben világszerte is, hazánkban is újra megélénkült. Talán nem felesleges belenézni abba a tükörbe, amit a bélyegkiadás mutat rólunk és tudományunkról.

A Fizikai Szemle többször közölt összeállítást fizikai vonatkozású bélyegekről. Kétségtelenül jólesett viszontlátni fizikusokat és fizikai eszközöket ezeken a mindenki kezébe eljutó kis képeken. Két jelenségre azonban nehéz volt nem felfigyelni:

I. A természettudomány rendkívül szegényesen jelentkezik a magyar bélyegeken. Sokkal kevesebb a



1. ábra



2. ábra



3. ábra

tudós, mint a kutya vagy az űrhajó. Nem küldünk hamis képet a világba önmagunkról, szocialista kulturális forradalmunkról? Nem mentünk e el túl csendesen a Jedlik-évforduló vagy nagy kutatóközpontjaink munkája, évfordulója mellett?

II. A bélyegkiadás világszerte tudósok arcképére szeretik leszűkíteni a természettudományt. Kevés vonal utal magára a természetre, az anyagra, az univerzumra, amelyet az ember feltár és hasznosít. Az objektív természetkutatás számára nem idejétmúlt, nem idegen a bélyegkiadásnak ez a személyi kultusza?

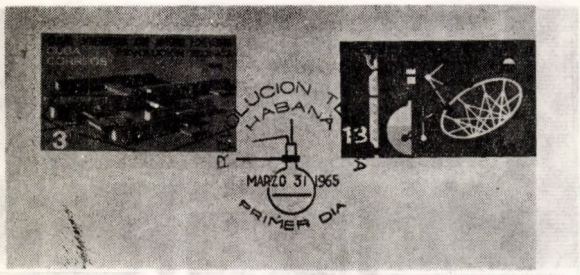
Szeretnék néhányat bemutatni az elég ritka pozitív példák közül, okulásul. A Kopernikusz-évforduló magyar bélyegpárján Kopernikusz arca mellett a kopernikuszi világrendszer is megjelenik, tanítván ezáltal mindenkit a kopernikuszi fordulat igazi jelentőségére. (Ez a megoldás az MTA közvetlen intervenciójára született meg, szemben a Kopernikuszt és űrhajót kombináló romantikus-merkantilista eredeti változattal, 1. kép.) Ugyanilyen tartalmas kombináció a nemrég megjelent Segner András em-



4. ábra

lékbélyeg is. (Segner arcképe és Segner-kráter a Holdon; illetve Segner-kerék és felhasználása. 2. kép.) A román napfogyatkozás-bélyeg, a magyar WHO és NGÉ bélyeg, az atomerőművet ábrázoló görög Demokritosz-emlékbélyeg hasonló pozitív példák. Menjünk közelebb a mai fizika tudományos világképéhez. A periódusosrendszer részlete a Mendelejev- és az alfa-szórás a Rutherford-emlékbélyegen (Szovjetunió), a benzolgyűrű a Kekulé- és az atomreaktor aktív zónája a Hahn-emlékbélyegen (NSZK), a gravitációs mérleg az Eötvös-emlékbélyegen (Magyarország), a lencsék optikai törvényei az Ibn-Al-Haitham-emlékbélyegen (Pakisztán), a Bohr-pálya és frekvenciafeltétel a Bohr-emlékbélyegen (Dánia), energia és tömeg ekvivalenciája az Einstein-bélyegen (Izrael), a Rutherford-atommodell a Demokritosz-bélyegen (Görögország) nemcsak tanulságos megoldások, de szép kompozíciók is (3. kép).

A tudományos kutatás társadalmi szerepét legigényesebben egy csodálatos tengerentúli bélyegsorozat dolgozza fel: „Tíz matematikai egyenlet, amely megváltoztatta az emberi történelmet" (4. kép). Melyek ezek? $1 + 1 = 2$ (egyiptomi festmény, hieroglif-jel, a háttérben az emberi agy körvonalai). Archimédesz törvénye (és a mérleg). $f = km_1m_2/r^2$. (Newton feje helyett az alma és rárajzolva a Naprendszer!) $e^{\ln N} = N$. (Az univerzum felmérése.)



5. ábra

$A^2 + B^2 = C^2$ (Az építészmérnök eszközei és az Akropolisz.) $S = k \log W$. (A robbanómotor). $E = mc^2$ (Einstein jellegzetes arca helyett atommag és atomerőmű, háttérben a gombafelhő). $\lambda = h/mv$ (Elektroninterferenciagyűrűk, elektronmikroszkóp és mikrobiológiai felvétel). $v = v_0 \ln m_0/m_1$ (induló és hazatérő űrhajó). A Maxwell-egyenletek (rádió és tévé).

Valóban többre értékeli Nicaragua a tudományt és annak építő társadalmi szerepét, mint szocialista országunk? Vagy éppen csak bélyegkiadásunk marad le évszázaddal a társadalmi tudat mögött? Az mégis megvigasztal, hogy a tudományos-technikai forradalmat egy szocialista ország, Kuba tette bélyegére (5. kép).

Válasz
Fekete Gyulának
„A FELVÉTELI VIZSGÁK ÜRÜGYÉN" C. ÍRÁSÁRA

Sas Elemér—Tasnádi Péter
ELTE, Általános Fizikai Tanszék

A Fizikai Szemle 1975/11. számában a Vélemények rovatban A felvételi vizsgák ürügyén címmel Fekete Gyula kifogásolja a négy évvel ezelőtti TV „Ki miben tudós" című adásának egyik feladat megoldását, valamint az 1975. évi egyetemi felvételi feladatok egyikének a hivatalos megoldásban szereplő és a TV „Oldjuk meg" című műsorában is elhangzott kidolgozását.

Fekete Gyula felhívja figyelmünket e kérdések nagy jelentőségére, kizárólag ezért tartjuk szükségesnek a válaszadást.

A „Ki miben tudós" feladatával lényegében szükségtelen lenne foglalkozni, mert annak megoldása Fekete Gyula szerint is helyes volt. „Baki"-nak nevezi azonban érthetetlen módon azt a körülményt, hogy a feladat a gyakorlatban elő nem forduló esetet tételez fel.

A feladat pontos szövegére sajnos nem emlékszem, így kénytelen vagyok elfogadni Fekete Gyula szövegezését.

„Egy daru csigáján átvetett kötélen az ábrán látható módon van felfüggesztve az 1000 kp súlyú teher. Elszakadhat-e a kötél, ha teherbírása 2000 kp?"

A versenyző azt a választ adta, hogy ha felfelé irányuló g gyorsulás lép fel, akkor a kötélen 2000 kp erő ébred, így ha e gyorsulást túllépjük, a kötél elszakad.

A zsüri a választ elfogadta.

A válasz helyes volt, és ezután a cikk írójának az a kifogása, hogy a daru a terhet egyenletesen emeli és nem g gyorsulással. Ezért a megoldást szemléletrombolónak tartja.

Senki nem állította, hogy a daru g gyorsulással szokta emelni a terhet. Példaként viszont nyugodtan lehetett kérdezni a szemléletrombolás veszélye nélkül, hiszen darut mindenki látott már működni, és nem valószínű, hogy a kérdés kapcsán hamis képet alkotott volna magának a daru működéséről. Ami azt a kérdést illeti, hogy felléphet-e nagy gyorsulás, arra igennel kell válaszolnunk. Bekövetkezhet például, hogy erős széllökés, vagy a daru gyorsabb fordulata kilendíti a terhet. Amennyiben az ingaszerűen leng, jelentős, a csiga felé mutató gyorsulás léphet fel. Hogy ilyen erős széllökés nincs kizárva, azt bizonyítja az a már 1976-ban történt sajnálatos esemény, hogy Miskolcon egy darut működés közben a szél feldöntött.

A bizottság egyébként más kérdésekben is minden helyes megoldást elfogadott. A darus példánál a versenyző által is adott válaszra gondoltunk, ugyanis mi a daru kötelén a daru kötelét értettük, és nem a terhet áthurkoló vagy ahhoz kapcsolódó toldatokat. Az erők sztatikájára vonatkozó kérdésre azért nem adtunk feladatot, mert egyrészt az általános fizika

szempontjából jelentősebbnek éreztük a dinamika szerepét, másrészt egy korábbi Iskola Televíziós órán részletesen foglalkoztunk az erők sztatikájával és kísérletet is mutattunk arra, hogy megfelelő összeállításban miként szakít el egy 2 kp súlyú test egy olyan zsineget, melyet ezt megelőzően 5 kp erő elszakítani nem tudott. Így tartottunk tőle, hogy „Ki miben tudós" vetélkedőn ez túl egyszerű kérdés lenne.

Fekete Gyulával tökéletesen egyetértek abban a kérdésben, hogy törekednünk kell arra, hogy feladataink megoldásai ne legyenek gyakorlatilag irreálisak.

Meg kell jegyeznem hogy a IV. gimnazista tankönyvben már sok bosszúságot okozott az a két ábra, melyek egyike 1 C, másika 2 C töltéssel rendelkező elektroszkópot ábrázol. Ez valóban szemléletromboló, mert míg egy daru mozgásáról mindenkinek van elképzelése, addig a kezdő tanuló a coulomb töltés mértékéről szemléletes képet nem alkothatott.

Még egyszer szeretném leszögezni, hogy az említett példa megoldása semmilyen szempontból nem nevezhető „baki"-nak.

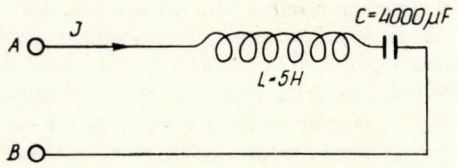
Mielőtt a második feladat tárgyalására áttérnénk, hangsúlyozzuk, hogy a felvételi bizottság által megadott *és a TV-ben is elhangzott* megoldás helyes. *Lássuk most a megoldást. Emlékeztetőül ismét közöljük a feladatot.*

„Töltetlen kondenzátort egy induktivitáson keresztül töltünk fel.

a) Tegyük fel, hogy a töltő áram állandó: $I = 2 \cdot 10^{-3}$ A. Határozzuk meg az A és B pontok közötti feszültség időfüggését.

b) Tegyük fel, hogy a töltő áram az idővel arányosan nő úgy, hogy 0-ról indulva értéke az első másodperc végén eléri a 2 mA, majd ennek megfelelően nő tovább. Határozzuk meg ebben az esetben is az A és B pontok közötti feszültség időfüggését.

c) Mindkét esetben ábrázoljuk az A és B pontok közötti feszültséget, mint az idő függvényét a 0—0,2 sec időintervallumban (1. ábra).



1. ábra

Az a) kérdésre adott válasz nem volt vita tárgya, csak a teljesség kedvéért közöljük. I = állandó miatt $U_L = 0$, így

$$U_{AB} = U_C = \frac{Q}{C} = \frac{I \cdot t}{C} = \frac{1}{2} t, \qquad (1)$$

ahol a feszültséget [V]-ban kapjuk, ha minden mennyiséget a megfelelő MKSA egységben helyettesítünk be.

b) Ebben az esetben az áramerősség változása miatt önindukciós feszültség is fellép. Ez a feszültség a Lenz törvény értelmében az „őt" keltő hatás, tehát az áramerősség növelése ellen dolgozik. Ugyancsak az áramerősség növelését akadályozza a kondenzátoron felhalmozódó töltésmennyiség által létrehozott feszültség. Így a két mennyiséget mindenképpen azonos előjellel kell figyelembe vennünk. Tehát

$$U_{AB} = U_L + U_C$$

Az indukciótörvény értelmében U_L nagysága:

$U_L = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$, *az adatokkal* $U_L = 10^{-2}$ V.

Ugyanakkor:

$$U_C = \frac{Q(t)}{C} = \frac{\int_0^t I dt}{C}$$

Mivel $I(t) = kt$ ($k = 2 \cdot 10^{-3}$ A/sec) lineáris függvény, az integrál helyett használhatjuk a

$$Q(t) = \frac{I(0) + I(t)}{2} t$$

formulát is, tehát $I(0) = 0$ felhasználásával,

$$U_C = \frac{kt^2}{2C}.$$

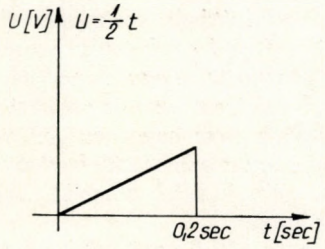
Az adatokat MKSA mértékrendszerben behelyettesítve a feszültséget [V]-ban kapjuk, tehát

$$U_C = \frac{1}{4} t^2$$

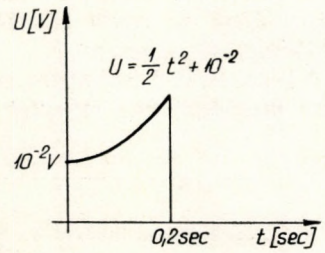
Így

$$U_{AB} = \frac{1}{4} t^2 + 10^{-2} \qquad (2)$$

Az (1) és (2) formulák grafikus ábrázolását a 2., 3. ábrák mutatják.



2. ábra



3. ábra

Válaszoljunk még röviden azokra a kifogásokra, amelyeket a cikkben olvashattunk.

1. Az induktivitás kifejezés az elektromosságtanban elfogadott, az indukciós tekercs kifejezés szinonimája, azzal egyenértékű.

2. A fenti megoldásból, reméljük, világosan látszik, hogy U_L és U_C előjele azonos.

Az adott feladatban sem az áram, sem a feszültség nem periodikus jelenség. Ebben az esetben fázisról nem beszélhetünk. Hasonlóképpen nincs értelme a feszültség és áram vektoriális ábrázolásának. Fekete Gyula megoldása tehát azért helytelen, mert a harmonikusan változó áramot és feszültséget leíró matematikai módszert önkényesen, nem periodikus esetre alkalmazta. (Erre a hibára azonnal rájöhetünk, ha felírjuk az $X_L = L\omega$ és $X_C = \frac{1}{C\omega}$ impedenciákat. Az ω körfrekvenciának a feladatban nincs értelme, így a megoldásban X_L és X_C sem használhatók, értelmetlenek.)

Megjegyzés: Az RLC körre vonatkozó általános egyenlet

$$L\frac{d^2I}{dt^2} + R\frac{dI}{dt} + \frac{1}{C}I = \frac{dU}{dt}$$

alakú.

Tulajdonképpen ennek az egyenletnek egyszerű speciális esetét kell megoldanunk U-ra, hiszen $I = kt$ adott. A probléma részletes tárgyalása megtalálható Nagy Károly: Elektrodinamika, vagy Simonyi Károly: Villamosságtan című könyvében.

3. Az

$$I_{\text{átlag}} = \frac{0 + 2\cdot 10^{-3}t}{2}$$

formula nem hibás. A formulában nincsenek mértékegységek. Az ilyen felírásmód elfogadott. Ha az adatokat azonos mértékrendszerben helyettesítjük be, akkor helyes eredményt kapunk. A feladat megfogalmazásából értelemszerűen adódik, hogy $k = 2\cdot 10^{-3}$ mértékegysége A/sec.

Végül Fekete Gyula „ajánlására", miszerint: „Több szem többet lát" le kell szögeznünk, hogy mindkét esetben a feladatokkal népes bizottság foglalkozott, melynek tagjai voltak tanári és mérnöki diplomával rendelkező professzorok, egyetemi oktatók és középiskolai tanárok:

A közölt „Vélemény" dramatizált és a bizottságokat sértő. Van egy régi latin közmondás, miszerint „Est modus in rebus", azaz Van mód a dolgokban. Ezt a szabályt még akkor is megsértette volna a szerző, ha igaza lenne, hisz mint ő írja, nincs ember hiba nélkül. Mivel azonban egy munkáját lelkiismeretesen végző bizottságot sértett meg téves állításával, és mert, mint ő is hangsúlyozza, e bizottság munkájának nagy a társadalmi jelentősége, reméljük, hogy szokásához híven elnézést kér kellően át nem gondolt sértő megjegyzéseiért.

E sorok írói nem tagjai a felvételi feladatokat készítő bizottságnak.

VÉLEMÉNY A VÉLEMÉNYEKRŐL

Amikor a lap szerkesztőbizottsága elindította a Vélemények rovatot, ezzel azt kívánta elérni, hogy ezáltal is növelje a lap olvasóinak — a fizikusoknak, mérnököknek, tanároknak és a természettudományok más területén dolgozó, a fizika iránt érdeklődő kartársainknak — aktivitását, bekapcsolódási lehetőségét a fizikával összefüggő problémák megvitatásába. A szerkesztőség elvállalta, hogy ismerteti a beérkezett véleményeket, beleértve azokat az eseteket is, amikor az azokban foglaltak nem egyeznek feltétlenül a szerkesztőbizottság vagy a szerkesztőbizottság egyes tagjai álláspontjával. Ezt lapunk a rovat megindulásakor 1972-ben leszögezte.

A Vélemények célja az önálló véleményalakítás támogatása; a vitainditás, amelyek során kialakul a helyes álláspont. Ezen célkitűzésünk nem adhat felmentést arra, hogy az egyes vélemények tárgyi tévedéseket, hibákat tartalmazzanak.

Az 1975. évi novemberi számban, a 440. oldalt követő lapokon megjelent közleményért elnézést kérünk olvasóinktól. A szerkesztőbizottság tudja, hogy az egyetemi felvételi feladatok kiválasztása, és a feladatmegoldások elbírálása a felvételi bizottságok részéről nagy körültekintéssel folyik. Hozzáértésük és elfogulatlanságuk által munkájuk a közvéleményben feltétlen elismerést váltott ki.

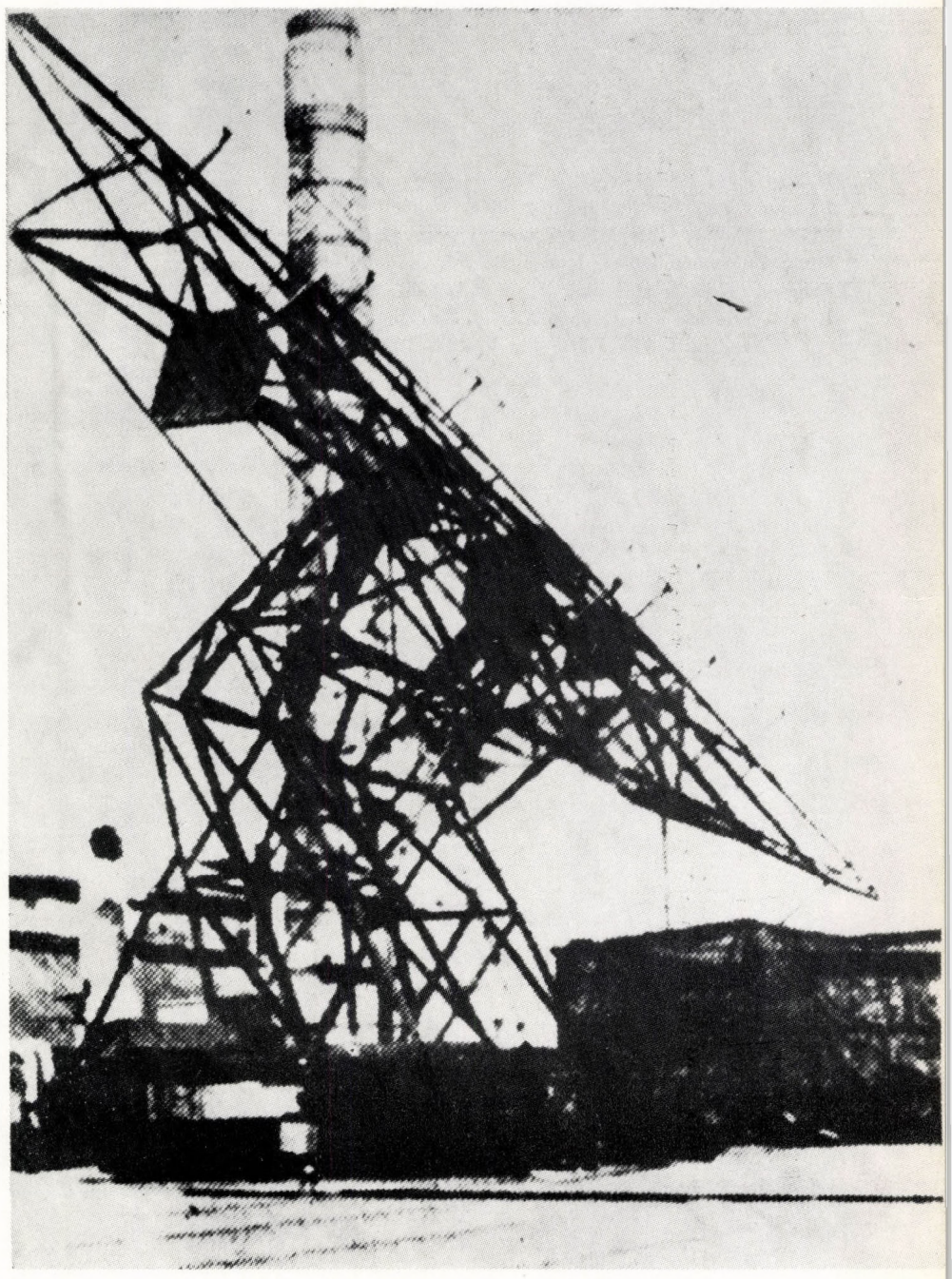
A szerkesztőség sajnálja, ha egy felvételi vizsgafeladattal kapcsolatos vélemény közlése, esetleg zavart keltett az olvasók körében. E számban megjelent Sas–Tasnádi cikk azonban rámutat: a vizsgafeladat „hivatalos" megoldása helyes volt; a TV-ben a felvételi vizsgát követő napon elhangzott a feladat ismertetése szintén. Az egyetemi felvételekkel kapcsolatos konstruktív észrevételeket továbbra is várják az oktatási szervek és a fizikusok! Kérjük, hogy olvasóink véleményeik beküldésével és a vélemények további megvitatásával a jövőben is támogassák lapunk társadalmi vitafórum kialakítására irányuló törekvését.

A szerkesztők

A szerkesztésért felel: Turiné Frank Zsuzsa
Szerkesztőség: Budapest V., Anker köz 1. Eötvös Loránd Fizikai Társulat. Távbeszélő: 227–040
A kiadásért felelős: Siklósi Norbert igazgató
Kiadja a Lapkiadó Vállalat, Budapest VII., Lenin körút 9–11. Levélcím: 1906. postafiók 223 Távbeszélő: 221–293
Terjeszti a Magyar Posta, Előfizethető bármely postahivatalnál, a kézbesítőknél, a Posta hírlapüzleteiben és a Posta Központi Hírlap Irodánál KHI, 1900 Budapest V., József nádor tér 1.) közvetlenül vagy postautalványon, valamint átutalással a KHI 215-96162 pénzforgalmi jelzőszámlára
Előfizetés egy évre 72,– Ft: egyes szám ára 6,– Ft. Megjelenik havonta
76.2541 Akadémiai Nyomda, Budapest V., Gerlóczy utca 2. — Felelős vezető: Bernát György
Index: 25.289

fizikai szemle

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat lapja



1976/2

A szerkesztő bizottság elnöke:

Marx György

A szerkesztésért felelős:

Turiné Frank Zsuzsa

A szerkesztő bizottság titkára:

Berényi Dénes

Szerkesztő bizottság:

Balázs Béla, Barlai Katalin, Barta György, Bozóky László, Csekő Árpád, Dede Miklós, Fehér István, Flórián Endre, Gaal István, Groma Géza, Haiman Ottó, Hoffmann Tibor, Holics László, Károlyházy Frigyes, Keszthelyi Lajos, Kovács István, Mihály László, Schanda János, Soós Károly, Szigeti György, Tóth Eszter, Valkó I. Péter, Vermes Miklós

Címképünk:

Az 1946. február 6-i budapesti holdvisszhang-kísérletek radar-antennája Újpesten, az Egyesült Izzó tetején

TARTALOMJEGYZÉK

Bay Zoltán: Visszaemlékezés a magyar holdvisszhang kísérletekre 41 oldal
Berényi Dénes: Újabb fizikai módszerek a szerkezetkutatásban 53 oldal
Bérczi Szaniszló: Növényi szimmetriák 59 oldal
W. Heisenberg: Lezárult-e a fizika? 62 oldal
Marx György: W. Heisenberg 65 oldal
Kapuy Ede: A kvantummechanika és a kémia 68 oldal

A FIZIKA TANÍTÁSA

Korsós Ferencné: A természettudományok komplex tanítása és a matematika 69 oldal

ESEMÉNYEK 71 oldal

EREDMÉNYEK 77 oldal

KÖNYVEK 78 oldal

VÉLEMÉNYEK

Szalay Sándor: Alkalmazott kontra alapkutatás 79 oldal
Berényi Dénes: Alkalmazott kontra alapkutatás 80 oldal
Kovács László: Oktatási kísérletek a természettudományok egybehangolt tanítására 80 oldal

СОДЕРЖАНИЕ

З. Бан: Воспоминания о венгерских опытах получения радар-эхо с Луны
Д. Береньи: Новые физические методы структурного анализа
С. Берци: Растенные симметрии
В. Гейзенберг: Завершена-ли физика?
Г. Маркс: В. Гейзенберг
Э. Капуи: Квантовая механика и химия

СОБЫТИЯ

КНИГИ

РЕЗУЛТАТЫ

ОТЗЫВЫ И ВЫРАЖЕНИЯ МНЕНИЙ

INHALT

Z. Bay: Rückblick auf die ungarischen Mondecho-Versuche
D. Berényi: Neuere physikalische Methoden der Strukturforschung
S. Bérczi: Pflanzensymmetrien
W. Heisenberg: Ist die Physik abgeschlossen?
G. Marx: W. Heisenberg
E. Kapuy: Die Quantenmechanik und die Chemie

EREIGNISSE

BÜCHER

ERGEBNISSE

STELLUNGNAHMEN UND MEINUNGSÄUSSERUNGEN

CONTENTS

Z. Bay: Recalling the Hungarian moon echo experiments
D. Berényi: New physical methods of structure research
S. Bérczi: Plant Symmetries
W. Heisenberg: Is physics accomplished?
G. Marx: W. Heisenberg
E. Kapuy: Quantum mechanics and chemistry

EVENTS

BOOKS

RESULTS

OPINIONS

fizikai szemle

AZ EÖTVÖS LORÁND FIZIKAI TÁRSULAT LAPJA
Alapította Eötvös Loránd 1891-ben Mathematikai és Physikai Lapok néven

XXVI. évfolyam 2. szám 1976. február

VISSZAEMLÉKEZÉS A MAGYAR HOLDVISSZHANG KÍSÉRLETEKRE

Bay Zoltán
The American University, Washington D.C., USA

Amikor 1973 őszén Magyarországon jártam és e Társulatban előadást tartottam (1), valaki azt kérdezte tőlem, fogok-é újra jönni és a Társulatban beszélni? A válaszom az volt, hogy mindaddig szívesen, amíg újat tudok mondani. Így amikor meghívást kaptam, hogy ezen a vándorgyűlésen részt vegyek, az volt a szándékom, hogy elmondom azokat az újabb eredményeket, melyek a fénysebesség állandó voltát, a hozzájuk fűzött elméleti alátámasztással, *kísérletileg* igazolják. (Ezek az eredmények igen fontosak, ha az új méter definícióját a fénysebességre akarjuk alapítani, ami nekem mostanában központi témám.)

De a Társulat vezetősége másképp határozott. A végleges meghívás úgy szólt, mondjam el visszaemlékezéseimet az úttörő magyar Holdvisszhang (rádióhullámok visszaverődése) kísérletekre, azoknak 30-adik évfordulója alkalmából.

Ezek a kísérletek — előkészítéseikkel együtt —, az 1944—46. években folytak. Műszaki leírásuk megjelent az Elektrotechnika 1946. évi számaiban (2) és az akkor induló Hungarica Acta Physica első számában (3).

Ezekhez a műszaki leírásokhoz nem tudnék sokat hozzátenni. Beléjük lapozva látom, hogy a lényeget elmondták, tehát ismétlések elkerülése céljából elegendő lesz itt most a kísérleti tervezésnek csupán a fővonalait megemlíteni. S hogy a fent említett törekvéshez hű maradjak és újat mondjak, a hangsúlyt a *visszaemlékezésre* teszem, elmondva azt, ami a műszaki leírásokból hiányzik. Az emlékezés visszahozza a külső körülményeket, melyek azokban az igen zavaros esztendőkben a kísérletet gátolták, sokszor megakasztották, de melyek keserűsége 30 év távlatában már enyhül és melyek sokszor már a humor oldalára csapnak át.

Érdemes azonkívül néhány mondatban arra a szédületes fejlődésre is rámutatni, mely azóta az égitesteket vizsgáló radartechnikában végbement. Akkor boldogok voltunk, hogy a Holdról visszavert mikrohullámú jeleket éppen hogy észlelni tudtuk. Azóta — és ebben a viszonylatban 30 év rövid idő — a kezdeti elindulásból egy új tudomány fejlődött ki: a *Radarcsillagászat*. Ma már naprendszerünkben a Szaturnusz távolságáig lehet égitesteket észlelni, sőt több esetben bolygó felületeket térképezni rádió visszhangokkal s ma a radar jelek pontosan mérhető futási ideje az általános relativitáselméletnek is egyik fontos kísérleti támaszát adja.

Mindezekben a modern radarcsillagászati mérésekben lényeges szerepet játszik a hosszú idejű jelintegráció módszere, melyet elsőként a magyar kísérlet vezetett be.

Az első mikrohullámú kísérletek. A „Bay csoport".

Amikor Magyarország a külső nyomás és a szerencsétlen belső elhatározások folytán belépett a II. világháborúba, igen valószínűvé vált, hogy bombatámadásokat fogunk kapni. Ezért a Hadi Műszaki Tanács javaslatára a Honvédelmi Minisztérium elhatározta, hogy Magyarországon mikrohullámú kísérleteket kell végezni. Ezek célja kettős volt: egyik a mikrohullámú hírközlés, másik pedig (a fontosabb feladat) repülőgépeknek mikrohullámú felderítése és helyzetmeghatározása. A Haditechnikai Intézet a „szövetséges" németekkel való érintkezés folytán mindkét problémáról tudott, de mindkét kérdésnek úgyszólván csak a létezését ismerte, mert a német bizalmatlanság a szövetségessel szemben is a legteljesebb titoktartás mögé burkolózott. A mikrohullámú hírközlés problémáiról mi függetlenül is tudtunk az 1942 elejéig még hozzánk érkező amerikai folyóiratokból. Ugyancsak ezekből értesültünk, hogy az angolszász államokban kifejlesztés alatt áll egy „radio locater" nevű eszköz repülőgépek felderítésére. Az Electronics 1941 októberi száma azt is megmondta, hogy az USA 1942. évi katonai

Előadás a debreceni Fizikus Vándorgyűlésen, 1975

gyengeáramú költségvetésének több, mint fele (118 millió dollár) van a rádió lokátor céljaira előirányozva. Amerika akkor még nem volt hadviselő fél, folyóiratai mégis csupán a lokátor nevét említették, még a mérési eljárás alapelveit is titokban tartva.

Így állott a helyzet, mikor a Honvédelmi Minisztérium elhatározta, hogy a magyarországi mikrohullámú kísérletekre az Egyesült Izzó Kutatólaboratóriumát kötelezi. A kivételes háborús törvények értelmében az Izzó köteles volt az összes költségek viselésére, beleértve azt is, hogy a Kutató személyzetének egy része teljes munkaidejét fogja a mikrohullámú kísérletekre fordítani. A kísérleteknek teljes titoktartás mellett kell folyniuk, tehát ha az Izzó egyéb (pl. Kísérleti Rádiócsőgyártás, mechanikai műhelyek stb.) személyzete a munkában részt vesz, azoknak csupán a közvetlen feladatot szabad tudniuk, a célt nem. Ugyanez vonatkozott az Izzó vezetőségére. (Midőn a munka elindításakor a honvédelmi miniszter Aschner Lipótot, az Izzó vezérigazgatóját és engem fogadott, Aschner kijelentette: „... vállalom, amit eddig sohasem tettem, hogy a pénzt mi adjuk, de nem tudom, mire.")

A miniszteri akták megszerveztek egy ún. „Bay csoport"-ot. Ez mintegy 10 akadémikus végzettségű kutatóból és mintegy 30 elektronikus műszerészből állott, a személyek pontos megnevezésével és titoktartásra kötelezésével. A csoportba belevontam a műegyetemi Atomfizikai Tanszék két tanársegédét, Papp Györgyöt és Simonyi Károlyt is. Sok ide-oda való tárgyalást tett szükségessé, hogy a listámon két, az akkori törvények értelmében zsidónak minősülő mérnök is szerepelt. Winter Ernő sok eredeti gondolatot alkalmazó munkájára szükségünk volt a mikrohullámú csövek kifejlesztésében, Dallos György pedig már a csoport megszervezése előtt is élen járt a mikrohullámú vevőkörök kikísérletezésében. A Vezérkari Főnökség ellenvetése az volt, hogy a németektől nem fogunk információkat kapni, ha a csoportban zsidó személyek is lesznek. Jáky József alezredes (a Haditechnikai Intézet híradóosztályának vezetője, később bombatámadás áldozata) érvelése, hogy a németek a magyarok iránt általában is bizalmatlanok, segített. Kiderült ez már akkor, mikor a Honvédelmi Minisztérium ki akart engem küldeni Berlinbe, hogy legalább az alapkísérletekben támogatást kapjunk. A német válasz az volt, hogy civil személyt nem lehet katonai titkokba beavatni. A magyar Minisztérium erre ki akart nevezni ezredesnek, de a németek visszautasították ezt a próbálkozást is. Végül Winter és Dallos is tagjai lehettek a csoportnak. És minden, amit a mikrohullámok és a rádió lokátor terén csináltunk, a saját elméleti és kísérleti munkánk eredménye volt. *Sok már előzőleg felfedezett, de titkolt elvet, eljárást kellett újra felfedeznünk.*

Lényeges segítséget jelentett a csoport munkájában, hogy a csoport összes tagjai, mérnökök, műszerészek, katonai felmentést nyertek. Ugyancsak, hogy anyagbeszerzésre, más gyárakban való munkálatok elvégzésére, elsőrendű prioritást kaptunk. Állott ez az akkor nagyon szűkös benzin ellátásra is, terepkísérletek elvégzése céljából. (Az én automobilom még egy nagy „Ü" betű jelzést is kapott, mely ünnep napokon való járásra is jogosított, holott a pesti humor szerint ezt csak az kapta, akinek jó az „üsszeköttetése".)

Ezek a kivételezések, továbbá a csoport tagjainak lelkes tárgyszeretete és a tudat, hogy egy kimondottan védelmi fegyver kifejlesztésén dolgozunk, meggyorsították a munkánkat.

Mindenekelőtt a mikrohullámú rezgésgerjesztés kérdésében kellett dönteni. A klystron és magnetron alapelvei már abban az időben ismeretesek voltak, de hazai kifejlesztésükre a mi szerény lehetőségeink között alig gondolhattunk. Minden kedvezés és anyagi támogatás ellenére, hol voltunk mi a 118 millió dollártól?! Így tehát a deciméteres és centiméteres hullámok helyett jó középútnak látszott a kb. fél méteres hullám, melynek megvalósítása triódás adócsővel remélhető volt. Winter Ernő és Budincsevits Andor szellemes ötletek révén létrehoztak egy kis adócsövet (EC 102), mely 50—60 centiméteren 2 watt nagyfrekvenciás teljesítményre volt képes. Ez a cső már alkalmas volt a mikrohullámú híradástechnika alapkísérleteinek elvégzésére. A Dallos György által szerkesztett adó-vevő először az újpesti üveggyár tornya és a Naszály hegy (Vác mögött) között hidalt át mintegy 30 kilométer távolságot. A későbbi terepkísérletekben 50—100 milliwatt teljesítménnyel 100 kilométeres hatótávolságig jutottunk el.

Ezzel a mi kísérleti munkánk a távbeszélés szempontjából lezárult. Eredményeinket átadhattuk a Standard Villamossági Rt-nak, hol a gyakorlati kidolgozást Istvánffy Edvin igazgató csoportja végezte el. Mi pedig áttérhettünk a rádió lokátor kérdéseire.

Radarkísérletek

A rádió lokátor mai internacionális elnevezése Radar, mint a Radio Detection and Ranging rövidítése.

A rádió hullámok visszaverődése révén véghezvitt távolságmérés elve már az 1920-as évek óta ismeretes volt az ionoszfera kutatásban. Ott két elv nyert alkalmazást.

1. Az *impulzus módszer* (Breit és Tuve, 1926). T időközökben ismételve τ időtartamú impulzusokat küldünk ki. Ha a visszavert impulzusok t időkéséssel érkeznek vissza, akkor a visszaverődés távolsága $s = \frac{1}{2} ct$, hol c a rádióhullámok (fény) terjedési sebessége.

2. A *frekvencia moduláció módszere* (Appleton és Barnett, 1925). Az adás frekvenciáját T időközökig tartó, $dv/dt = const$, sebességgel fűrészfogszerűen moduláljuk. Ha a visszavert hullám t időkéséssel érkezik, a kimenő frekvenciához képest

t dv/dt lebegést mutat, melynek megmérésével t, tehát s, meghatározható.

A visszavert jelek észlelése az ionoszfera kutatásban viszonylag könnyű feladat a rétegek nagy kiterjedése és nagy visszaverő képessége folytán. A kis látószögű repülőgépek (hadihajók) felderítésében a visszavert energia kicsiny, azonkívül új feladatként mutatkozik az iránymérés. Utólag tudjuk, hogy az angol hadvezetés — Robert Watson-Watt javaslatára —, titokban már 1935 óta (a németeket sok évvel megelőzve) foglalkozott a felderítésnek ezzel a módszerével. A német radar kifejlesztése csak a II. világháború kitörése után indult el.

Érthető tehát, hogy mikor munkánkat elkezdtük, figyelmünket elsősorban az energia kérdésére irányítottuk. Hogy a rendelkezésünkre álló szerény eszközökkel eredményt érjünk el, szükségessé vált a módszer elméletének gondos kidolgozása. Ezt a munkát Papp György, Simonyi Károly és Sólyi Antal munkatársaimmal végeztem.

A ν_0 vivőfrekvenciájú, τ időtartamú impulzus Fourier- spektruma lényegében a ν_0 körüli $\pm\Delta\nu = 1/\tau$ frekvenciasávban helyezkedik el. A vevőkészülék zaja a vevő sávszélességének négyzetgyökével arányos, tehát sávszűkítéssel csökkenthető. De a csökkentés egyfelől csökkenti a jel-amplitudót, másfelől megnagyobbítja, széthúzza a jel időtartamát. Viszonylag egyszerű számítással megtalálhatjuk az optimumot: legkedvezőbb a jel/zaj viszony, ha a vevő sávszélessége a használt impulzus $1/\tau$ sávszélességével egyenlő. A vevő ez esetben megőrzi az impulzus eredeti τ időtartamát is, ami az időmérések szempontjából fontos. Ugyancsak érvényes, hogy a vevő sávszélességének ilyen illesztése mellett a jel/zaj viszony az impulzus energiájával arányos, de független attól, hogy hosszabb, vagy rövidebb jelekkel dolgozunk.

A módszer érzékenysége tehát ismétlődő jelek esetén az adás középenergiájától függ. Ha az időmérések pontossága érdekében rövid τ időtartamokkal dolgozunk, akkor nagy csúcsteljesítményekre van szükség. Ebből az is látszik, hogy a frekvenciamoduláció módszere, hol az adás folytonos, ugyanolyan igényt támaszt a középteljesítmény szempontjából, mint az impulzustechnika. De ez utóbbi módszer áttekinthetőbb eredményeket ad, tehát emellett döntöttünk.

Ennélfogva az adócsővel szembeni követelmény: mennél nagyobb középteljesítmény mellett mennél nagyobb csúcsteljesítmény. Mindjárt itt említem meg, hogy Winter Ernő és Budincsevits Andor az említett EC 102 csövet tovább fejlesztve létrehozta az EC 108 jelzésű csövet, mely 55 centiméteren 40 watt középteljesítménnyel 10 kilowatt csúcsteljesítményre volt képes.

Az energia viszonyok további mérlegelése a következőkhöz vezet:

A P_k kimenő középteljesítmény R távolságban $P_k/4\pi R^2$ fluxust ad. Ha a mérendő tárgy területe a, akkor a tárgy $P_k a/4\pi R^2$ teljesítményt vesz fel. Ha a tárgy visszaverő képessége ϱ és ha feltételezzük, hogy a tárgy által visszavert energia a térben egyenletesen oszlik szét, továbbá ha a visszavert teljesítményt A területű antennán fogjuk fel, akkor a vevőkészülékbe

$$P_v = \frac{P_k a A \varrho}{(4\pi R^2)^2} \tag{1}$$

teljesítmény jut. Javul a helyzet, ha az A felületű reflektort nemcsak a vételnél, hanem az adásnál is kihasználjuk. A kiküldött energia ez esetben nem egyenletesen terül szét a térben, hanem (többékevésbé) irányított nyalábban marad. A teljesítmény a nyaláb középvonalában így egy

$$G_A = \frac{4\pi A}{\lambda^2} \tag{2}$$

faktorral növekszik, hol λ a hullámhossz.

az (1) és (2) egyenletek összesítésével a vevőbe jutó teljesítményre

$$P_v = \frac{P_k a A^2 \varrho}{4\pi\, \lambda^2 R^4} \tag{3}$$

adódik.

A (3) egyenletből (melyet manapság „radar egyenlet"-nek szokás nevezni) a következő fontos következtetéseket vonhattuk le:

1. A visszakapott energia a távolság negyedik hatványával csökken. A radar hatótávolságának kiterjesztése tehát az energiával szemben rohamosan növekvő követelményeket támaszt.

2. A hullámhossz csökkentésével az energiaszükséglet négyzetesen csökken. Ebben, és az irányíthatóságban van a rövid hullámok előnye.

3. Rendkívül fontos a nagy kiterjedésű reflektor alkalmazása. Például: egy köralakú reflektor tányér átmérőjének megkétszerezése (szintén negyedik hatványú függés) kétszeres hatótávolságot ad.

Ezeknek a szempontoknak figyelembevételével kezdtük meg radar kísérleteinket 1942 őszén. Mivel egy közbenső adócső típus (EC 103) 1—2 kilowatt csúcsteljesítménnyel hamarosan rendelkezésünkre állott, továbbá mivel Dallos György munkája révén a mikrohullámú keverés (heterodynálás) technikája előrehaladt, alig fél évvel a munka elkezdése után (1943 áprilisában) már észleltük az első radar jeleket. Földi tárgyakat (pl. dunai uszályokat) tudtunk megfigyelni a katódsugárcső ernyőjén 18 kilométer távolságig a Tungsram Standard-épületének tetejéről. (Az eredményen felbuzdulva egy repülőgép körözését kértem a katonáktól. A gép megjelent, de utasításai a katonai ranglétrán keresztül megváltoztak s a gép közvetlenül az Izzó fölött keringett alacsonyan csaknem egy óra hosszáig. Akkori technikánk szerint ilyen közelről nem tudtuk a visszavert jelet az adás zavaró hatásától elkülöníteni, tehát a kísérlet sikertelen maradt; viszont a gép rettentő zaja úgyszólván megbénította egy órára az Izzó munkáját. Utána Aschner Lipót, ki a kísérletről persze nem tudott, azt kérte tőlem, érjem el a katonáknál, hogy ha már ingyen dolgozunk

nekik, legalább a gépeiket ne éppen a mi fejünk fölött gyakorlatoztassák.)

További kifejlesztést nyert 1943 folyamán

az *adókészülék* a mikrohullámú rezgőkörökkel (Szepesi Zoltán),

az *adócső* és a *keverő diódák* (Winter Ernő, Budincsevits Andor),

az *impulzusgenerátor* (Papp György, Sólyi Antal, Magó Kálmán),

a *vevőkészülék* (Dallos György),

a *katódsugárcső áramkörei* (Papp György, Magó Kálmán),

a *parabolikus reflektor* és az *iránymérés* (Simonyi Károly).

E fejlesztések révén már 1944 elején szóba kerülhetett egy mikrohullámú radar típus gyakorlati kialakítása. A Standard Villamossági Rt. Istvánffy Edvin vezetésével a mi tapasztalataink alapján elkezdte az áramkörök gyakorlati kialakítását. A Haditechnikai Intézet pedig más gyártó cégek bevonásával elindította a kb. 3 méter átmérőjű parabolikus reflektorok gyártását. Ezek a műszereket befogadó kis házikóval egy forgó ágyútalpra voltak szerelendők, a reflektor oldal- és magassági szögének változtathatóságával. A mi feladatunk ezek után elvi kérdések tisztázása helyett inkább a további részletek kifinomítása volt.

A Holdvisszhang gondolata

Ez volt a helyzet, amikor 1944. március elején (előzetes becslésekkel fölkészülten) a csoportot új feladat elé állítottam: „Meg fogjuk lokátorozni a Holdat!"

A gondolatot a csoport tagjai lelkesen fogadták. Úgy látszik, minden kísérletező, természettudománnyal foglalkozó kutatóban él a vágy, hogy a földi kísérletezés határaiból kiszabadulva ott végezzen *kísérleteket*, ahol eddig csak *megfigyelés* volt lehetséges. Az is áll, hogy mihelyt a kutató új, nehezebb feladatot lát, új kedvet kap az eddig meg nem oldott apróbb részletek kifinomítására. Megértette ezt Jáky József alezredes is, az összekötő tiszt köztünk és a katonák között. Így történhetett, hogy a II. világháború utolsó évében a Tungsram csoport egy tiszta fizikusi feladatot is kitűzhetett maga elé, miközben a múlhatatlanul szükséges katonai támogatást (gondoljunk csupán a felmentésekre!) gyakorlati katonai célok elérésére kapta. (Később Gábor Dénes Angliából írta nekem: „... szeretném látni, mit szólna a főnököm, ha azt proponálnám, hogy a Holddal akarok érintkezésbe lépni!") Ez a támogatás tartott az ország német megszállása (1944. március 19.) után is és csak az 1944. október 15-iki nyilas hatalomátvétellel ért véget.

Papp György és Simonyi Károly munkatársaimmal 1944. március elején elkezdtük a részletes Holdradar számításokat. A távolság negyedik hatványának nyomasztó súlya persze a fő probléma. A Hold mintegy 400 ezer kilométerre van tőlünk, ami 10-nek 15—16-odik hatványával csökkenti az esélyeket a földi radarhoz képest. Hogy a feladatot mégsem adtuk fel mindjárt az elején, annak köszönhető, hogy a Hold kúpszöge ($a/4\pi R^2$ a (3) egyenletben) viszonylag nagy és hogy, mivel nem akarunk pontos távolságmérést végezni, viszonylag hosszú impulzusokkal dolgozhatunk, ami az adótól kisebb csúcsteljesítményt kíván. Persze, van két kérdés, melyeket éppen a kísérleteink révén akarunk megválaszolni (innen a kísérletek tiszta tudományos jellege):

1. kijutnak-é a mikrohullámok a világűrbe?

2. mekkora a Hold visszaverő képessége (ϱ) mikrohullámokon?

Munkahipotézisként $\varrho = 1/10$-et használtunk, ami a földfelület visszaverő képességének nagyságrendje és föltételeztük, hogy az 1 méter körüli mikrohullámok az ionoszfera rétegeken és a Föld-Hold közötti tér kicsiny plazmasűrűségén akadálytalanul haladnak át. Ugyancsak fölvettük, hogy a Holdról visszavert energia a térben egyenletesen szóródik szét.

A rendelkezésünkre álló adási energiát és a parabola reflektort figyelembe véve a pontosított számítások azt mutatták, hogy mérhető jel/zaj viszonyt kaphatnánk, ha az impulzus időtartamát 0.05 másodpercnek választva a vevő sávszélességét a megfelelő 20 Hz-re illesztenénk. A vevő sávjának szűkítése önmagában nem nehéz feladat, de a Hold-kísérletekben a szűk sáv alkalmazása új igényt támaszt. Mivel a jel visszatérte kb. 2.5 másodperc elteltével várható, az adó *és* vevő rezgésszámainak e hosszú időtartam alatt nem szabad egymástól több mint 20 Hz-el eltérniük. Megvalósítható lenne ez kristályvezérléssel, de mi akkor messze állottunk attól, hogy radartechnikánkba azt bevezessük. Nem maradt tehát más választásunk, mint hogy a vevő nagyfrekvenciás sávját kb. 2×10^5Hz szélességűre vegyük (hogy az adó frekvencia ingadozásait átfogja) és a sávszűkítést a detektálás *után* alkalmazzuk. Ez az eljárás egy nagyságrenddel kisebb jel/zaj viszonyt eredményezett, összehasonlítva azzal, amit kaphattunk volna, ha a sávszűkítést a vevő bemenő fokozataiban tudtuk volna alkalmazni. Így végül is oda jutottunk, hogy — ha minden a legjobban megy —, a holdradarunk jel/zaj viszonya kb. 1/10-re várható.

Akkori konvencionális megítélés szerint, ha egy kísérlet végeredményében a jel egy nagyságrenddel kisebb, mint a zaj, a kísérlet sikertelennek minősítendő. Adjuk fel a tervet?

Úgy éreztem, ha a 15 nagyságrend reménytelenségéből elindulva és itt is - ott is néhány nagyságrendet fölszedve végül is elérkeztünk oda, hogy csupán egy nagyságrenddel maradunk a cél elérése alatt, akkor kell találnunk valamilyen módszert, mely a célhoz hozzá segít. Erre az utolsó lépésre a jelismétlés és jelösszegezés gondolatát javasoltam, mely rendkívül termékenynek bizonyult.

(A jelismétlés segít a földi radarban is. Ha a jeleket gyakran ismételjük s a katódsugár időeltérítését az adóimpulzushoz szinkronizáljuk, a

visszavert jel az ernyő azonos helyére kerül. A fluoreszkáló ernyő és a szem mintegy tized másodpercre kiterjedő tehetetlensége így számos jelet lát egy helyen, ami a képet határozottabbá teszi.)

A Holdnál az oda-vissza futás ideje két és fél másodperc, tehát ha 3 másodpercenként 1 jelet küldünk ki és a visszavert jeleket összegezni akarjuk, akkor 100 jel esetén a jeleket 5 percig, 1000 jel összegezésénél pedig 50 percig kell megőriznünk. (Sem a katódsugárcső, sem a szem nem segít e műveletben.)

Ha a jeleket 50 percig veszteség nélkül akarjuk megőrizni és összegezni, a kumuláló szerv időállandója több órás kell legyen. A szokásos kondenzátor - ellenállás tároló nem jöhet számításba, mert nagyon nagy kapacitást és extrém jó szigetelést kívánna. Még általánosabban szólva: abban az időben az elektronika nem rendelkezett ilyen hosszú időkre alkalmas „memória" szervekkel.

Különféle meggondolások után egy az elektronikától távol álló, nem konvencionális módszert javasoltam: a hidrogén coulométert, vagy voltamétert, melyben az áram hatására kivált hidrogén gáz vékony kapillárisban a folyadék - meniszkuszt az áramintegrállal arányosan tolja el. A további terv így alakul:

A kísérletben egymásután kötünk össze 10 voltamétert a vevőkészülék kimenő fokozatával, az adóimpulzussal szinkronizált időrendben. A 10 voltaméter közös anóddal egy üvegedényben van összeépítve s az adás és vétel kapcsolásait egy forgó kapcsoló végzi. A kapcsoló forgásideje 3 másodperc.

Ily módon mindegyik voltaméter az adóimpulzus után meghatározott időpontban kerül bekapcsolásra. Az időskála így definiálva van. A jel, mely a Holdról visszajön, mindig ugyanarra a voltaméterre esik s ott összegezést nyer. Ugyanabban a voltaméterben a zaj (áramingadozás) pozitív és negatív előjelű, tehát statisztikusan közepelődik. A többi voltaméter csupán a zajt észleli, így a kísérlet „zéró vonal" — át adja, melynek statisztikus ingadozása a kísérlet zajának mértéke.

A valószínűségszámítás szabályai szerint N impulzus vétele esetén a zaj $\sqrt{N}$-szeresen növekszik. A jel ezzel szemben lineárisan nő, azaz N-szeres lesz. Így N kísérlet összegeként a jel/zaj viszony $\sqrt{N}$-szeresen javul. Azt jelenti ez a mi esetünkben, hogy 1000 impulzus észlelése közben, tehát egy 50 percig tartó kísérletben a vevőkészülék eredeti egy tized jel/zaj viszonya 30-szorosan javul, azaz a jel mérhető módon a zavarnívó fölé emelkedik.

A kísérlet sikerének ez a reménye már megérdemelte, hogy a kivitelhez hozzálássunk.

Meg kell említenünk, hogy a jel összegezésének és a zaj relatív csökkentésének általunk akkor kezdeményezett módszere ma általánosan használatos a radarcsillagászatban. Az elektronika a szilárd testek fizikáján alapuló sokféle (mágneses, elektromos stb.) módot dolgozott ki memória szerv gyanánt, mely az időben lefolyó jelenségeket regisztrálja. Az így leírt jelek számszerű összegezése, kivonása, vagy általában bonyolult programok szerinti analízise pedig az elektronikus számítógépek feladata. (Erre később visszatérünk.)

Persze, abban az időben e memória szervek nem állottak rendelkezésünkre és a computer technikát is akkoriban még csupán elkezdte Neumann János, nagy hazánkfia, az Egyesült Államokban. A mi voltaméterünk nemcsak memória szerv volt, hanem az összegezésben pótolta a számítógépet is, de persze bonyolultabb analitikai feladatokra aligha lett volna alkalmas. Ez az összegező eljárás lefordítható a rádiótechnika nyelvére is: az eljárás olyan sávszűkítésnek felel meg, melynek sávszélessége reciprok értéke annak az összes időtartamnak, mely alatt a memória szerv (egy voltaméter) a kísérletben a vevőhöz van kapcsolva. A mi esetünkben egy voltaméter minden körforgás alatt 0.06 másodpercig aktív, ami 1000 impulzusnál 60 másodperc. Tehát a vételünk effektív sávszélessége 1/60 Hz. Mint látni fogjuk, az ilyen és ennél is szűkebb sávú vétel teszi lehetővé a radarcsillagászatot. Persze, a kicsiny energiaingadozás céljából használt szűk sáv a fizika általános törvényei szerint hosszú megfigyelési időket tesz szükségessé, mert a jel/zaj viszony a megfigyelési idővel nem arányosan, hanem csak négyzetgyökösen javul.

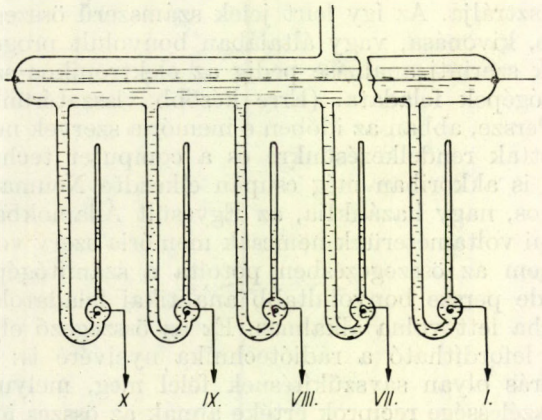
Az elvek tisztázása után hozzákezdtünk a voltaméter kísérletekhez. Ezeket Budincsevits Andor tervezése alapján Várbiró Emil üvegtechnikus kivitelezte. Ugyancsak Budincsevits Andor tervezte meg a forgó kapcsolót és kivitelezte Patak János és Pintér János műszerészek segítségével. A coulométerek és a forgó kapcsoló vázlatai az 1. ill. 2. ábrákban láthatók.

A nógrádverőcei kísérletek

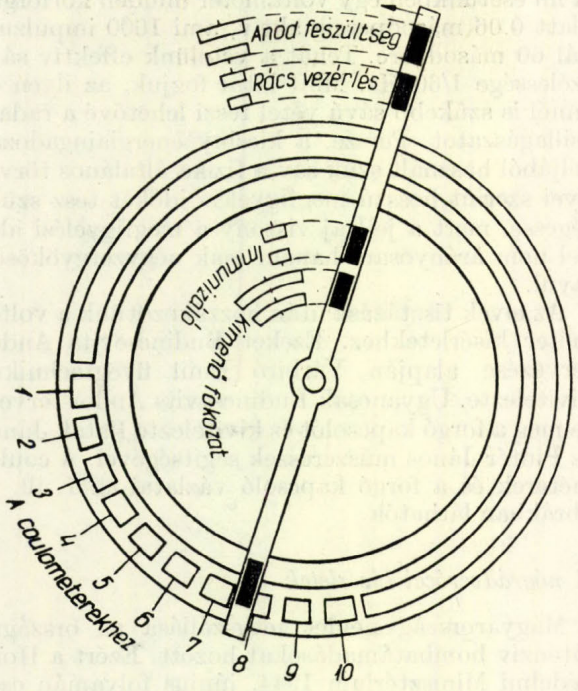
Magyarország német megszállása az országra intenzív bombatámadásokat hozott. Ezért a Honvédelmi Minisztérium 1944. június folyamán csoportunkat Nógrádverőcére, egy ottani akkor üresen álló penzió épületeibe helyezte át. A penzió kertjében állítottuk fel (magas deszkakerítés mögé rejtve) az időközben ágyútalpra szerelt reflektort. Az ágyútalpat a kis műszer házikóból belülről lehetett forgatni, ugyancsak a reflektor tengelyének magassági szögét állítani.

(A fizikusok nem állhattak ellen a kísértésnek, hogy a házikóban egy Foucault-inga kísérletet rögtönözzenek. A fonálon lógó kicsiny inga nyugodtan végezte lengéseit mindaddig, míg valaki a házikót csendesen, különben észrevétlenül, el nem forgatta. Érdekes megemlíteni, hogy bár mindenki tudta, mi fog történni, mégis mikor a kis inga (az ember egocentrikus világnézete szerint) „kilendült az eredeti síkjából", általános felkiáltást váltott ki. Valaki azt is megjegyezte — a Mach-principiumra gondolva —, hogy „ez az inga tudja, hogy a távoli galaktikák léteznek").

A nyár folyamán előrehaladt az adó és vevő készülékek kifinomítása és a földi radarhoz szüksé-



1. ábra. A coulométerek vázlata.



2. ábra. A forgó kapcsoló vázlata.

ges katódsugár körök kifejlesztése. A voltaméterek és a forgó kapcsoló ,,vak'' kísérleteit unokaöcsém, Bay Zoltán műegyetemi hallgató végezte. Miután úgy éreztük, hogy azok a várakozásnak megfelelően dolgoznak, augusztus végén és szeptember elején néhány aktuális, Hold felé irányított adást próbáltunk meg. Ezek sikertelenek maradtak, mivel nem tudtuk elérni, hogy 50 percig az összes készülékek zavartalanul dolgozzanak. Persze, elegendő, ha egy készülék nem működik jól, a kísérlet megakad. Hozzájárult a sikertelenséghez az ottani nem kielégítő áramszolgáltatás is.

Reményünket, hogy hamarosan mégis el tudunk érni sikeres holdvisszhangokat, meggátolta az, hogy szeptember végén a hadvezetőség laboratóriumunkat Újpestre rendelte vissza. (Gondolom azért, mert Nógrádverőce környékén védelmi állások kiépítése kezdődött. Mindenképpen jó, hogy visszajöttünk, mert a háború után egyszer arra járva láttam, hogy az egész ottani telepünk bombatámadás áldozatává lett és romokban hevert.)

Az Újpestre való visszaköltözésünk után már nem lehetett komoly kísérletezésre gondolni. Október 15. után a nyilas rendszer a csoportot nem ismerte el s a katonaköteles tagokat bevonultatta. A bombatámadások fokozódtak, a főváros és az ország lakosainak rendezett élete megszűnt. A lakosság túlnyomó többsége már csak a felszabadulásig való túlélésre rendezkedett be, az elkötelezett kisebbség pedig a csodavárás narkozisába merült.

(Persze, nem feladatom nekem ez idők leírása, de nem hallgathatom el, hogy a radar munkánkkal kapcsolatban mi is egy csodafegyver hőseivé léptünk elő. Híre ment annak, hogy én egy csoporttal titkos munkán dolgozom. Október végén a pesti utcán megállított valaki és gratulált ahhoz, hogy én találtam fel a ,,Mio-sugarakat''. Abban az időben a katonaság a polgári rádiót is felhasználta hírközlésre és a budapesti rádióban gyakran lehetett hallani, hogy ,,Mio Székesfehérvár'', ,,Mio Nagykanizsa'', stb. Az ilyen üzenet az ottani vadászgépeknek felszállási tilalmat jelentett. A csodavárók ebből a Mio-sugárzást csinálták, mely megbénítja és leszállásra kényszeríti az ellenséges repülőgépeket. Az ismerősömnek hiába magyaráztam, hogy a Mio-sugár agyrém, ilyesmit sem én, sem más soha fel nem talált, válasza az volt: ,,Tudom, hogy önnek így kell beszélnie, még egyszer gratulálok!'')

Az újabb holdvisszhang próbálkozások

A bombázások megszüntével a csoport tagjai visszaszállingóztak. Sajnos nélkülöztük a sopronkőhidai fegyházban öngyilkosságba kergetett Dallos Györgyöt és Simonyi Károlyt, aki hadifogoly lett. A katonai radar többé nem volt téma, de 1945. február végén újra kezdtük Újpesten a holdradar felállítását. Röviddel ezután az Egyesült Izzó leszerelésre került s az összes műszereinket elvesztettük.

1945 nyarán elkezdtük egy új holdradar készülék tervezését. A félméteres hullámhosszon dolgozó berendezés tervét el kellett ejtenünk, mert sem a mikrohullámú csövek, sem a parabola reflektorok nem állottak többé rendelkezésünkre.

Ezért érintkezésbe léptem Istvánffy Edvinnel, ki a háború utolsó évében a Standard Villamossági Rt. mérnökeivel megvalósított egy felderítés céljaira szolgáló radart, mely 2.5 méter hullámhosszon dolgozott. Az, hogy ez a készülék repülőgépek távolság-és irány méréseiben nem volt olyan pontos, mint a mikrohullámú rendszerünk, nem jelentett okvetlenül hátrányt a Hold kísérletekben (hosszú impulzusok!). Az 5-szörösen nagyobb hullámhossz ugyan 25-szörös veszteséget jelent az energia irányításában, de ezt a veszteséget részben kiegyenlíthettük nagyobb antenna felület alkalmazásával. Számításainkat az új hely-

zetre átvetítve azt láttuk, hogy a régebbi nagyságrendeket egy új, hosszabb hullámú berendezés is megvalósíthatja.

A sikeres kísérletek

Istvánffy szívesen vállalta a feladatot és megtervezett egy 6×8 m² kiterjedésű nagy vaskeretet, mely masszív forgó állványon van elhelyezve úgy, hogy magassági szöge is változtatható. A keretet és az állványt az Izzó gépműhelye készítette el Patak János vezetésével. A kereten 36 dipólus antenna foglal helyet a megfelelő tápvezetékekkel. Az antenna képe a 3. ábrán, a Kutató Laboratórium tetején való elhelyezésének vázlata pedig a 4. ábrában látható. A radar berendezés műszerei a laboratórium második emeletén, két szobában közvetlenül az antenna alatt voltak. Az egyik szobában elektromosan árnyékolt ketrecben nyert elhelyezést a berendezés legérzékenyebb része: a vevő végerősítő fokozatai és a voltaméterek a forgó kapcsolóval.

Adó- és vevőkészülék gyanánt a háború utolsó évében a Standard által gyártott és visszamaradt berendezéseket használtuk, melyeket a Honvédelmi Minisztérium rendelkezésünkre bocsátott. Ezeknek a holdkísérlethez való adaptálását Barta István végezte el. Ugyancsak ő építette meg a vevő sávszűkítő, végerősítő fokozatait.

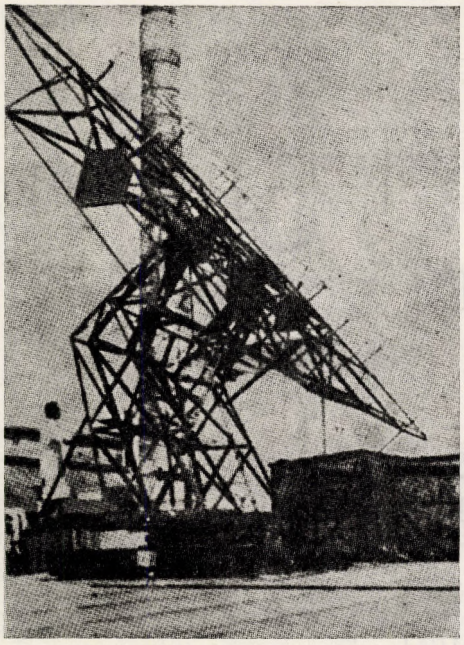
Az adóimpulzus időtartama a forgó kapcsoló által szabályozva 0.06 sec., a csúcsteljesítmény 3—4 kw volt. Az impulzus 3 másodpercenként ismétlődött. Az időskálát a váltóáram 50 periodusára alapított szinkron motor adja.

A vevő nagyfrekvenciás részének sávszélessége 200 kHz, mely elegendő nagy, hogy az adó frekvencia ingadozásait átfogja. A detektálás utáni körök effektív sávszélessége kb. 20 Hz, ami elegendő ahhoz, hogy az adóimpulzus Fourier-spektrumát átfogja.

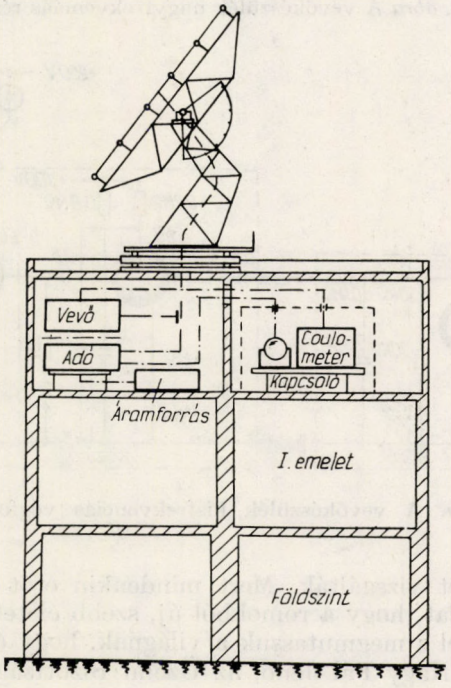
A forgó kapcsoló vezérli az adóimpulzusok kibocsátását, utána (megfelelő idő elteltével) az egyes voltamétereknek sorrendben a vevő kimenő fokozatára kapcsolását. Amellett, hogy a forgó kapcsoló így a kísérlet időkoordinátáját létesíti, még egy külön feladatot is elvégez: immunizálja a vevőt (sőt annak több fokozatát is külön-külön) arra az időre, míg a nagy adási energia feszültségi hullámokat hoz létre a környezetben, melyek az egyes körök munkapontjait nem kívánt hosszú időre eltolhatnák. A forgó kapcsoló ezt a műveletet (melyet a munkatársak „döglesztés"-nek neveztek el) külön beépített szegmensekkel és mágneses relékkel végzi.

Az adókészülék kapcsolási vázlata az 5. ábrában látható. A 6. ábra szemlélteti a vevőkészülék nagyfrekvenciás részét. A vevő sávszűkítő végfokozatainak kapcsolási vázlatát a 7. ábra mutatja.

A berendezés 1945. december végére összeépült s a kísérletek megindultak. A kutató csoport közben lelkes fiatalemberekkel bővült s visszajött Simonyi Károly.

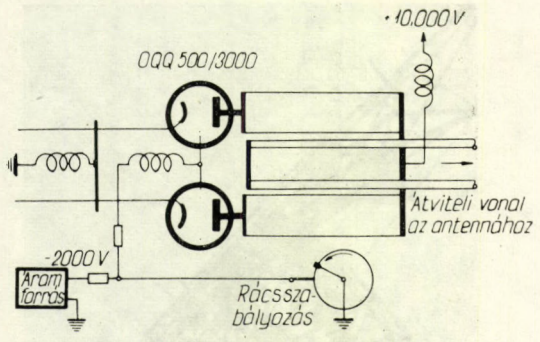


3. ábra. Az irányítható antenna reflektor.

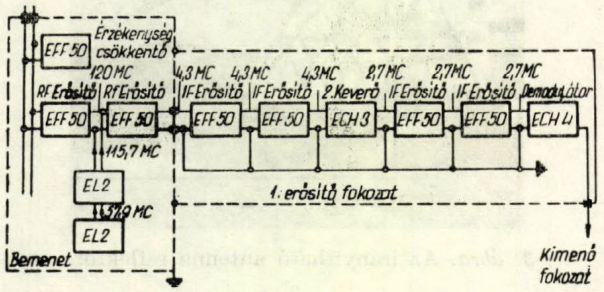


4. ábra. Az adóantenna és a radar berendezés elhelyezése a Tungsram Kutató Laboratórium tetején és felső emeletén.

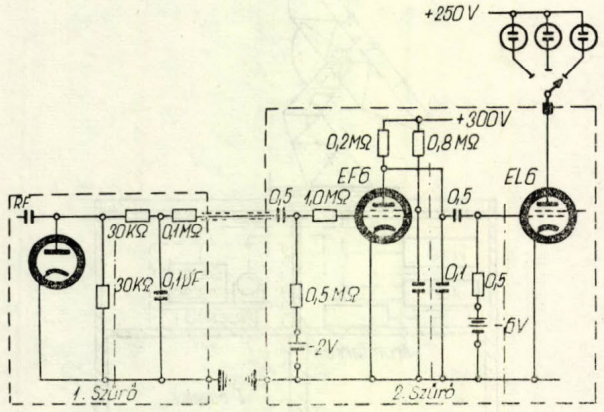
Nagy segítséget jelentett az akkori szűkös élelmiszerellátás és a nehéz közlekedési viszonyok között, hogy a csoport tagjai az Izzóban szállást és ellátást kaptak. Csak meghatottsággal tudok visszaemlékezni arra az áldozatkészségre, mellyel akkoriban az Izzó munkásai megosztották szűkös kenyerüket a tudósokkal és technikusokkal, kik



5. ábra. Az adókészülék vázlata.



6. ábra A vevőkészülék nagyfrekvenciás része.



7. ábra. A vevőkészülék kisfrekvenciás végfokozatai.

az eget vizsgálták. Mert mindenkin erőt vett a gondolat, hogy a romokból új, szebb életet indítsunk el s megmutassuk a világnak, hogy élen járunk. Nagy Pál Jenő, az Üzemi Bizottság tiszta látású vezetője minden segítséget megadott.

A kísérletek főképp éjszakai időben folytak (persze, nem azért, mert a Hold „nem jár" nappal, hanem azért, mivel a nappali órákban nagy volt az Izzó elektromos zavarnívója).

Az antenna irányítását tiszta időben vizuálisan végeztük, de felleges időkre való tekintettel és állandó ellenőrzésképpen a Hold égi koordinátáit Takács Lajos és Horváth Tibor folyamatosan számolták a szabadsághegyi Csillagda adatai alapján, melyeket Detre László igazgató bocsátott rendelkezésünkre. Minden kísérletet, mely 30—50 percig tartott, megismételtünk egy „vak" kísérlettel, melyben az antenna nem volt a Hold felé irányítva. A kísérleteket Papp György, vagy Simonyi Károly vezetésével Pócza Jenő, Bodó Zalán, Csiki Jenő, Tary László, Takács Lajos, Horváth Tibor és Bay Zoltán végezték. Sok elkezdett kísérletet akasztott meg az a körülmény, hogy nehéz volt a berendezés különálló részeinek zavartalan együttműködését biztosítani.

Január vége felé egyre biztatóbb kísérlet sorozatokat kaptunk s végül február 6-án érkeztünk el oda, hogy az aznapi sikeres és az előző biztató kísérletek statisztikai összegezésével határozottan állíthattuk, hogy a jelösszegezés a jelet a zavarnívó fölé emelte.

A „vak" kísérleteken felül Papp György még egy ellenőrző eljárást dolgozott ki, melyet „műhold"-nak nevezett. Az erősítő végfokozatára ismert, a zaj egységeiben kalibrált jelet vitt reá, mely egy kiválasztott voltaméterre került. A jel az összegezés után úgy jelentkezett, mint egy Holdról visszavert jel. Ilyen mérések azt mutatták, hogy a Holdról visszajövő jel (összegezés nélkül) az erősítő zajának kb. egytizede, ami megfelelt a várakozásoknak.

A kísérleteknek 1946 tavaszán való számos megismétlése révén végül is megállapíthattuk, hogy a számítások alapját képező két feltevés helyes volt: 1. a 2.5 méter hullámhosszú jelek kijutnak a világűrbe, 2. a Hold reflektáló képessége $\varrho = 1/10$ nagyságrendben van.

Néhány héttel azelőtt, hogy a kísérleteink sikerét biztosra vehettük, bejárta a világsajtót egy amerikai kísérlet híre. J. H. De Witt ezredes, az U. S. Army Signals Laboratory Belmar (New Jersey)-ben levő telepén végzett sikeres holdvisszhang kísérletekről számolt be 1946. január 10-én. A kísérletnek vázlatos műszaki leírása az Electronics 1946. áprilisi számában jelent meg, részletes ismertetése pedig később a Proc. I R E 1949. évfolyamában (4). Már a sajtó közleményeiből és az előzetes leírásból láthattuk, hogy az amerikai technika biztosítani tudta a frekvencia állandóságát, tehát detektálás előtti sávszűkítést alkalmazva *egyes* visszavert jeleket tudott a zavarnívó fölött észlelni. Berendezésük, mely a Hold—Föld relatív mozgásából származó Doppler-effektust is ki tudta egyenlíteni, sokszorosan bonyolultabb és kifejlettebb volt, mint a mienk. Világosan látszott, hogy azt a hátrányt, mely a mi háború alatti elszigeteltségünkből és a kis ország anyagi korlátaiból folyt, csakis a jelösszegezés gondolata tudta kiegyenlíteni.

Látva, hogy az amerikai kísérlet első híre a napi sajtóban került bejelentésre, én is értesítettem kísérletünkről a magyar rádiót és sajtót. A sajtó részéről tapasztalt nagy érdeklődés viszonzásául 1946. február 7-én az esti órákban sajtó konferenciát tartottunk az Egyesült Izzóban, melyen a napilapoknak és a képes újságoknak úgyszólván teljes képviselete jelent meg. A kísérlet elvét előbb fekete táblán ismertetve átvonultunk a Kutatóba, hol a jelenlevők megtekintették a hatalmas antennaszerkezetet és a készülék két szobáját a működésben levő műszerekkel. Utána a napilapok első

oldalon hozták riportjaikat, a képes újságok pedig fényképfelvételekkel illusztrált leírásaikat. Többek között megemlítem azt a lendületes cikket, melyet a kitűnő tollú Békés István írt, a régi debreceni osztálytárs, kit hosszú idők után akkor láttam újra.

A következő évben az Egyesült Államokban járva meglátogattam a Belmarban levő laboratóriumot. Az ott látottak és a közben hozzánk érkezett amerikai radar irodalom meggyőztek engem arról, hogy mi az ő költséges, nagy személyzetet igénylő berendezéseikkel nem tudnánk versenyezni. Ezért elhatároztam, hogy a magyar holdradar kísérleteket nem fogjuk folytatni. Tettem ezt annak ellenére, hogy Szent-Györgyi Albert, ki abban az időben egy Természettudományi Akadémiát alapított, lelkesen akart rábeszélni, hogy az Akadémia támogatásával valósítsuk meg azt a tervet, melyről neki beszéltem. Arról volt szó, hogy egy óriás antennafelületet lehetne nyerni, ha a földbe parabolikus üreget ásunk és a gödör felületét fémhálóval, vagy fémlemezzel burkoljuk. (Megjegyzem, hogy a világnak jelenleg legnagyobb mikrohullámú reflektora, a 300 méteres Arecibo-tányér, Puerto Rico-ban, így van építve.) „Mikor kezdünk ásni?" szokta kérdezni Szent-Györgyi már messziről ha találkoztunk. De akkor mi már visszatértünk a háború alatt elodázott gyorskoincidencia kísérleteinkhez, melyekben egyszerű eszközökkel tudtunk úttörő munkát végezni.

Kísérletünkről én 1947-ben az amerikai Berkeley-egyetemen, 1948-ban a bécsi egyetemen, 1949-ben pedig a washingtoni George Washington egyetemen tartottam előadást. Mindenütt méltányolták a jelösszegezés elvét, mely a viszonylag egyszerű magyar berendezést sikerre vitte. Mikor Berkeleyben beszéltem, éppen ott tartózkodott a Nobel-díjas Hevesy György. Ő azt mondta, többre értékeli a magyar kísérletet, mint az amerikait. Könnyű az eszközök és emberek sokaságával eredményt elérni, mondta, de a magyar jelszó az, hogy „Többet ésszel mint erővel".

A radarcsillagászat

Bár sem De Witt csoportja, sem mi nem folytattuk a Földről kívülre irányuló radar kísérleteinket, az amerikai és magyar kezdeményezés után szédületes gyorsasággal fejlődött ki a csillagászatnak új vizsgálati ága, melynek neve *Radarcsillagászat (Radar Astronomy*, vagy *Planetary Radar)* s melynek ma kiterjedt irodalma van. Nagy csillagászati radar berendezések épültek a világ több országában (Egyesült Államok, Anglia, Ausztrália, Szovjetunió, Kanada).

Szerencsés körülmény volt e fiatal tudományág kifejlődésében, hogy a *rádiócsillagászat*, mely a távoli galaktikák sugárzásának *megfigyelésére* szolgál és a *radarcsillagászat*, mely a naprendszerben *kísérletezik*, egyformán igényli és tudja használni a nagy reflektor tányérokat és egyéb költséges berendezéseket.

Nem lehet célom itt a radarcsillagászat részletes ismertetése, még az eredmények felsorolására sem volna hely. Ezért csupán néhány olyan teljesítményt fogok megemlíteni, melyeket a csillagászat egyéb vizsgálati módszereivel nem lehetett volna megvalósítani.

Azt a cikket, mely a mi holdradar kísérleteinket a Hungarica Acta Physica első számában írta le (3), 1946-ban azzal a megjegyzéssel zártam (22. lap), hogy a jövő (más égitestekre is kiterjedő) kísérleteiben a legjobb eredmények a legfejlettebb mikrohullámú technika és a mi jelösszegezési módszerünk kombinációja alapján várhatók.

Ezt a várakozást az azóta kifejlett radarcsillagászat igazolta.

Ma már naprendszerünk számos égitestje (maga a Nap is) egészen a Szaturnusz távolságáig észlelhető radarral. A visszakapott energiának a távolság negyedik hatványával való csökkenését csak részben tudja kiegyenlíteni a hatalmas reflektorok (25—300 m átmérő), a nagy adási energiák (több száz kilowatt középteljesítmény, több megawatt csúcsteljesítmény), a deciméteres és centiméteres hullámok és a kitűnő rezgésszám állandóság alkalmazása. A maradék kívánalom áthidalása minden esetben jelösszegezéssel történik. A számítógépekkel végzett jelintegráció teszi lehetővé, hogy a gyönge, de periodikusan sokszor ismételt jelek, melyeket memoria szerv regisztrál s melyek mélyen a zavarnívó alatt vannak, a zaj fölé emelve észlelhetők legyenek. Azt jelenti ez, hogy a modern radarcsillagászat a magyar holdradar kísérletekben elsőként lefektetett jelösszegezési elvre épül. Megállapítják ezt A. G. Smith és T. D. Carr a Radio Exploration of the Planetary System c. könyvükben (20), melynek 110. és 111. lapjain a magyar holdkísérletet tárgyalják, majd a 123. lapon a jelintegráció technikájának ismertetése után ezt mondják: „The unique method devised by Bay in his pioneer lunar radar investigations is an example of such a technique". Azaz: „Az egyedülálló módszer, melyet Bay az úttörő holdradar kísérletei céljára kigondolt, példa az ilyen technikára".

A Holdon túlra irányuló radarkísérletek 1958-ban kezdődtek a Massachussetts Institute of Technology Lincoln Laboratory-jának a Vénusz észlelésére épített radar berendezésével (5). Az adás hullámhossza 70 cm, a vevőkészülék kicsiny zajú mézer erősítő volt. A 25 méter átmérőjű antenna tányér 5 percig tartó impulzus sorozatot küldött a Vénusz felé, utána 5 percig vételre szolgált. A vevő által észlelt egyes impulzusok, melyeket mágneses memória szalag regisztrált, a zavar nívó alatt voltak. A jelnek a zaj fölé emelésére jelösszegezés szolgált, melyet számítógép végzett. Egyéb laboratóriumok hasonló elven épült, az évek folyamán egyre nagyobb hatótávolságú berendezéseivel sikerült észlelni és pályáikon követni a Vénusz, Merkur és Mars bolygókat. Az ilyen természetű kísérletek közül megemlítem itt a legutóbbi eredményt, melyet R. M. Goldstein és G. A. Morris a Science 1975. júniusi számában közölt (6) s melyre a napi sajtó is felfigyelt: a Jupiter

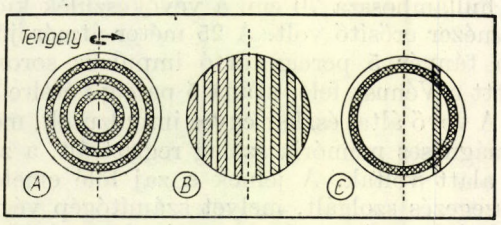
legnagyobb holdját, a Ganymedest észlelték radarral. A kísérletek a California Institute of Technology Jet Propulsion Laboratory-jának Goldstone-telepén folytak a Mojave sivatagban (Dél Kalifornia). A 70 m átmérőjű antenna tányér 1 óra 7 percig küldött ki 400 kilowattos jeleket 12.5 cm hullámhosszon, utána ugyanannyi ideig vételre szolgált. A vételben használt mézer erősítő zaj a 23 °K abszolút hőmérsékletnek felel meg. Az egyes jelek jel/zaj viszonya még így is csupán 1/800 volt és a jeleket bonyolult számítógép program jelösszegezéssel emelte a zajnívó fölé. A főbb eredmények: a Ganymedes visszaverő képessége 12% (előbbi eredmények: Mars 8%, Vénusz 12%, Merkur 6%, Toro kisbolygó 8%); a sugárzás nagymértékű diffúz szórásából arra lehet következtetni, hogy a Ganymedes felülete rendkívül durva, ami hatalmas jégtömbökkel és a felületen elszórt sziklás réteggel volna magyarázható.

A kísérletek egy másik nevezetes fejleménye a *radartérképezés*, melynek gondolatát P. E. Green javasolta 1959-ben s melyet G. H. Pettengil a Holdon hajtott végre először 1960-ban (5).

Még a legnagyobb tányérokkal és centiméteres hullámokkal sem lehet elérni, hogy az energiát a térképezendő felületen kis területre fokuszáljuk. (A nyaláb kiterjedése általában nagyobb, mint a Hold, vagy éppenséggel a bolygó kúpszöge.) Hogy térképezés mégis lehetséges, két dolognak köszönhető.

Egyik, hogy egy rövid impulzus a bolygó gömbfelületének egyes körzónáit különböző időkben éri el. A 8. ábra A részében levő koncentrikus körökből a reflexió egy időpillanatban tér vissza, tehát a rövid impulzus visszavert jele idősorrendben mintegy „letapogatja" a bolygó felület e körzónáit.

Másik a Doppler-effektus. A bolygó *forgása* a visszavert jel rezgésszámának megváltozását idézi elő, mely (könnyű számítás szerint) azonos mértékű a felületnek tőlünk nézve a forgástengellyel párhuzamos sík metszeteiben (B ábra), tehát a visszavert jel *spektruma* „letapogatja" a bolygó e sík metszeteit, melyek a bolygó felületén szintén körzónák. (Megjegyezzük, hogy a bolygó-Föld relatív sebességéből folyó Doppler-eltolódás az egész felületen azonos, tehát a számításokból kiejthető.)



8. ábra. A radar térképezés elve. A bolygóról visszavert jel az A ábra körzónáiból azonos időben, a B ábra síkmetszeteiből azonos Doppler rezgésszám eltolódással tér vissza. Az „idő—Doppler" analízis, melyet számítógép végez, a jeleket a C ábrában szemléltetett metszéspont párokból jövő reflexiókra bontja fel. A kísérlet későbbi ismétlésével, miközben a bolygó — Föld relatív helyzete megváltozik, a két hely között megkülönböztetést lehet tenni és a térképezés egyértelmű lesz.

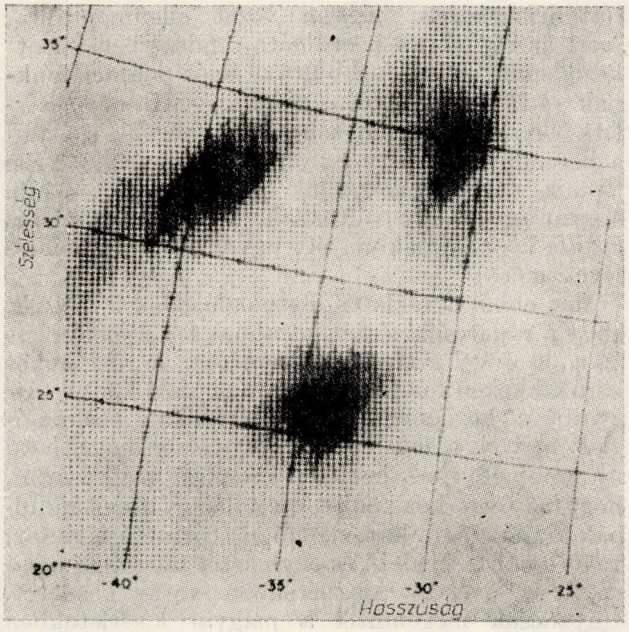
Ennélfogva egy olyan jel, mely meghatározott időkéséssel érkezett és melynek rezgésszámeltolódása valamilyen meghatározott érték, csupán a bolygó két pontjából érkezhetett, melyeket a C ábra szemléltet. Így a jel visszatérési ideje és rezgésszáma a bolygó felületén koordináta rendszert definiál, mely ugyan egyelőre kettős értékű (a C ábrában fent és lent). De ha az észlelést későbbi időben megismételjük, miközben a bolygó forgástengelyének hozzánk való helyzete megváltozott, a két hely között diszkriminálni tudunk. Végül hosszantartó észlelésekkel és a számítógép megfelelő programozásával térképet készíthetünk, mely megmutatja, hogy a bolygó felületének egyes pontjai a mikrohullámokat mekkora amplitúdóval verik vissza. Ezek a térképek aztán egyéb ismeretek révén (a mikrohullámok fizikája, egyes esetekben optikai térképekkel való összehasonlítás, sok esetben munkahipotézisek) a bolygó felületének geográfiai térképére fordíthatók le.

Mielőtt megemlítenénk néhány eredményt, ki kell térnünk arra a kérdésre, hogyan lehetséges annak a rendkívül kicsiny Doppler-effektusnak észlelése, mely a bolygó lassú forgásából származik? Ez a mikrohullámok rendkívüli rezgésszám állandóságának köszönhető. Az atomórák (Caesium óra, Hidrogén mézer stb.) rezgésszámának állandósága ma 10^{-12} pontossággal biztosítható, ami például annyit jelent, hogy egy atomórához zárt 10^{10}Hz (10 Gigaherz, 3 cm) rezgésszámú mikrohullám önmagával 100 másodpercig koherens marad. A néhány Hz — néhány 100 Hz Doppler eltolódások tehát jól észlelhetők, különösen ha ezeknél is kihasználjuk (fázismérés) a jelösszegezés elvét. Így történt, hogy Pettengill Hold térképet tudott radarral készíteni, holott a Hold hozzánk képest „nem forog". De a Hold *librációja* (a felénk fordított tányér kismértékű parallaktikus lengése) 10—20 Hz eltolódást okoz a rezgésszámban (az eltolódás középen zérus, a Hold két oldalán maximális), mely a radar céljaira elegendő. Doppler mérések szempontjából a radar mikrohullámai elhatározó fölényben vannak a fényhullámok alkalmazhatóságával szemben.

Különösen kecsegtető volt radar térképezésnek a Vénusz bolygóra való alkalmazása. Ezt a bolygót sűrű felhőréteg veszi körül, tehát a bolygó szilárd felülete optikailag sohasem látható. Itt a fellegeken áthatoló radar meglepően új eredményeket hozott.

A Jet Propulsion Laboratory Goldstone állomása 1961 óta foglalkozik a Vénusz radar spektrumaival. Már az első kísérletek mutatták, hogy a Vénusz forgási sebessége nagyon kicsiny. A későbbi térképezési kísérletek a felület egyes jellegzetes alakulatait fedték fel, melyeknek az évek folyamán való követése után végül is 1969-ben a kutatók két eredményt állapíthattak meg (7).

1. A Vénusz forgása retrográd, azaz ellentétes a Nap és a többi bolygók forgásirányával (egyetlen kivétel az Uránusz, mely különben is rendellenes,



9. ábra. A Vénusz szilárd felületének egy része, radartérképezés alapján. (7) referencia.

forgástengelye közel a pályája síkjában van); a Vénusz forgástengelye csaknem merőleges a pálya síkjára.

2. A Vénusz forgásideje 243.0 ± 0.1 földi nap, ami a Földdel való szinkronizmust jelent: alsó együttállásban (földközelben) a Vénusz mindig azonos felületét mutatja a Föld felé; ezt a szinkronizmust tehát (még eddig teljesen meg nem magyarázott módon) nyilván a Föld gravitációs perturbációja hozta létre.

Olyan eredmények ezek, melyeket mind a mai napig a radar észleléseken kívül semmi más módszer nem tudott volna felmutatni.

A Vénusz térképezése azóta is folyik. Egyik eredménye a 9. ábrában látható, mely 3 körszerű alakulatot mutat (150 km átmérőjű hegyvidékek, vagy talán kráterek).

Radar megfigyelés megváltoztatta a Merkur forgásidejére vonatkozó nézeteinket is. Kiderült, hogy a Merkur forgásideje 2/3 része a Nap körüli keringési idejének. Tehát az eddigi felfogással ellentétben a Merkur tengely körüli forgása nincs a Naphoz „zárva" (mint a Holdé a Földhöz). A magyarázat valószínűleg a bolygópálya viszonylag nagy ellipticitásában és a bolygó tömegének aszimmetrikus eloszlásában keresendő.

Még két eredményt kell megemlítenünk, melyek a radarcsillagászatnak köszönhetők.

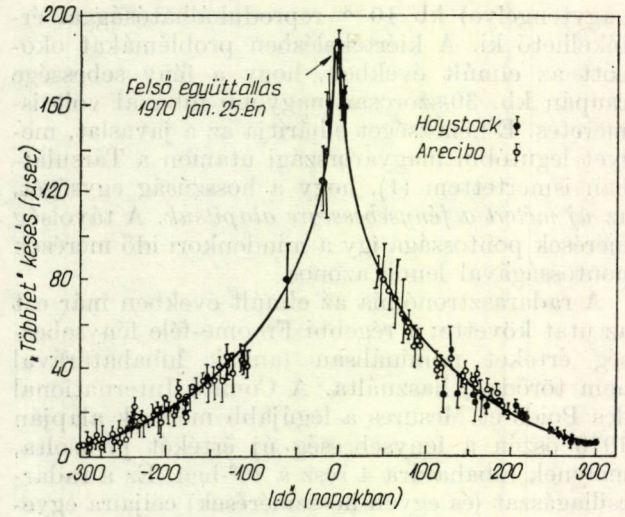
Egyik a Naprendszer méreteinek pontosabb meghatározása. Mivel az időmérés általában pontosabb, mint a távolságmérés és mivel a radartechnika a távolságmérést (a fény sebességén keresztül) időmérésre vezeti vissza, a Naprendszer belső bolygóinak pályaelemei az eddigi háromszögelési mérésekkel szemben sokszorosan pontosabban voltak meghatározhatók. Ilyen mérésekből a csillagászat alaptávolsági egysége, az ún. *asztronómiai egység* (a földpálya ellipszisének fél nagytengelye) kb 10^{-8} reprodukálhatósággal értékelhető ki. A kiértékelésben problémákat okozott az elmúlt években, hogy a fény sebessége csupán kb. 30-szorosan nagyobb hibával volt ismeretes. E nehézséget elhárítja az a javaslat, melyet legutóbbi magyarországi utamon a Társulatban ismertettem (1), hogy a hosszúság egységét, az *új métert a fénysebességre alapítsuk.* A távolság mérések pontossága így a mindenkori idő mérések pontosságával lenne azonos.

A radarasztronómia az elmúlt években már ezt az utat követte; a régebbi Froome-féle fénysebesség értéket nominálisan (annak hibahatárával nem törődve) használta. A Comité International des Poids et Mesures a legújabb mérések alapján 1973 őszén a fénysebesség új értékét javasolta, melynek hibahatára 4 rész a 10^9-ben. Ez a radarcsillagászat (és egyéb hosszmérések) céljaira egyelőre elegendő, de ha az említett javaslat végleges elfogadásra talál, akkor a jövőben a távolságmérések pontosságát mindenkor csupán az időmérési technika hibahatárai fogják korlátozni (8), (9).

Végül megemlítjük a radarcsillagászatnak azokat a kísérleteit, melyek az általános relativitás elmélet ellenőrzésére szolgálnak. Tudvalevően ez elmélet szerint a fény (rádióhullám) terjedési sebessége a gravitációs potenciál függvénye. Nagyobb potenciál esetén a sebesség kisebb (ellentétben az anyagi testek viselkedésével, melyeket a nagyobb gravitációs tér gyorsít). Ebből vezette le Einstein 1916-ban a fénysugaraknak a Nap közelében való elgörbülését, mely azóta a mai napig intenzív vizsgálat tárgya. I. I. Shapiro, az M. I. T. Lincoln Laboratory-jának fizikusa 1964-ben vetette fel a gondolatot (10), hogy a gravitációs effektust radar jelek *késésével* lehet észlelni, ha a megcélozott bolygó a Nap mögötti hátsó együttállásban van, vagy akörül tartózkodik. Számításai szerint az oda-vissza való futási idő (mely 20—30 perc) mintegy 200 mikromásodperccel hosszabbodik meg, ha a kiküldött hullámnyaláb a naptányér határánál halad.

Ennek az időkésésnek pontos megmérése nem könnyű feladat. Az egész effektus a bolygó távolságának mintegy 30 kilométerrel való megváltozásával egyenértékű, tehát ha a változást néhány százaléknyi pontosságig akarjuk mérni, a bolygó távolságát (sőt a felületi pontjainak tőlünk való távolságát) 1 km nagyságrendjéig kell ismernünk. Ezért Shapiro olyan tervet dolgozott ki, mely szerint a bolygó (Merkur, Vénusz) csaknem állandó megfigyelésével, azokat a távolság méréseket, melyeket a gravitáció alig befolyásol (alsó együttállás, nagy elongációk), a bolygó pályaelemeinek az eddigi csillagászati ismeretéknél pontosabb meghatározására kell kihasználni s aztán ezek ismeretével a hátsó együttállás pályaelemeit számítani. Ugyancsak gondosan kell kiértékelni azt a futási idő változást, mely a Nap közelében levő plazma nagyobb elektronsűrűsége miatt várható. Ennek meghatározására lehetőleg több különböző hullámhosszon kell dolgozni.

A rendszeres kísérletek és azoknak bonyolult



10. ábra. A Vénusz bolygóról visszavert rádió hullámok késése a Nap gravitációs terében. A folytonos vonal az általános relativitás elmélet szerint számított időkéséseket mutatja a felső együttállás környezetében. A pontok a Haystack, a körök az Arecibo radar méréseit jelzik a hibahatáraikkal együtt. A számított és mért értékek a mérések kb. 5%-os pontosságán belül egyeznek. (12) referencia.

számítógép programokban való kiértékelései megindultak a Lincoln Laboratory *Haystack* (Tyngsboro, Mass.) radarjával 1965-ben 4 cm hullámhosszon. 1967 óta egy másik csoport is dolgozott a feladaton, a Cornell University már említett *Arecibo* radarjával 70 cm hullámhosszon.

Az első eredmények 1968-ban kerültek közzétételre (11). Ezek pontossága 20% volt, tehát arra elegendő, hogy a gravitációs effektus jelenlétét igazolják. A további kísérletek pontosabb eredményeit a 10. ábra mutatja, mely 1971-ben került közlésre (12). A gravitációs effektust ezek a kísérletek kb. 5% pontossággal mérik. Hasonló pontosság volt nyerhető „aktív radar" kísérletekből. A *Mariner 6 és 7* rakéták a bennük levő mikrohullámú adó segítségével a fölfogott földi radar jeleket nagy energiával küldik vissza (transponder). A *Mariner 9* kísérleteiből, melyek még feldolgozás alatt vannak, nagyobb pontosság várható.

Az eddigi kísérletek tehát igazolják a fénysebességnek gravitációs térben való lelassúdását. De jelenleg éppen a határán vannak annak a pontosságnak, mellyel el lehetne dönteni, hogy a gravitáció elméletének Einstein-féle ,vagy annak Brans-Dicke-féle verziója helyes. Előbbi az effektusokat egy tenzormező jelenlétére vezeti vissza, utóbbi a tenzormezőn kívül egy skaláris mezőt is feltételez. A radar kísérletek valószínűtlenné teszik, de egyelőre nem zárják ki a skaláris mező jelenlétét (mely újabban egyéb kísérletek alapján sem valószínű). Remény van arra, hogy a radarkísérletek pontossága a jövőben 1 ezrelék nagyságrendjéig lesz fokozható.

(Nem hagyhatunk itt említés nélkül egy kérdést. Az új métert csak akkor alapíthatjuk a fénysebességre, ha ez utóbbi állandó. A fénynek fent említett lelassúdása mégsem vezet ellenmondásra, mert az egy olyan koordináta rendszerben jelentkezik, mely a mi kisebb gravitációs potenciálunknak — távol a Naptól — felel meg. Ha egy kísérleti berendezéssel fénysebességet mérünk s aztán a berendezéssel nagy gravitációs potenciálú térbe lépünk át, berendezésünk paraméterei — idő, hosszúság — úgy változnak, hogy a berendezés *lokális* koordinátákban ott ugyanazt a fénysebességet méri.)

Még ebből a vázlatos összefoglalásból is látszik, hogy a radarcsillagászat hatalmas fejlődésen ment át a 30 évvel ezelőtti kezdete óta. A részleteket leíró cikkeken felül számos összefoglaló könyv tárgyalta a kezdeményezett eljárásokat, technológiát, melyek a sokszor a meglepetés erejével ható új eredményeket hozták. Érdekes megjegyezni, hogy az ilyen kézikönyvek általában abból indulnak ki, hogy a radarasztronómia (planetáris radar) 1946-ban az egyidejű és egymástól független amerikai és magyar kísérletekben vette kezdetét. Ugyancsak megemlítik a magyar kísérletekben alkalmazott jelösszegezés gondolatát. Fölsorolunk néhány ilyen monográfiát a (13)—(22) referenciák alatt.

De a két úttörő kísérlet közül a magyar, a hosszú idejű jelintegráció alkalmazásával, egy lépéssel tovább ment abban az irányban, melyet a modern radarcsillagászat követ.

Az a szédületesnek mondott fejlődés, mely a radarcsillagászatban végbement, nem kivételes. A természettudományok egyéb ágai hasonló iramú fejlődésen mentek át az utolsó 30 évben. Mi sem bizonyítja jobban a technológia és a benne alkalmazott számítógépi technika fejlődését, mint hogy a mi kísérleteinktől (melyekben csupán gyönge jeleket tudtunk a Holdra küldeni és azokat visszakapni) számítva kevesebb, mint negyed század elteltével már emberek utazhattak és léptek le a Holdra.

A radarcsillagászatot két szerencsés körülmény segítette. Egyik (ami a csillagászatban általában igaz), hogy megfigyelésének tárgyai, az égi testek, bolygók, holdak pályaelemei az időben lassan és kauzális törvényekkel leírható módon változnak. Hosszú kísérleteket lehet tehát folytatni s azok eredményeit összegezni. A mérések pontossága a reájuk fordított megfigyelési idő négyzetgyökével javul, ami ugyan lassú javulás, viszont nincs korlátokhoz kötve.

Másik, hogy az elmúlt 3 évtized olyan eszközöket fejlesztett ki, melyek a radarcsillagászat kezére játszottak. A deciméteres és centiméteres hullámú nagy adók, a rendkívül kicsiny zajú mézer erősítők, a rezgésszám állandóságát biztosító atomórák, mézer oszcillátorok, az elektronika memória szervei és a bonyolult programokra képes gyors számítógépek mind olyan eszközök, melyek nem léteztek 30 évvel ezelőtt.

A radarcsillagászat az új eszközöket a hosszú idejű jelösszegezéssel, melynek gondolata elsőként a magyar holdvisszhang kísérletekben nyert alkalmazást, valóban jól használta ki.

IRODALOM

1. Bay Z. Fizikai Szemle, *XXIV*, *4*, szám, 103, 1974.
2. Bay Z. Hazai Mikrohullám-Kísérletek, Különlenyomat az Elektrotechnika 1—5 és 6—8 számaiból, 1946.
3. Z. Bay, Hungarica Acta Physica, *1*, 1, 1946.
4. J. H. De Witt, and E. K. Stodola, Proc. IRE, *37*, 229, 1949.
5. P. E. Green Jr., and G. H. Pettengill, Sky and Telescope, XX, No *2*, 3, 1960.
6. R. M. Goldstein, and G. A. Morris, Science, *188*, 1211, 1975.
7. R. M. Goldstein, Proc. Am. Phil. Soc. *113*, No 3, 224, 1969.
8. New Standards for Light Velocity and Wavelength, Physics Today, Jan. 1974, 112.
9. Z. Bay and J. A. White, Physics Today, Apr. 1974, 9.
10. I. I. Shapiro, Phys. Rev. Letters, *13*, 789, 1964.
11. I. I. Shapiro, G. H. Pettengill, M. A. Ash, M. L. Stone, W. B. Smith, R. P. Ingalls, and R. A. Brockelman, Phys. Rev. Letters, *20*, 1265, 1968.
12. I. I. Shapiro, M. E. Ash, R. P. Ingalls, W. B. Smith, D. B. Campbell, R. B. Dyce, R. F. Jurgens, and G. H. Pettengill, Phys. Rev. Letters, *26*, 1132, 1971.
13. B. Lovell and J. A. Clegg, Radio Astronomy, Chapman & Hall Ltd. London, 1952, p. 216.
14. J. L. Pawsey and R. N. Bracewell, Radio Astronomy, Oxford at the Clarendon Press, 1955, Chap. IX.
15. R. Hanbury Brown, and A.C.B. Lovell, The Exploration of Space by Radio, London, Champman and Hall Ltd, 1957, p. 180.
16. Robert C. Cowen, The Christian Science Monitor Second Section, June 16, 1967.
17. R. D. Davies and H. P. Palmer, Radio Studies of the Universe, D. Van Nostrand Co. Inc. Princeton, New York, 1959, p. 155 .
18. J. L. Steinberg et J. Lequeux, Radioastronomie, Dunod, Paris, 1960, p. 189.
19. Z. Kopal, Physics and Astronomy of the Moon, Academic Press, New York and London, 1962, Chapter 12 by J. V. Evans, pp. 429,447.
20. A. G. Smith and T. D. Carr, Radio Exploration of the Planetary System, D. Van Nostrand Co. Inc. Princeton and New York, 1964, pp. 111, 123.
21. Uszpechi Fizicseszkich Nauk, 1972
22. Z. Kopal, Man and His Universe, William Morrow and Co. Inc. New York, 1972, p. 201.

Magyar cikkek, melyek az 1946-os holdkísérletet tárgyalják:

23. Pócza J., Rádióévkönyv az 1947. évre, Bp. 1947. p. 12—16.
24. Pócza J., Radar, Bp. 1947. p. 66—72.
25. Lendületes cikkben emlékezett meg Budincsevits Andor a holdkísérletről, annak 25. évfordulója alkalmából, Élet és Tudomány, 1971. jan. 29, p. 199.
26. Vajda P., Újabb Adatok a Hiradástechnika Magyar Úttörőiről, Technikatörténeti Szemle, VII. 1973—1974, p. 93—96.

ÚJABB FIZIKAI MÓDSZEREK A SZERKEZETKUTATÁSBAN

Berényi Dénes
MTA Atommag Kutató Intézete, Debrecen

Bevezetés

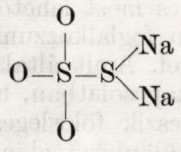
Közismert dolog, hogy a fizika bizonyos értelemben alapvető szerepet tölt be a természettudományok fejlődésében. Új fizikai törvények felfedezése, új fizikai eszközök kifejlesztése döntő hatást gyakorolhat a kémia és biológia egészének vagy egyes ágainak a fejlődésére. Így volt ez a múltban is az energiamegmaradás elvének felfedezésétől a kvantummechanikáig és a röntgensugárzás alkalmazásaitól az elektronmikroszkópig.

A kémiai szerkezetkutatás területe különösen jó példa arra, hogy az új fizikai módszerek behatolása milyen jótékony hatással lehet egy tudományág fejlődésére.

A jelenlegi előadásban — anélkül, hogy kémiai vagy insztrumentális részletekkel foglalkoznék — éppen azt szeretném bemutatni a fizikus vándorgyűlés résztvevői számára, hogy egy ilyen konkrét területen, mint a kémiai szerkezetkutatás, milyen új lehetőségeket teremt az új fizikai módszerek behatolása.

Az elmúlt egy-két évtizedben jóformán kicserélődtek a kémiai szerkezetkutatás régi módszerei, azaz a régi módszereket csaknem teljes egészében legújabb fizikai felfedezéseket alkalmazó új módszerek váltották fel.

Bevezetésképpen beszélnünk kell itt mindenekelőtt a kémiai szerkezet fogalmáról. Mint tudjuk, egy anyagot nem lehet egyértelműen jellemezni elemi összetételével. Egy anyag egyértelmű kémiai jellemzésére, kémiai szerkezetének megismerésére mindenekelőtt az egyes atomok vegyértékállapotát, kötésviszonyait (a legtágabb értelemben) kell tanulmányoznunk, ill. megállapítanunk. (A kémiai szerkezet fogalma más vonatkozásban magában foglalja az atomok geometriai elrendeződését is.) Az előadás folyamán számos ilyen jellegű példát fogunk látni, most csak az egyik legegyszerűbbet mutatjuk be itt példaképpen, a nátrium-tioszulfát esetét. Mint ismeretes, ennek képlete: $Na_2S_2O_3$, azaz, mint a szerkezeti képlet



is mutatja, a két kén atom nem azonos a vegyületben, hanem 50%-ban +6, 50%-ban pedig —2 vegyérték állapotban fordul elő.

Az előadás további részében áttekintjük azokat a legújabb fizikai módszereket, amelyeket ma a kémiai szerkezetvizsgálatokban alkalmaznak, és amelyek ugyanakkor végeredményben a jelenlegi kémiai szerkezetvizsgálat fő módszereit képezik. Ezek után külön részletesen kívánunk foglalkozni az elektron-spektroszkópia ilyen irányú alkalmazásaival, mint a szóbanforgó módszerek egyik legfiatalabbjával.

Előadás a Fizikus Vándorgyűlésen, Debrecen, 1975. aug. 22.

A legmodernebb kémiai szerkezetvizsgáló módszerek tájékoztató összehasonlítása

I. Táblázat

Módszer	Feloldóképesség	Alkalmazási tartomány	Minta halmazáll.	Minta mennyiség	Felületi elemzés lehetséges-e?	Molekuláris pályák vizsg. lehetséges-e?
NMR	igen nagy	csak egyes elemekre, pl. H, C, F stb.	folyékony	minimum mg körül	nem	nem
Mössbauer	igen nagy	csak ún. Mössbauer izotópokkal rendelkező kező elemekre, pl. Fe, Sn, Pt stb.	kristályos	általában viszonylag nagy minta menny.	általában nem	nem
Tömegspektroszkóp	mérsékelt	Elvben minden elemre	gáz, gőz	μg és kisebb	igen	nem
ESCA	mérsékelt	minden elemre	gáz, gőz, szilárd, folyékony	μg és kisebb	igen	igen

Az újabb szerkezetkutató módszerek áttekintése

A kémiai szerkezetvizsgálatban alkalmazott modern fizikai módszerek száma nem kicsi. Ezek között vannak olyan viszonylag „bevettebb" módszerek, mint az ibolyántúli (UV) vagy vörösön inneni (IR) spektroszkópia, továbbá a Raman-spektroszkópia, illetve újabb, ha szabad mondani „fizikaibb" módszerek: a Mössbauer-spektroszkópia, az NMR (magmágneses rezonancia, egészen tág értelemben ideszámítva az NQR-t, a magkvadrupól rezonanciát és az EPR-t, az elektron paramágneses vagy elektron spin rezonanciát is), a tömegspektrometria, valamint legújabban az elektron-spektroszkópia is, rövidítve ESCA (Electron Spectroscopy for Chemical Applications), amely a maga tág értelmében magában foglalja a röntgen gerjesztéses fotoelektron-spektroszkópiát (XPS), az ultraibolya gerjesztéses fotoelektronspektroszkópiát (UPS), az Auger-spektroszkópiát és a töltött részecskékkel (elektronok) kiváltott szekunder elektronok spektroszkópiáját is.

Sajnos arra nincs most lehetőség, hogy egyenként és részletesen foglalkozzunk a fent említett egyes módszerekkel. Amit általában hangsúlyoznunk kell velük kapcsolatban, hogy a különböző módszerek nem teszik fölöslegessé egymást, hanem egyenként különböző előnyökkel és hátrányokkal rendelkeznek úgy, hogy helyesebb, ha egymást kiegészítő módszereknek tekintjük őket. Csak példaképpen említjük meg, hogy az IR és az NMR milyen hasznosan egészítik ki egymást a szerves vegyületek szerkezetének kutatásában. Míg ugyanis az IR spektroszkópiával elsősorban a poláros kötések, addig az NMR-rel az apoláros jellegű kötések mutathatók ki kedvezően.

A legmodernebb módszerekre: NMR, Mössbauer, tömegspektroszkópia és ESCA az I. táblázatban adunk egy összehasonlítást nagy vonalakban történő tájékozódásra. Itt is azt láthatjuk, hogy az egyes módszerek nem helyettesítik vagy zárják ki egymást, inkább kiegészítik. Legnagyobb feloldóképességű, azaz a legkisebb strukturális változásra, különbségre érzékeny módszerek az NMR és a Mössbauer, ezek azonban nem alkalmazhatók teljes általánossággal minden elemre, a mintára vonatkozólag is speciális megkötések vannak, és felületi elemzést se lehet végezni velük. Kétségkívül legáltalánosabbnak az ESCA látszik akár az alkalmazhatósági tartományt, akár a minta halmazállapot vagy az egyéb szempontokat tekintjük. Feloldóképessége, helyesebben „strukturális" érzékenysége azonban messze elmarad az NMR vagy a Mössbauer spektroszkópiáé mögött.

Az ESCA a kémiai szerkezetkutatásban

Az előbbiekben volt már szó arról, hogy az ESCA, az elektron-spektroszkópia alkalmazási területe igen széles és több módszert is magába foglal, a röntgen, az ultraibolya, az elektron és az ion gerjesztéses elektron spektroszkópiát is, így az Auger-spektroszkópiát is. A továbbiakban elsősorban a röntgen-gerjesztéses ESCA-val (XPS) és részben az ultraibolya gerjesztéssel kívánok foglalkozni. A különböző elektron-spektroszkópiai módszerek egymáshoz való viszonyára majd az előadás végén térek vissza röviden.

A módszer alapjai. Mind az XPS, mind az UPS esetében a módszer a fotoelektromos jelenségen alapszik. Az

$$E_e = E_x - E_k$$

egyenlet szerint az anyagmintára érkező E_x energiájú kvantum az egyes atomok E_k kötési energiájú héjáról E_e kinetikus energiájú fotoelektronokat vált ki. A fooelektronok spektrumának vizsgálata az alkalmazások szempontjából történő információszerzés fő módszere.

Arról van ugyanis szó, hogy egy atom környezetétől függően, tehát pl. attól, hogy milyen mo-

lekulában, ill. a molekulán belül milyen atomcsoportban van, az adott atom egyes héjaira nézve megváltoznak az elektromos árnyékolási viszonyok, ami az E_k kismértékű megváltozásával jár. A fotoelektromos egyenlet szerint az E_k megváltozása az E_e megváltozását is eredményezi, ami az elektron spektrumban a megfelelő spektrum vonal nagyságrendben néhány eV-os eltolódását eredményezi. Így pl. a bevezetésben említett nátriumtioszulfát spektrumában a 2p héjról (más néven L_{II}—L_{III} héj) kiváltott fotoelektronoknak megfelelő csúcs kettős, egymástól kb. 6 eV-nyira helyezkedik el a +6 és −2 vegyérték állapotban levő kén atomhoz rendelhető vonal (1. ábra).

A vegyértékállapot és a vonal helyzete, ill. eltolódása között már az ESCA módszer fejlődésének kezdeti szakaszában sikerült egyértelmű kapcsolatot találni (2. ábra). Általánosságban az eltolódást nem mindig a vegyértékkel, amelyet viszonylag ritkán lehet a vegyületben minden további nélkül definiálni, hanem valamilyen más, a kötést jellemző mennyiséggel lehet kapcsolatba hozni, mint pl. a Pauling-féle elektronegativitás, molekuláris potenciál modell, stb. (lásd pl. a 3. ábrát), további lehetőség egzakt kvantummechanikai módszerekkel kiszámítani az eltolódás értékét.

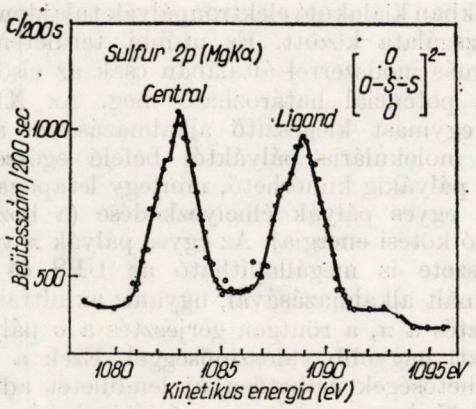
A vonal helyének, energiájának megállapítása igen nagy szerepet tölt be az XPS és UPS alkalmazásaiban. Hangsúlyoznunk kell azonban, ha ennek az előadásnak a keretében kifejezetten instrumentális vonatkozásokra nem is térünk ki, hogy a mérhető paraméterek és így az információszerzési lehetőség szélesebb az elektron-spektroszkópia alkalmazásaival kapcsolatban, mint az energia spektrum tanulmányozása. A valóságban az

energia
szög
idő és
polarizáció

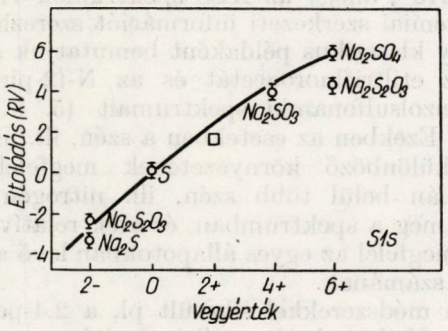
fizikai mennyiségek méréséről lehet szó a kilépő elektronokra vonatkozólag. Ilyen jellegű méréseket végeztek és már nem kis számban, különösen a fotoelektronok szögeloszlásának méréséből kaptak értékes információkat a molekula szerkezetre, a molekuláris pályákra vonatkozólag. Ami az energia mérést illeti, itt sem csak a spektrum vonal helye, illetve eltolódása lehet az információk forrása, hanem bizonyos vonal felhasadási effektusok és szatellit vonalak megjelenése is.

A fentiekben már láttuk, hogy a vegyérték és kötésviszonyokra vonatkozó kémiai szerkezeti kérdéseket vizsgálhatjuk az elektron-spektroszkópia módszereivel. A lehetőségek köre azonban sokkal tágabb. A szilárdtest sávszerkezet vizsgálata, a felületi szerkezeti és nyomanalitika, a katalízis és környezetszennyezés gyakorlati szempontokból is fontos kérdései szintén jelentős területeit képezik az elektron-spektroszkópia alkalmazásainak.

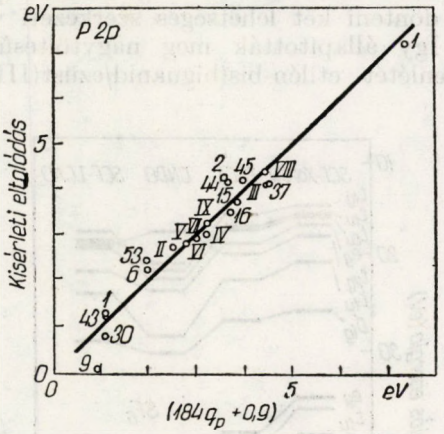
Ennek az előadásnak a további részében jel-



1. ábra A nátriumtioszulfátban levő két kén atomnak (a +6 és −2 vegyértékállapotban levőnek) megfelelő két vonal a fotoelektron-spektrumban (K. Siegbahn és mtsai.: ESCA-Atomic, Molecular . . ., Almqvist AB, Uppsala, 1967)



2. ábra. Összefüggés a vegyértékállapot és a kén 1*s* héjáról eredő fotoelektron vonal eltolódása között az elektronspektrumban (Fahlman és mtsai, Nature *210*, 1966 p. 6)



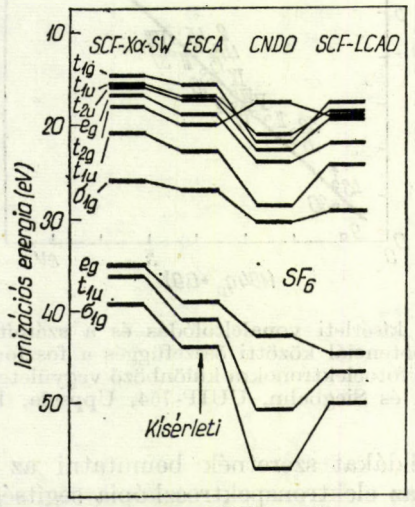
3. ábra. A kísérleti vonaleltolódás és a számított molekuláris potenciál közötti összefüggés a foszfor 2*p* héjáról eredő fotoelektronokra különböző vegyületek esetén (Allan és Siegbahn, UUIP-754, Uppsala, 1971)

lemző példákat szeretnék bemutatni az utóbbi években az elektronspektroszkópia segítségével a kémiai szerkezetkutatás terén elért eredményekről. Meglehetősen szoros a kapcsolat a kémiai szerkezet, a kötés és kapcsolódás módok és a mo-

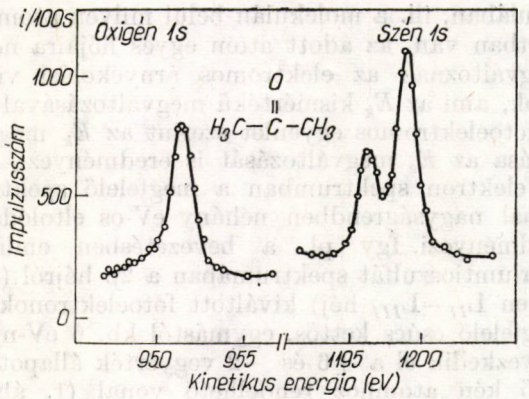
lekulákban kialakuló elektronpályák tulajdonságai, ill. vizsgálata között. Ez utóbbi területen legtöbb más módszerrel általában csak az első ionizációs potenciál határozható meg. Az XPS és UPS egymást kiegészítő alkalmazásával a legkülső molekuláris pályáktól befelé egészen az atomi pályákig kimérhető, mintegy letapogatható pl. az egyes pályák elhelyezkedése (a hozzájuk tartozó kötési energia). Az egyes pályák π vagy σ természete is megállapítható az UPS és XPS kombinált alkalmazásával, ugyanis az ultraibolya gerjesztés a π, a röntgen gerjesztés a σ pályákat gerjeszti nagyobb valószínűséggel. Ezek a kísérleti lehetőségek érthetően új lendületet adtak a megfelelő kvantumkémiai számításoknak. A 4. ábra pl. az SF_6 molekula pályáinak elhelyezkedésére vonatkozó különböző típusú számítások és az ESCA-val kapott kísérleti eredmények összehasonlítását adja.

Eredmények a szerkezetkutatásban. Arra a „munkamódszerre", ahogy az XPS spektrumok vizsgálatából kémiai szerkezeti információt szerezhetünk, mintegy klasszikus példaként bemutatjuk az aceton, az etiltrifluoroacetát és az N-(2-piridil)-p-nitrobenzolsulfonamid spektrumait (5. 6. és 7. ábrák). Ezekben az esetekben a szén, ill. nitrogén atom különböző környezetének megfelelően a molekulán belül több szén, ill. nitrogén vonal jelenik meg a spektrumban, és ezek relatív intenzitása megfelel az egyes állapotokban levő atomok relatív számának.

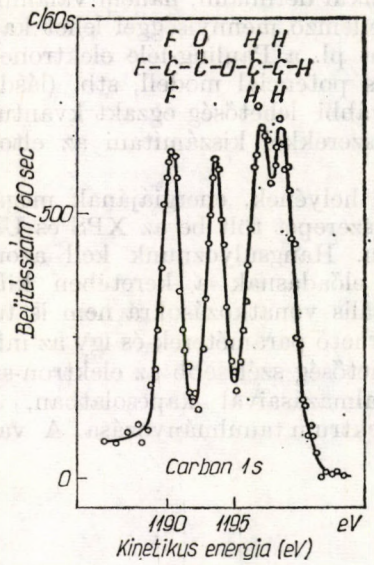
Ilyen módszerekkel sikerült pl. a 2,4-pentanedion és H_2S reakciótermékének (sósavas közegben) a szerkezetét tisztázni, amelyre vonatkozóan az UV és a tömegspektroszkópiai vizsgálatok nem vezettek egyértelmű eredményre. Hasonlóan tudták kizárni ún. kvaterner nitrogén atomok jelenlétét átmeneti fém-biguanid komplexekben és dönteni két lehetséges szerkezeti variáns között. Így állapították meg nagytöltésű ezüst ion jelenlétét etilén-bis(biguanid/ezüst(III) ionban.



4. ábra. A számítások és az ESCA módszerrel mért kísérleti eredmények összehasonlítása az SF_6 molekula pályáinak elhelyezkedésére vonatkozólag (Siegbahn, UUIP-793, Uppsala, 1972)



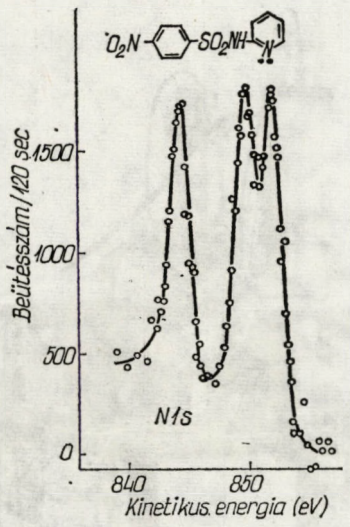
5. ábra. Az oxigén és szén 1*s* héjáról kiváltott fotoelektronoknak megfelelő csúcsok az elektronspektrumban A C1*s* csúcs kettős 1 : 2 intenzitásviszonnyal, megfelelően a szénatomok szerepének, elhelyezkedésének a molekulában (K. Siegbahn és mtsai.: ESCA-Atomic Molecular..., Almqvist AB, Uppsala, 1967)



6. ábra. Az etil-trifluoroacetát ESCA-spektrumában a C1*s* csúcs négy, 1 : 1 intenzitás viszonyú csúcsra hasad fel, megfelelően a négy szénatom szerkezeti képlet szerinti különböző elhelyezkedésének (K. Siegbahn és mtsai.: ESCA-Atomic, Molecular . . ., Almqvist AB, Uppsala, 1967)

Természetesen mindezek csak példák, amelyek azonban szemléletesen mutatják, hogy nemcsak elvi lehetőségekről van szó, hanem az ESCA és ezen belül az XPS módszer ténylegesen megvetette a lábát a kémia szerkezet analitikai módszerei között.

Itt említjük meg, hogy az óriás biomolekulák kutatásában is sokat várhatunk az XPS módszertől. Itt általában nem lehet szó arról, hogy a nagyszámú atom mindegyikéből eredő fotoelektron vonalakat megvizsgáljuk a spektrumban, hanem csak egy-egy vagy néhány kulcsszerepet betöltő fém vagy kén atom megfelelő vonalait vesszük részletes vizsgálat alá. Így történt ez pl. a nem-hem vas proteinek vagy a fotoszintézis folyamatának vizsgálatánál is.



7. ábra. Az N-(2-pyridil)-p-nitrobenzolszulfonamid ESCA-spektrumában a nitrogén 1*s* csúcs felhasadása a nitrogén atomok különböző elhelyezkedésének megfelelően a molekulában (C. Nordling, Angew. Chem. *11*, 1972 p. 85)

Beszélnünk kell még az UPS alkalmazásairól is a kémiai szerkezetkutatásban. Az előbbiekben már történt említés arról, hogy a molekula-pályák vizsgálata szempontjából mennyire kiegészíti egymást az XPS és UPS módszer. A legkülső molekula-pályák esetében, amely az UPS főterülete, inkább egymást többé vagy kevésbé átfedő sávok jelentkeznek a spektrumban, mint éles vonalak (bár egyes esetekben ilyenek is előfordulhatnak). Így az ezzel a módszerrel történő szerkezetvizsgálatoknak elsősorban vegyület-családok, egymáshoz kapcsolódó, hasonló vegyületek sorozatának spektrumait veszik fel, és ezeket egymáshoz hasonlítva értékelik ki. Példaképpen 8. ábránk mutat be egy ilyen vizsgálatsorozatot.

Ennek a témakörnek a befejezéseképpen rá kell még mutatnunk az Auger-spektroszkópia szerepére. Ismeretes az Auger-spektroszkópia fontossága a felületek elemi analízisében. Elvben azonban a kémiai környezetnek, a molekulaszerkezetnek éppenúgy vagy hasonlóan az Auger-vonalak eltolódásához kell vezetnie, amint ez a fotoelektron vonalak esetében történik. A gyakorlatban az elektrongerjesztéses Auger-spektroszkópiában a magas háttér, az emiatt szükségessé váló spektrumdifferenciálás és spektrumkomplikáltság miatt igen nehéz szerkezetvizsgálatot végezni. Új lehetőségeket nyit azonban ezen a téren a röntgengerjesztéses Auger-spektroszkópia, amelyik szervesen kiegészíti az UPS és XPS segítségével nyerhető kémiai szerkezeti információkat.

Gyakorlati alkalmazások

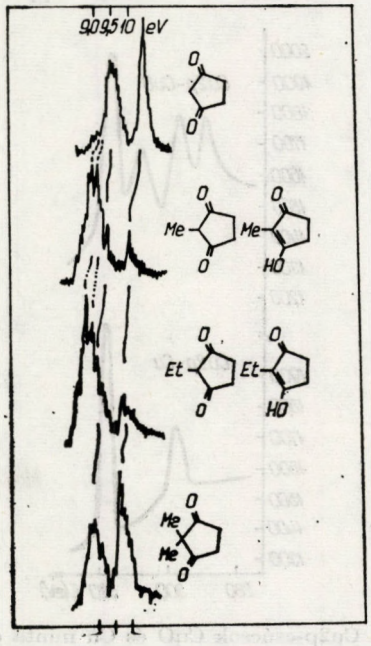
Láttuk az előbbiekben, hogy milyen lehetőségeket teremt az elektron-spektroszkópia alkalmazása a kémiai szerkezetkutatásban és — mint megemlítettük — számos más tudományágban a felületvizsgálattól a szilárdtest sávszerkezet kutatásáig.

Most röviden arra szeretnék rámutatni, hogy túlmenően a különböző tudományágakban és tudományos problémák megoldásában történő alkalmazásokon, máris milyen eredményeket ért el az elektronspektroszkópia az ipari gyakorlat és a mindennapi élet által felvetett egyes problémák megoldásában.

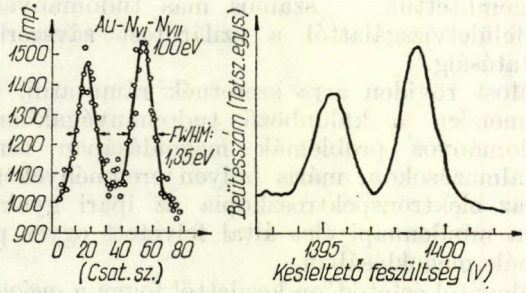
Magától értetődően kezdettől fogva a *gyógyszeripar* különös érdeklődést mutat az elektron-spektroszkópia alkalmazásai iránt, hiszen gyógyszerek egyértelmű jellemzésében, új gyógyszerek kifejlesztésében és régiek továbbfejlesztésében döntő szerep juthat az elektronspektroszkópia által nyújtott új anyagvizsgálati lehetőségek kihasználásának.

Sikerrel alkalmazták továbbá az elektron-spektroszkópia módszereit a *felületi szerkezet*, *a korrózió*, *a katalízis* gyakorlati problémáinak megoldásában. Nitrogén tartalmú szerves vegyületeket redukáló ipari palládium katalizátort, pl. amit korábban bizonyos idő után el kellett dobni, az elektron-spektroszkópiai vizsgálatokkal kiderítve a lejátszódó folyamatokat, regenerálni lehetett.

Ugyancsak számos sikeres vizsgálat történt az ipari szempontból fontos Ge, GaAs, CdSe *félvezetők aktiválási mechanizmusának tisztázására*, a *levegőszennyezés speciális vizsgálatára* és így tovább. Mindenesetre a lehetőségek távolról sincsenek kimerítve ezen a területen se.



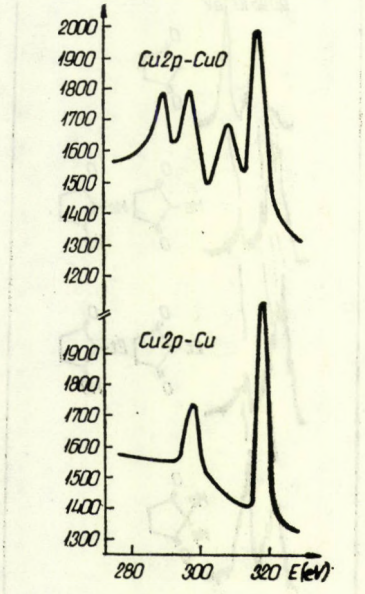
8. ábra. Egyes sávok elhelyezkedésének és a molekulaszerkezetben bekövetkezett változásoknak kölcsönös korrelációja az aromás vegyületek egy csoportjában (K. N. Houk és mtsai., J. Am. Chem. Soc. *95*, 1973 p. 8366)



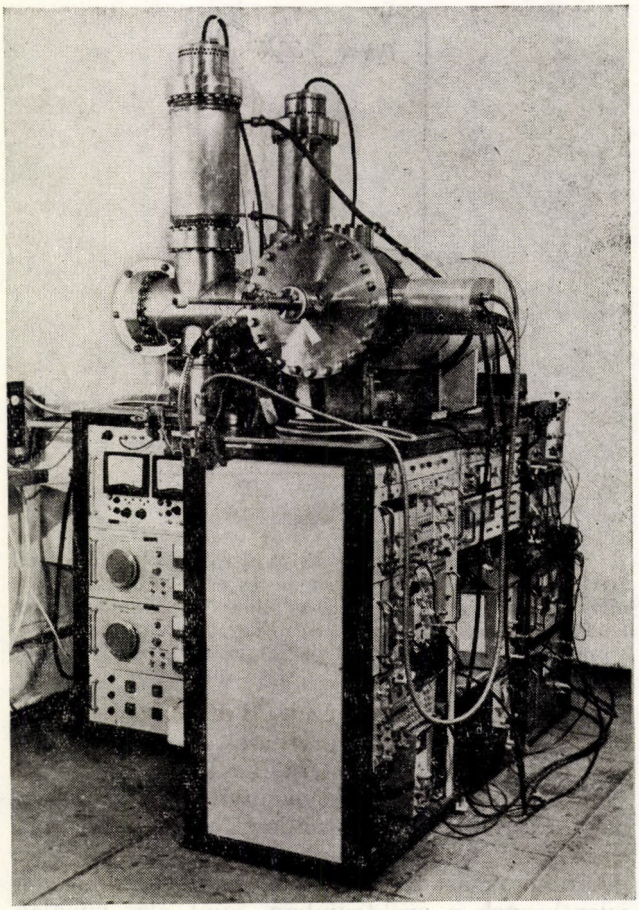
9. ábra. Az ATOMKI ESCA-berendezésével felvett két arany sztenderd vonal (baloldalon) és egy megfelelő irodalmi spektrum részlet, amelyet egy igen jó feladású ESCA-spektrométerrel vettek fel. (Huchital és Ridgen, Electron Spectroscopy, North-Holland, Amsterdam, 1972, p. 102)

ESCA az ATOMKI-ben

Befejezésül néhány szót szólok arról a munkáról is, ami az MTA Atommag Kutató Intézetében folyik az elektronspektroszkópia alkalmazásaival kapcsolatban. Az ATOMKI elektrosztatikus rendszerű elektron-spektrométerét, amelyet Dr. Varga Dezső vezetésével első sorban Dr. Kövér Ákos, Dr. Kádár Imre és Kövér László munkatársaim fejlesztettek ki szorosan együttműködve az intézet műszaki kollektívájával, mindenek előtt Mórik Gyula főmérnökhelyettessel és Dombi Imre főmérnökkel, a csatlakozó elektronikával a 11. ábrán láthatjuk. 9. ábránk a berendezéssel eddig elért legjobb feloldóképességet illusztrálja, bemutatva az ATOMKI spektrométerével felvett Au N_{VI} és N_{VII} vonalát, amelyet ilyen célra standardként szoktak használni, összehasonlítva az irodalomban közölt és igen jó feloldásúként jellemzett berendezéssel felvett ugyanezen két



10. ábra. A Cu2p-csúcsok CuO és Cu minta esetében az elektron spektrumban az ATOMKI ESCA-berendezésével felvéve



11. ábra. Elektrosztatikus elektronspektrométer

Au-vonallal. A 10. ábra a Cu2p héjnak megfelelő spektrumvonalakat mutatja tiszta réz és CuO minta esetén.

Befejezésül megemlítem, hogy a továbbiakban a tulajdonképpeni kutató munka az ATOMKI elektronspektrométerével két irányban és kétféle módszerrel folyik.

Az egyik más intézetekkel, más tudományágak megfelelő szakembereivel együttműködve kémiai szerkezeti, felületanalitikai, biológiai stb. problémák kutatása. Ezek általában erősen interdiszciplináris témák. Másrészről egészen új utakat is keresünk az ESCA módszer továbbfejlesztésére, ill. még továbbmenve az atom és molekulafizika új, nukleáris módszerekkel történő megközelítésére. Csak utalok itt arra, hogy az ESCA-nál egyik fő probléma a gerjesztő röntgen-sugárzás nagy intenzitású folytonos komponense Ezt jelenleg a röntgensugárzás monochromatizálásával küszöbölik ki. Egy másik lehetőség lenne pl., ha a röntgensugárzást protonokkal vagy nehéz ionokkal keltjük. Egyáltalán, sok új és érdekes eredményt és információt remélhetünk attól, ha az ESCA berendezést nukleáris gyorsítókkal párosítjuk össze.

NÖVÉNYI SZIMMETRIÁK

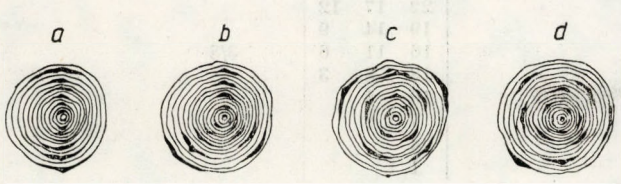
Bérczi Szaniszló
ELTE Csillagászati Tanszék

A Természet bőkezűen osztogatta a színeket és formákat a növények között is, és e gazdagság mögé rejtette a tervrajzokat, az optimum elveket. Mégis, ha a vándor csupán kíváncsiságból leszakít egyet az út szélén magasra növő gazból, hamar észreveszi, hogy a szárból kiágazó oldalhajtások közül minden ötödik egymás fölé esik. Bár a görögök, a geometria mesterei bizonyára észrevettek ilyen hasonlóságot a növények ágainak és terméseik magvainak elhelyezkedése között, írásos emlék csak a XIII. század elejéről, Fibonaccitól maradt fenn a jelenségről. Fibonacci, más néven Leonardo Pisano (1170—1250) 1202-ben kiadott Liber Abaci című művében említette a később róla elnevezett sorozatot, amely fontos szerepet játszik a levél- és magállásoknál, és szorosan kapcsolódik az aranymetszéshez is. A sorozat, melynek igen sok érdekes tulajdonságát fedezték fel azóta, még ma is a matematikusok kedves vadászterülete. A növényi szimmetriák mélyebb okáról, az elrendezések kapcsolatáról azonban, a felületi leíráson túlmenően nem jelent meg semmi.

A természetben oly gyakori csavarszimmetriák közös okokra vezethetők vissza. Egy tárgy csavarszimmetriát akkor mutat, ha egy adott síkbeli elforgatással, plusz egy, a síkhoz képest rögzített helyzetű vektor menti eltolással, és az ilyen együttes műveletek egész számú többszöröseivel önmagával fedésbe hozható. A növényeknél alapvető jelenség a növekedés; ez adja a transzlációs komponenst. Mivel a gravitációs erőtérben, rögzítetten fejlődnek, ezért egy kitüntetett — érezhető — irány létezik számukra; az ekvipotenciális felületre merőlegesen. E kitüntetett irány körül, mint tengely körül teljes a hengerszimmetria. E két egyszerű szimmetriai meggondolásból adódó hengerszimmetriát csaknem minden növényen már messziről észrevesszük.

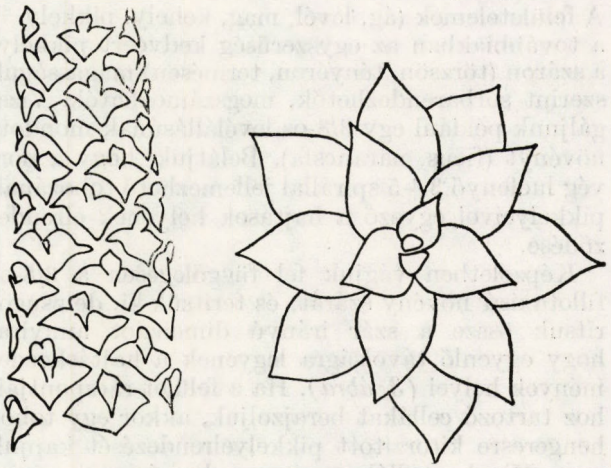
A globális megjelenés hengerszimmetriáját azonban lerontja, ha közelebb érve megpillantjuk az ágak (levelek) elhelyezkedését. Ez a hengerszimmetria leromlás azonban az összkép gazdagodásához vezet. Talán a levélállásokban rejtette el a természet a növekedésük titkát?

A növényrendszertan könyvek tömören így szólnak a fillotaxisról: Gyakori az 1/2-es, 1/3-os, 2/5-ös és 3/8-os levélállás *(1. ábra)*. Éles szemmel még 5/13-os is felfedezhető (ökörfarkkóró). Jobban megfigyelve azonban az ilyen levélállású növényeket észrevehetjük, hogy a mondott levélállások is finoman eltekeredtek. De a száras növények fillotaxisa a jelenségnek csak egyik oldala.



1. ábra. A leggyakoribb levélállás típusok: *a)* 1/2-es, *b)* 1/3-os, *c)* 2/5-ös, *d)* 3/8-os

A termések magvainak, pikkelyeinek, virágainak két egymással szemben futó spirálcsalád szerinti elhelyezkedése sokkal szembetűnőbb a levélállásnál. A jobbra és balra tekeredő spirálok darabszáma is Fibonacci szám *(2. ábra)*. Gyakori a



2. ábra. a) Káposzta-torzsán a letört levelek csonkjai
2. ábra. b) Egy hamvas kaktusz-féle leveleinek elhelyezkedése

tükörszimmetrikus példányok előfordulása. A legszebben a fenyőtoboz (5+8), ananász (8+13), karfiol (5+8), és a napraforgó (21+34, 34+55 vagy 55+89 sőt 89+144) mutatja ezeket az elrendezéseket, de az őszirózsán (8+13) és más, az őszirózsához hasonló, sok kicsiny belső sárga egymás mellé zsúfolt kehelyből összetevődő virágzaton is megfigyelhető.

A termések és a fillotaxis spiráljai első gondolatra és ránézésre is csak a Fibonacci számok kitüntetett szerepében hasonlítanak. Alaposan megfigyelve sok növényt kiderült, hogy a kétféle megjelenés egyazon elrendezési szabályoknak engedelmeskedik. A növények szárán a nagy transzláció eltorzítja, sőt elrejti ezt. A torzulást az okozza hogy a mégoly hosszú száron is a nagy transzláció miatt csak néhány periódus fér el. Így a periódus elcsavarodását, ami csak nagyon kis mértékű, a nagyon hosszú szárú, szép levélállású fajoktól eltekintve nem, vagy csak a törvény ismeretében lehet észrevenni.

Ha tehát a szárakon a levélállásokat összetolnánk, akkor olyan elrendezéseket kapnánk, mint a terméseké. Mielőtt ezt bizonyítanám a jelenség modellezésével nézzük meg, milyen következtetést sugallnak ezek az egyszerű kiindulási szimmetriameggondolások. Ásványok szimmetria tulajdonságaival és a kapcsolódó csoportelmélettel foglalkozva felmerült, hogy a hengerszimmetriával — pontosabban a helix és egyenszögű spirális csavarszimmetriák kombinációjával — és a Fibonacci számokkal jellemezhető növényfelületi

elrendezések az egyetlen lehetségesek. Mivel az említett szimmetriáknak más, de a természetben nem található elrendezések is eleget tennének, ezért valamilyen elvvel a Természet válogat belőlük. Ezért olyan tulajdonságát kerestem a természetben megtalálható elrendezéseknek, amely a Fibonacci számokon túlmenően kitünteti vagy összekapcsolja őket. Az elrendezések most következő modelljeivel jutottam megoldásra.

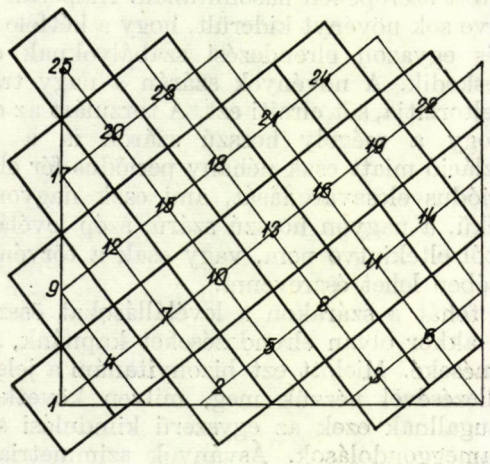
A termés-elrendezés és a fillotaxis vizsgálata szalagmodellel

A felületelemek (ág, levél, mag, kehely, pikkely = a továbbiakban az egyszerűség kedvéért pikkely) a száron (törzsön, tényéron, termésen) magasságuk szerint sorbarendezhetők, megszámozhatók. Vizsgáljunk például egy 3/8-os levélállásúnak mondott növényt (ficus, narancsfa). Belátjuk, hogy a norvég lucfenyő 3+5 spirállal jellemezhető tobozának pikkelyeivel egyező a hajtások helyének elrendeződése.

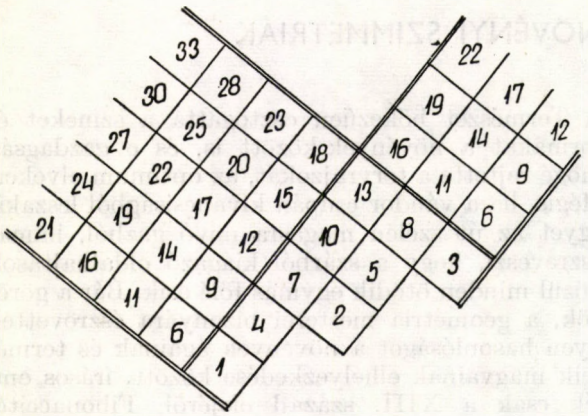
Képzeletben vágjuk fel függőlegesen a 3/8-os fillotaxisú növény szárát, és terítsük ki, de zsugorítsuk össze a szár irányú dimenziót annyira, hogy egyenlő távolságra legyenek a hajtáskezdemények helyei *(3. ábra)*. Ha a felület rácspontjaihoz tartozó cellákat berajzoljuk, akkor egy toboz hengeresre kitorzított pikkelyelrendezését kapjuk meg. Mivel a cellák meg vannak számozva, ezért a két elrendezés azonosságát — a szár irányú hosszúságdimenziótól eltekintve — a pikkelyszomszédok azonosságából beláthatjuk. Az ábrán jól megfigyelhető a jobbra futó három és a balra futó öt egymás melletti szalag.

Az elrendezések hasonlóságát, azonosságát a szár dimenziótól eltekintve mondtuk ki. Ezért, miután bármilyen más szár szimmetriát természimmetriába transzformáltunk, az összeset deformálhatjuk úgy, hogy az egyszerűség kedvéért négyzet alakú pikkelyekkel lássuk az elrendezéseket.

Az ilyen pikkelyes ábrázolásra ránézve *(4. ábra)*



3. ábra. Egy szár mentén zsugorított 3/8-os levélállás kiterített képe. Az önkényes — a legegyszerűbb, a hajtáskezdőpontok mint rácspontok által meghatározott — pikkelyalaktól eltekintve az elrendezés megegyezik egy jobbra 3 balra 5 pikkely:spirál szalagot mutató lucfenyőtobozáéval



4. ábra. A 3. ábrának megfelelő elrendezés — most négyzetes pikkelyekkel — előállítható az ábra szerinti 3 pikkely szélességű szalag jobbra, vagy 5 pikkely szélességű szalag balra történő felcsavarásával. Az adott elrendezés modellezése szempontjából a két szalag ekvivalens

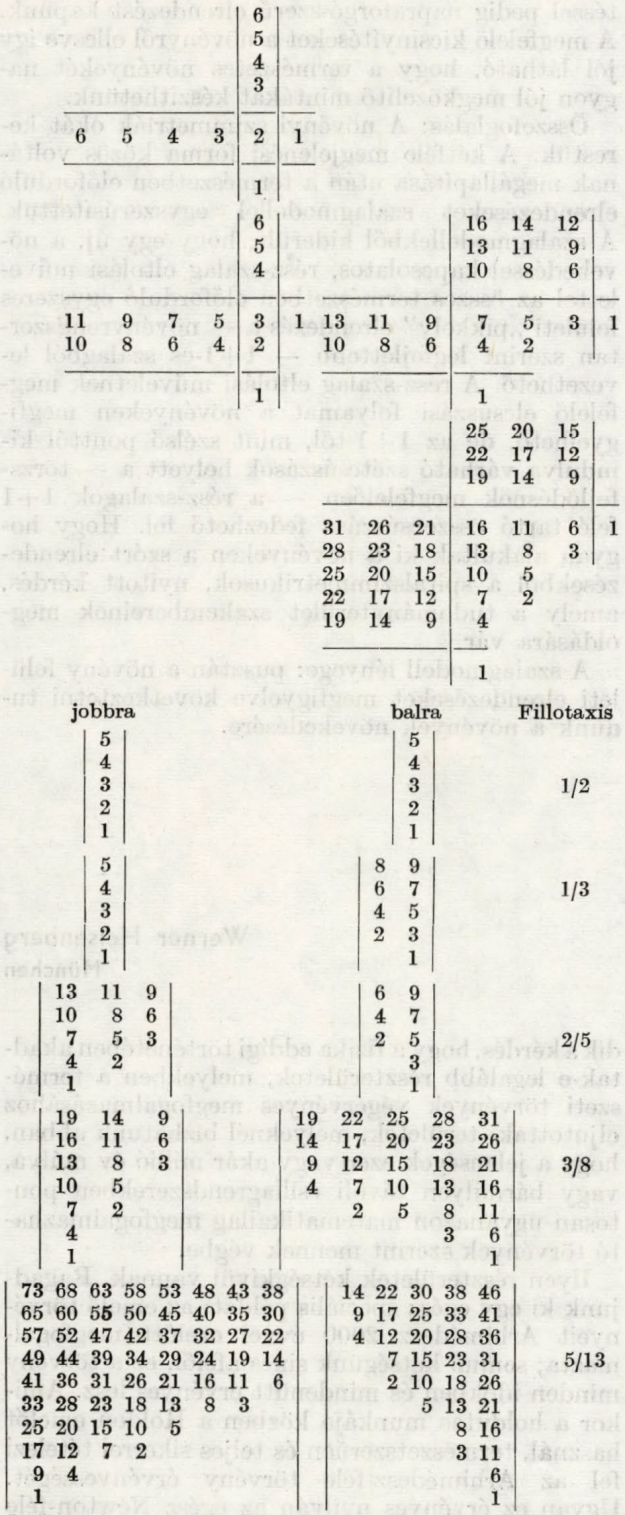
rögtön látszik, hogy vagy csak a jobbra futó három, vagy csak a balra futó öt szalag feltekerésével újra reprodukálni tudom az elrendezést egy hengeres felületen. Ez azt jelenti, hogy a jobbra futó három szalag ekvivalens a balra futó öttel a kettő összetartozik.

Egymás mellé rajzolva a Fibonacci sorozat szerinti első hat szalagpárt *(5. ábra)* egy különös, döntő körülményt vettem észre. Az egymás felett szereplő, különböző fillotaxis típusokhoz tartozó azonos szélességű szalagok csak abban különböznek egymástól, hogy a szélesebb szalagpárú szalagban a rész-szalagok egy pikkelynyi távolsággal jobban el vannak tolva *(6. ábra)*, mint a keskenyebb szalagpárúéi. Mivel ez a tulajdonság a jobb és bal spirálokra váltakozva végig megvan a szalagpárokban, ezért segítségével kapcsolat teremthető a különböző spirálelrendezések között.

Vezessük be tehát a megfigyelt rész-szalag eltolást, mint műveletet. Így a legegyszerűbb 1+1-es szalagpárból kiindulva, a műveletet mindig a kapott szélesebb szalagra alkalmazva sorba megkapjuk a természetben előforduló elrendezéseket *(7. ábra)*. A Fibonacci számokon túlmenően ez a művelet a kapocs a növényi szimmetriák között. [Más kiindulási szalagpárral egy új „növényi" szimmetria családot lehetne felépíteni a rész-

19 17 15 16 14 12 13 11 9 10 8 6 7 5 3 4 2 1	2/5
22 17 12 19 14 9 16 11 6 13 8 3 10 5 7 2 4 1	3/8

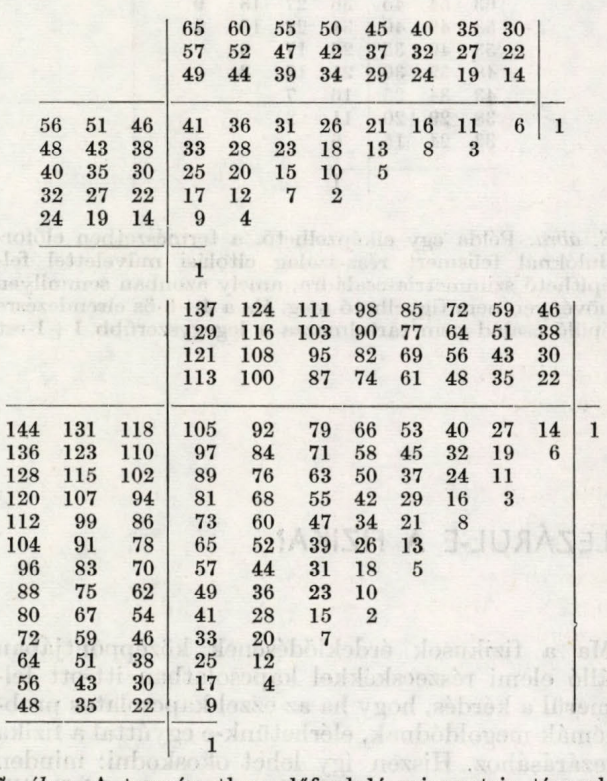
6. ábra. A rész-szalag eltolási jelenség az 5. ábrából kiragadott egyik esetben



5. ábra. A növényeken megfigyelhető szalagpárok. Ha a bal oldalon levő szalagot jobbra felcsavarjuk, akkor ugyanazt az elrendezést kapjuk a hengeren, mintha a jobboldaliakat balra csavartuk volna fel. A természetben mindegyiknek a tükörszimmetrikus elrendezése is megvalósul

szalag eltolási művelettel, de az nem tartalmazná az 1+1-es szalagpárt *(8. ábra)*].

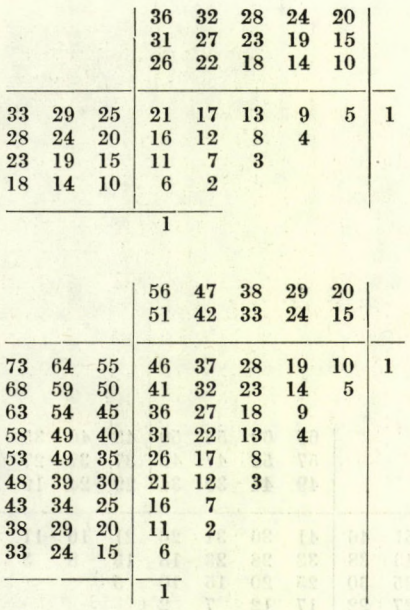
Megfigyelhető-e ilyen elcsúszási jelenség a növényeken? A részszalagok a modellben történő egymás melletti elcsúszásának egy, a növekedés-



7. ábra. A természetben előforduló szimmetria típusok közötti kapcsolat. A rész-szalag eltolási művelettel, az ábrán balról fentről, a legegyszerűbb 1+1-es szalagpártól elindulva megkapjuk az összes természeti szalagpár típust

sel, a rügyben felcsavart és szorosan egymás mellé illesztett „pikkely" (levél, kis virágkehely, magocska) lecsavarodásával kapcsolatos életfolyamat felelhet meg. És valóban, a margaréta bimbóján 21+34 spirálba voltak zsúfolva a kelyhecskék, a virágán 21+13 spirált számláltam, míg az elnyílott virágon és termésen már csak 8+13-at.

Befejezésül a pikkelyes szalag modellel kapott néhány érdekes eredményről szólnék. Ha a pikkelyeket lapos rombusz alakúra készítjük, akkor egyre inkább (minél nagyobb a tompaszög) egymás fölé kerülnek a csavarelrendezésnél egymás fölötti elemek. Sokkal életszerűbb modellt kapunk úgy, hogyha a pikkelyek méretét a számsorban előre haladva csökkentjük (mint ahogy ez minden növényen meg is figyelhető). Nagy Fibonacci számú szalagokkal és az említett pikkelykicsinyí-



8. ábra. Példa egy elképzelhető, a természetben előfordulóknál felismert rész-szalag eltolási művelettel felépíthető szimmetria-családra, amely azonban semmilyen növényen nem figyelhető meg. Ez a 4+5-ös elrendezésre épülő család nem tartalmazza a legegyszerűbb 1+1-est téssel pedig napraforgó-szerű elrendezést kapunk. A megfelelő kicsinyítéseket a növényről ellesve így jól látható, hogy a természetes növényekét nagyon jól megközelítő mintákat készíthetünk.

Összefoglalás: A növényi szimmetriák okát kerestük. A kétféle megjelenési forma közös voltának megállapítása után a természetben előforduló elrendezéseket szalagmodellel egyszerűsítettük. A szalagmodellekből kiderült, hogy egy új, a növekedéssel kapcsolatos, rész-szalag eltolási művelettel az összes természetben előforduló egyszeres felületi „pikkely" elrendezés a — növényrendszertan szerint legfejlettebb — 1+1-es szalagból levezethető. A rész-szalag eltolási műveletnek megfelelő elcsúszási folyamat a növényeken megfigyelhető, de az 1+1-től, mint szélső ponttól kiindulva várható szétcsúszások helyett a — törzsfejlődésnek megfelelően — a rész-szalagok 1+1 felé tartó összecsúszása fedezhető fel. Hogy hogyan alakultak ki a növényeken a szórt elrendezésekből a spirálszimmetrikusok, nyitott kérdés, amely a tudományterület szakembereinek megoldására vár.

A szalagmodell lényege: pusztán a növény felületi elrendezéseket megfigyelve következtetni tudunk a növények növekedésére.

LEZÁRUL-E A FIZIKA?

Werner Heisenberg
München

Ma a fizikusok érdeklődésének középpontjában álló elemi részecskékkel kapcsolatban itt-ott felmerül a kérdés, hogy ha az ezzel kapcsolatos problémák megoldódnak, elérhetünk-e egyúttal a fizika lezárásához. Hiszen így lehet okoskodni: minden anyag és minden sugárzás elemi részekből áll; tehát azok tulajdonságait és viselkedését meghatározó törvények hiánytalan ismerete — esetleg egy „világegyenlet" alakjában, — elvben minden fizikai folyamatnak a kereteit meghatározza. Még ha az alkalmazott fizikában és a technikában további széles körű fejlődés folytatódnék is, az elvi kérdések tisztázása megtörtént, a fizikai alapkutatás lezárult.

A fizika esetleges ilyen kiteljesedéséről szóló tézisnek ellentmondanak a korábbi idők tapasztalatai, amikor ugyancsak jogtalanul gondoltak a fizika hamar bekövetkező lezárulására. Max Planck elmondta, hogy tanára, Jolly le akarta beszélni arról, hogy fizikával foglalkozzék, mert a fizika már egy lényegében lezárt tudomány, olyan ember számára, aki a természettudományban aktív működést akar kifejteni, aligha nyújt lehetőséget. Ilyen hamis prognózist ma senki sem állít fel, és felvetődik a kérdés, hogy a fizika eddigi történetében akadtak-e legalább részterületek, melyekben a természeti törvények végérvényes megfogalmazásához eljutottak; területek, melyeknél bízhatunk abban, hogy a jelenségek ezer vagy akár millió év múlva, vagy bármilyen távoli csillagrendszerekben pontosan ugyanazon matematikailag megfogalmazható törvények szerint mennek végbe.

Ilyen részterületek kétségkívül vannak. Ragadjunk ki egy egész speciális példát: az emelő törvényeit Arhimédesz 2000 évvel ezelőtt megfogalmazta; semmi kétségünk sincs afelől, ez a törvény minden időkben és mindenütt érvényes lesz. Amikor a holdutas munkája közben a Holdon emelőt használ, természetszerűen és teljes sikerrel tételezi fel az Arhimédesz-féle törvény érvényességét. Ugyan ez érvényes nyilván az egész Newton-féle mechanikára. Az asztronauták gondolkodás nélkül megbíznak eredményeiben és aszerint cselekszenek. Itt azonban lehetne már egy ellenvetést tenni: nem módosította-e a relativitáselmélet és a kvantumelmélet a Newton-féle mechanikát? Ha nagy pontosságról van szó, a holdutasnak nem szükséges-e az elméletnek ezeket a finomításait figyelembe vennie? Ha igen, akkor nem azt bizonyítja-e a példa, hogy a mechanika sincs még alapjában lezárva?

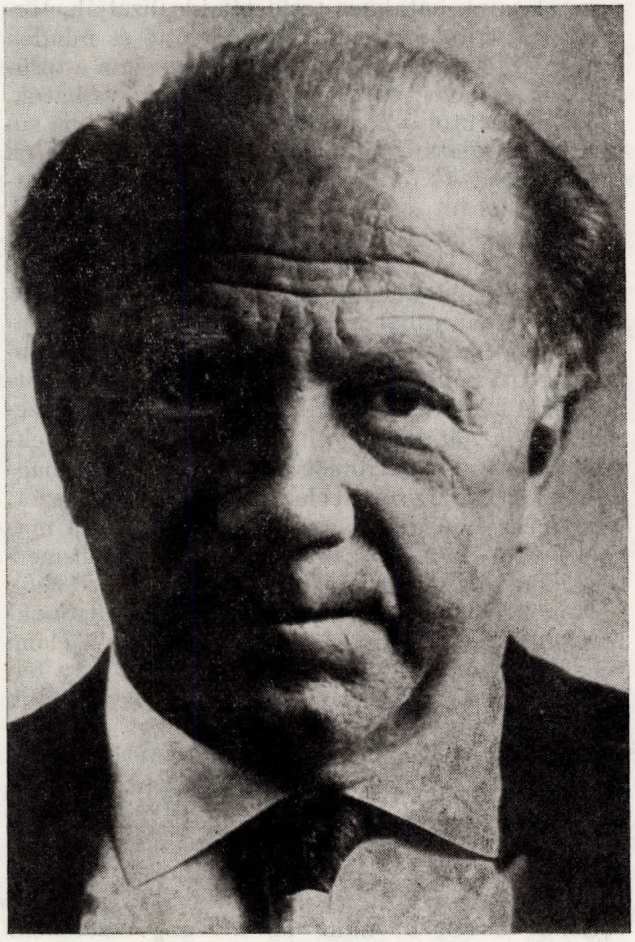
A Süddeutsche Zeitung 1970. okt. 6.-i számában megjelent cikk. Fordította: Kunfalvi Rezső.

Erre választ keresve mindenekelőtt meg kell állapítanunk, hogy a természeti törvények ily nagy, összefoglaló megfogalmazásánál, amilyen első ízben éppen a Newton-féle mechanikában vált lehetővé, a valóság idealizálásáról — és nem a valóságról magáról van szó. Az idealizálás azáltal jön létre, hogy mi a valóságot valamilyen fogalmakkal közelítjük meg, olyan fogalmakkal, melyek a jelenségek leírásánál beváltak és azokról képet adnak; pl. a mechanikában ilyen fogalmak a hely, idő, sebesség, tömeg, erő. Ezzel azonban a valóságról alkotott képet beszűkítjük — ha úgy tetszik: stilizáljuk —, mert ugyanakkor lemondunk a jelenség minden olyan vonásáról, mely ezekkel a fogalmakkal nem fogható fel. Ha ezzel a leszűkítéssel tudatosan élünk, akkor mondhatjuk, hogy a mechanika a Newton-féle törvényekkel le van zárva; ezen akkor azt értjük, hogy a mechanikai jelenségek, amennyiben azok egyáltalában a Newton-féle fizika fogalmaival leírhatók, szigorúan ezen fizika törvényei szerint zajlanak le. Mint már mondottuk, meg vagyunk győződve arról, hogy ezek a tételek évmilliók múlva és a legtávolabbi csillagrendszereken is érvényesek lesznek, és hiszszük, hogy a Newton-féle fizika megjavítására a saját fogalmainak keretén belül nincs lehetőség. Nem állítjuk azonban, hogy ezekkel a fogalmakkal minden jelenség leírható.

Mondhatjuk tehát az említett fenntartással, hogy a Newton-féle mechanika egy lezárt elmélet. Az ilyenfajta „lezárt" elméletet jellemzi a definíciók és axiómák rendszere, mely rögzíti az alapvető fogalmakat és azok kapcsolatait; továbbá az a követelmény, hogy a tapasztalatok széles köre létezik melyeket ez a rendszer nagy pontossággal tud leírni. Az elmélet így a tapasztalatok ezen körének minden időkre érvényes idealizálását képezi.

Vannak azonban más területekre eső tapasztalataink, így más lezárt elméletek is. A 19. század folyamán például a hőtan öltött végleges formát ebben az értelemben, mint sok szabadsági fokkal bíró rendszerek statisztikai tana. Ennek az elméletnek alapvető axiómái ilyen fogalmakat definiálnak és kapcsolnak össze, mint a hőmérséklet, entrópia, energia. Ezek közül az első kettő — a hőmérséklet és az entrópia — a newtoni mechanikában nem is szerepel, az utolsó — az energia — viszont fontos szerepet játszik tapasztalataink legkülönfélébb területén, nemcsak a mechanikában, Gibbs munkája óta a statisztikus hőtan is véglegesen lezártnak tekinthető, és nem kételkedünk abban, hogy törvényei mindenütt, minden időben érvényesek — természetesen olyan jelenségekre, melyeket fogalmakkal, mint hőmérséklet, entrópia, energia tárgyalni lehet. Ez az elmélet is idealizálás; tisztában vagyunk azzal, hogy léteznek állapotok melyeknél hőmérsékletről nem beszélhetünk, így rájuk a hőtan törvényei nem alkalmazhatók.

Az elmondottak alapján világos, hogy a fizikában vannak lezárt elméletek, melyek tapasztalataink bizonyos területének idealizálásaként tekinthetők, és örök érvényre tarthatnak igényt. A fizikának mint egésznek a lezárásáról nyilvánvalóan szó sem lehet.



Az elmúlt 200 év alatt a megismerésnek egészen új területeit sikerült kísérletileg feltárni. Galvani és Volta alapvető felfedezései óta az elektromágneses jelenségeket mind pontosabban megismertük, Faraday a kémiával való kapcsolatokat, Hertz az optikával való kapcsolatokat tárta fel. Az atomfizika alapvető tényei először kémiai tapasztalatok alapján kerültek felfedezésre, azután az elektrolízissel kapcsolatos kísérletek, majd a gázkisülések, később a radioaktivitás tanulmányozása derített fel részleteket. Ennek az óriási új területnek megértéséhez a korábbi idők lezárt elméletei nem bizonyultak elegendőnek. Új átfogóbb elméletek keletkeztek az új tapasztalatok idealizálására. A relativitáselmélet a mozgó testek elektrodinamikájából nőtt ki, és a tér és idő szerkezetének új szemléletéhez vezetett. A kvantumelmélet az atom belsejében végbemenő mechanikai jelenségekről ad számot, de magába foglalja a newtoni mechanikát abban a határesetben, amikor az esemény teljesen objektivizálható, és eltekinthetünk a vizsgálandó tárgy és a megfigyelő közti kölcsönhatástól

A relativitáselméletet éppen úgy, mint a kvantumelméletet, lezárt elméletnek tekinthetjük. Ta-

pasztalataink hatalmas területét idealizálják, törvényeiről feltehetjük, hogy mindenütt és minden időben érvényesek — de ismét csak azokon a területeken, amelyek ezen fogalmakkal tárgyalhatók.

Végül az utolsó pár évtizedben a kozmikus sugarak vizsgálata és mindenekelőtt óriási gyorsítók (pl. Berkeley, Genf, Brookhaven, Szerpuhov) segítségével sikerült az elemi részek fizikáját feltárni. Eközben a jelenségeknek olyan új vonásai kerültek előtérbe, melyek a legkisebb részecskék régi problémájára új fényt vetettek. A fizika korábbi fejlődése folyamán újból és újból igazolódott, hogy nagyobb erők alkalmazásával a korábban legkisebbnek tartott részek még kisebb alkotórészekre bonthatók. A kémikusok atomjai ugyan kémiai módszerekkel nem voltak felbonthatók, de kisülési csövekben, tehát erős elektromos tér hatására, atommagra és körötte keringő elektronokra váltak szét. Nagy energiájú atommagok ütköztetésével a magok tovább bonthatóknak bizonyultak. Felismerték, hogy az atommagok kétféle alkotórészből, protonokból (hidrogén atommagok) és neutronokból állnak, melyek az elektronokkal együtt elemi részeknek tekinthetők. Jogosnak látszott az a feltevés, hogy a protonokat és a neutronokat tovább lehet bontani, ha még nagyobb erőket alkalmazunk, pl. igen nagy energiával ütköztetjük őket. Ezt kísérelték meg a nagy gyorsítókban. Kiderült azonban, hogy az ilyen ütközéseknél valami egészen más történik. Az egymásnak nekilőtt részecskék nagy mozgási energiája nyugalmivá változik, az ütközésnél új részecskék keletkeznek, nem okvetlenül kisebbek, mint az ütköző részecskék. „Felbontásról" tehát itt aligha lehet beszélni. A ma ismert részecskéknél és az óriási gyorsítóknál, melyekkel részecskéket vizsgálunk, elérkeztünk ahhoz a határhoz, ahol a részecskék fogalma elveszti értelmét. Így jó lelkiismerettel állíthatjuk, hogy a ma ismert részecskék valóban az anyag legkisebb részei, ha ennek a fogalomnak egyáltalán értelmet tulajdonítunk.

Tapasztalataink ezen új területét, a részecskefizikát, a korábban kidolgozott, lezárt elméletek — a kvantummechanika és a relativitáselmélet — segítségével nem lehetett tárgyalni, pedig ezek az elméletek már igen kiterjedt idealizálást jelentettek. A kvantummechanika ugyanis — akárcsak a régi newtoni mechanika — feltételezte változatlan, állandó tömegpontok létezését; nem volt szó benne a nyugalmi energia számottevő mértékű átalakulásáról mozgási energiává. Fordítva: a relativitáselmélet elhanyagolja a természet azon sajátos vonásait, melyek a Planck-féle hatáskvantummal függenek össze, tehát feltételezi a jelenségek objektivizálhatóságát a klaszszikus fizika értelmében. A részecskefizika számára egy még általánosabb idealizálást kellett keresni, mely mind a relativitáselméletet, mind a kvantumelméletet határesetként tartalmazza, és az részecskék bonyolult spektrumát olyasféle módon teszi érthetővé, mint azt a kvantummechanika a vasatom komplikált optikai spektruma esetében tette. Nem kétes, hogy ez az idealizálás valamikor matematikai alakban kifejezhető lesz, További kísérleti és elméleti vizsgálatok fogják eldönteni, hogy az eddig javasolt forma a matematikai tárgyalásra alkalmas-e. Ettől a problémától függetlenül felvethető azonban a kérdés, hogy ezzel az idealizálással a fizika teljessé válik-e. Mivel minden fizikai objektum részecskékből áll, állíthatnánk-e, hogy a részecskék viselkedését leíró törvények ismerete egyenlő az összes fizikai objektum viselkedésének ismeretével, és ily módon beszélhetünk-e a fizika lezárulásáról?

Ez a következtetés azonban hamis, mert nem vesz eléggé figyelembe egy fontos pontot. A részecskék lezárt elmélete is — nevezzük „világegyenletnek" vagy nem — szintén egy idealizálásként értelmezendő. Számot ad ugyan a jelenségek óriási kiterjedt köréről, de lehetnek további jelenségek, melyek ennek az idealizálásnak a fogalmaival nem magyarázhatók. Erre a lehetőségre a legszembetűnőbb példa a biológia. A biológia tárgyai is részecskékből állnak ugyan; de a fogalmak, melyekkel biológiai jelenségeket leírni szoktunk — pl. magának az életnek a fogalma — ebben az idealizálásban nem fordulnak elő; a fizikának ebben az irányban tovább kell fejlődnie. Fel lehetne hozni, hogy akkor már nem fizikáról, hanem biológiáról van szó, tehát a fizika mégiscsak lezárult. A fizika és a többi természettudományok között azonban a határok olyan folyékonyak, hogy ezzel a megkülönböztetéssel nem megyünk sokra. A fizikusok többsége megegyezik abban, hogy a fizika és a többi természettudomány közti határ bizonytalansága miatt nem lehet a fizika lezárulásáról beszélni.

A fizikusok egy része egyébként vitatja, hogy a részecskék szűkebb területének kiteljesedése, lezárása belátható időn belül várható lenne. Utalnak mind nagyobb gyorsítók épülésére, melyekkel még nagyobb energiájú ütköző részecskék birodalmába behatolni és ismeretlen, új területet felfedezni lehetne. Ez a nézet egy olyan — sem elméletileg, sem kísérletileg nem igazolt — sejtésen alapul, mely szerint az energia további növelésével minőségileg új jelenségek lépnének fel. A kozmikus sugarak esetében nem találtak minőségileg új jelenségeket, pedig azok az ütköző részecskék energiáját tekintve ezerszer nagyobb energiájúak, mint a legnagyobb eddigi gyorsító berendezés által termelt részecskéké. Nem sikerült felfedezni az elméleti fizikusok által feltételezett „kvarkokat" sem. Nincs tehát sem elméleti, sem kísérleti bizonyítékunk ilyen új területre, bár létezését nem lehet teljesen kizárnunk.

Amíg új tapasztalatok nem merülnek fel, a fizika lezárulását elsősorban a határterületek irányában lehet elképzelni, ill. olyan másfajta fogalmak kialakulásában, melyek a határterületeken kerülnek alkalmazásra. Itt nemcsak a természettudományról van szó. A határterületekhez tartozik a matematika, az információelmélet és a filozófia is. Talán a jövőben nehéz lesz eldönteni, hogy a tudományban egy előrelépés a fizika, az informá-

cióelmélet vagy a filozófia fejlődését jelenti-e, hogy a fizika átterjed-e a biológiára, vagy a biológia alkalmaz-e mind nagyobb mértékben fizikai módszereket és problémafelvetési módot. A fizika lezárulásáról tehát csak akkor beszélhetnénk, ha bizonyos módszereket és fogalomalkotási eljárást a fizika számára kisajátítanánk, másokat viszont más tudományoknak osztanánk ki. Erre azonban aligha kerül sor; a jövő fejlődésének egyik jellemzője éppen a tudomány egységesítése lesz, a történeti határok lebontása az egyes diszciplínák között.

Werner Heisenberg
1901 — 1976

Heisenberg világegyenlete attól szép, hogy alóla rámragyognak a tűzcsiholók, bronzöntők, tengerjárók, csillagfigyelők, de a vérestollazatú ikaruszok, szénajkú eretnekek, szájbavert énekesek is

(Nagy László)

„Ismeretes, hogy a formális szabályokkal szemben, melyeket általában az atomfizikában megfigyelhető mennyiségeknek (pl. a hidrogénatom energiájának) a kiszámítására használnak, súlyos kifogás emelhető. E számítási szabályok lényeges módon felhasználnak olyan mennyiségek közt fennálló összefüggéseket, amelyek — úgy látszik — elvileg megfigyelhetetlenek. (Ilyen pl. az elektron helye és keringési ideje.) Ezeknek a szabályoknak tehát nincs semmilyen szemléletes fizikai alapjuk, hacsak nem ragaszkodunk még mindig ahhoz a reményhez, hogy a mondott, mindeddig megfigyelhetetlen mennyiségek később talán kísérletileg hozzáférhetővé válnak. A tapasztalat azonban azt mutatja, hogy formális szabályok kiterjesztése a több-elektronos atomok tárgyalására lehetetlennek bizonyult. A klasszikus mechanika kiegészítésképpen bevezetett szabályok kudarcát a klasszikus mechanikától való eltérésként szokás értelmezni. Ezt a felfogást azonban aligha tekinthetjük kielégítőnek, hiszen már az egészen általános érvényűnek mutatkozó Einstein—Bohr-féle frekvenciafeltétel is teljes mértékű szakítást jelent a klasszikus mechanikával, így a klasszikus mechanika érvényességére éppenséggel már a legegyszerűbb kvantumos probléma esetében sem gondolhatunk. A tények ilyen állása mellett tanácsosabb az eddig meg nem figyelt mennyiségek (így az elektron helye és keringési ideje) megfigyelésére vonatkozó reményünket végleg feladni, egyszersmind tehát elismerni, hogy az említett kvantumfeltételek részleges egyezése a tapasztalattal többékevésbé a véletlen műve, és kísérletet tenni egy a klasszikus mechanikával analóg kvantummechanika kiépítésére, melyben csak megfigyelhető mennyiségek közt fennálló összefüggések fordulnak elő.”

E szavakkal kezdődött Werner Heisenberg munkája, amelyet 1925-ben közölt a Zeitschrift für Physik. Ebből a célkitűzésből született meg a kvantummechanika, az emberi értelemnek talán leghatékonyabb szerszáma a természet megismerésére indított vállalkozásban.

Korábban az $F = -e^2/r^2$ erőtörvényből kiindulva ellipszispályákkal próbálkoztak magyarázni az atom elektronszerkezetét. A klasszikus mechanika egyértelmű következtetése volt a Rutherford-féle atommodell, de annak szerkezeti instabilitása szöges ellentétbe került elemi kémiai tapasztalatokkal: a kémiai elemek tulajdonságainak lenyűgöző állandóságával. Az ellipszispályákra pótlólag kirótt Bohr-Sommerfeld-féle kvantumfeltételek (amelyekre Heisenberg célzott) egyetlen atomnál, a hidrogénatomnál ellentmondások árán vásárolták meg a tapasztalati egyezést.

Heisenberg emberi nagysága abban nyilvánult meg, hogy a természetet nem akarta belekényszeríteni a fizikusok fejében rögződött évszázados gondolati szkémába. A valóságot jobban tisztelte a könyveknél: engedte, hogy az atom által önmagáról vallott adatok önként álljanak össze egy természetes rendbe. De ez a rend már nem a klaszszikus mechanika volt.

Mit árul el az atom elektronjainak helyzetéről? Az egyes atomok jellegzetes fényt sugároznak ki. Minden egyes $i \to j$ termátmenethez egy színképvonal tartozik. Az elektromágneses sugárzás irányeloszlásából, frekvencia- és intenzitás-adataiból visszakövetkeztethetünk annak a parányi elektronantennának $ex_{ij} \sin \omega_{ij} t$ rezgésére, amely a színképvonalat létrehozta. Heisenberg az elektronrezgés x_{ij} amplutúdóira és ω_{il} frekvenciáira koncentrált. Mi jellemzi az atomban az elektron helyzetét? „Egy zsák amplitúdó!” E szavakkal állított be a huszonnégy éves egyetemi hallgató Göttingában Max Bornhoz. A magasabb közelítések, a kvadrupól sugárzási átmenetek vizsgálata azt is elárulta, hogyan kombinálódnak össze ezek a dipólus-átmenetek:

$$(x \cdot x)_{ij} = \sum_r x_{ir} x_{rj}$$

Born mondta meg Heisenbergnek, hogy az

$$\begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & \cdots \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & \cdots \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \end{pmatrix}$$

„zsákot”, amelybe ő az amplitúdókat pakolta, mátrixnak nevezik a matematikusok. Az atomok

által elárult, fent közölt képlet a mátrixok szorzásszabálya. Az új mechanika első megfogalmazásaként így született meg a kvantummechanika, fél évszázaddal ezelőtt.

A modern fizika világrajötténél sokan bábáskodtak: Planck, Einstein, Bohr, Broglie, Schrödinger. Az emberi gondolkodás Nobel-díjjal koszorúzott óriásai voltak. A klasszikus fizika évszázadok által biztosított talaján állva próbálták megérteni a kvantumok világát. Csak ellentmondásokkal terhelt részsikereket érhettek el. Heisenberg volt az, aki egy huszonnégy éves fiú kíváncsiságával és ártatlanságával nézte az atomokat. Tiszta szívvel, elfogulatlan fővel hallgatta meg, amit a természet önmagáról mesél. A teljes újrakezdés bátorsága volt meg őbenne, ezért sikerült neki megértenie az anyag egyetemes mozgástörvényeit. Így ő vitte teljes diadalra a modern fizika forradalmát. A forradalom sikerei fél évszázad alatt minden várakozást felülmúltak. Lenyűgözően kiteljesedett az egzakt természetkutatás területe. Egységessé vált az anyagi világ, egysége által erőssé a természettudomány.

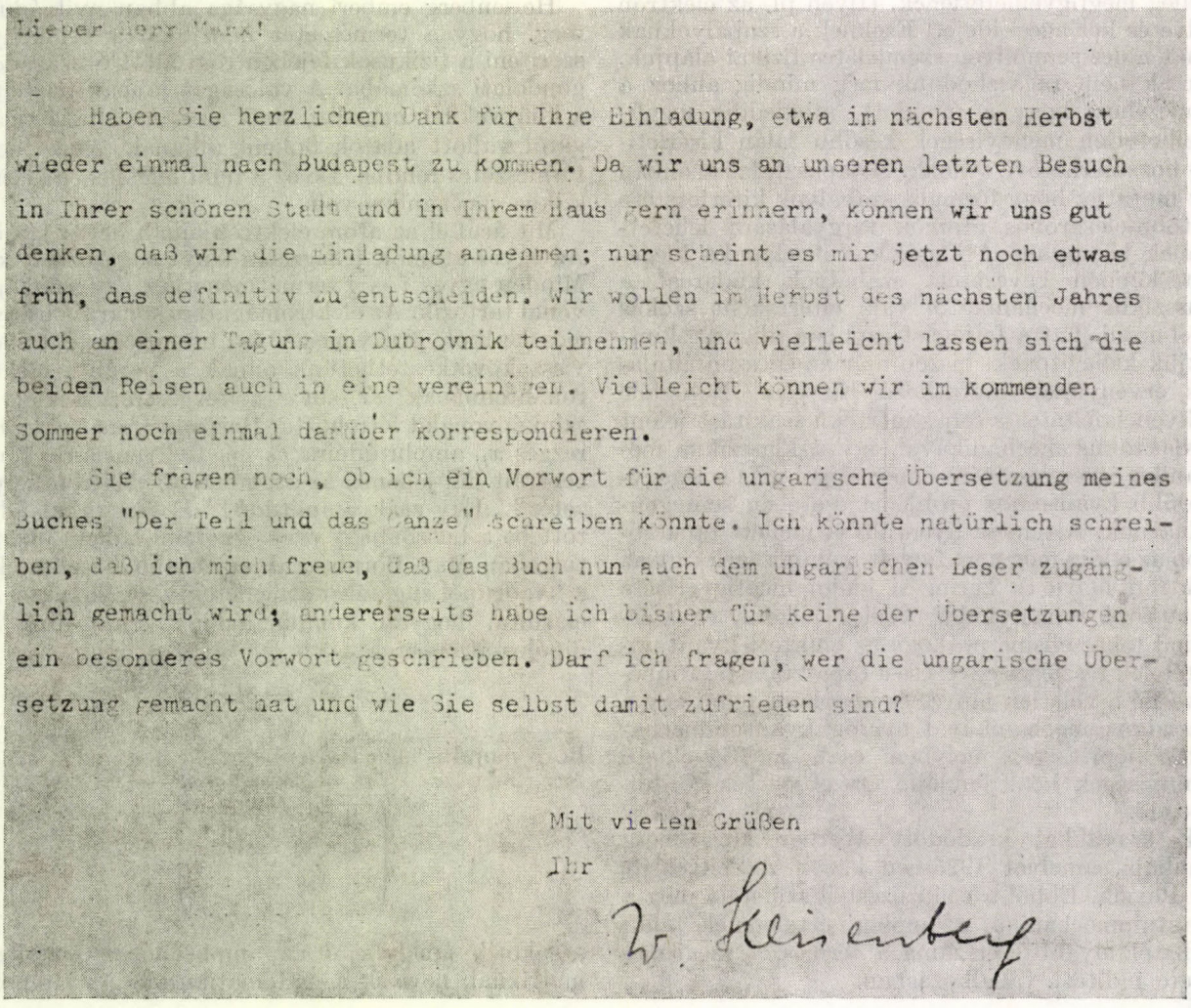
Gamow, Teller Ede és Bethe (az alagútjelenség és magfúzió révén) az atommagokra és csillagokra alkalmazták a kvantummechanikát. Így magyarázták meg nekünk a napfény születését és a csillagok sorsát. Heisenberg és Wigner Jenő az atommag energiaszintjeinek értelmezésével bizonyították, hogy a magszerkezet is kvantumtörvényeket követ.

Heitler és London elemi kvantummechanikai számítással vezették le a hidrogénatomokat molekulával kapcsoló kémiai kötést. Így oldódott meg a kémia nagy rejtélye, amely azt eddig elszigetelte a fizikától. Az elektron mozgásának alapegyenleteitől kiinduló számításokból egy új hatékony tudomány bontakozott ki: a kvantumkémia.

A testek szilárdságtani, optikai, elektromos és mágneses tulajdonságait korábban emprikusan tudomásul veendő adatnak tekintették. Ma már a kvantummechanikai soktest-probléma alapján értelmezzük őket. Heisenberg a mágnesekre adott kvantummechanikai magyarázatot. Századunk második felében új funkciókra képes anyagokat (tranzisztorokat, kvantumoptikai fényforrásokat) alkotnak a kvantumtörvények alapján.

A kvantummechanika egyik legszebb sikere volt, amikor a negyvenes években Erwin Schrödinger rámutatott arra, hogy az életnek is alapjá-

Heisenberg egyik utolsó levele Magyarországra (1974)



Lieber Herr Marx!

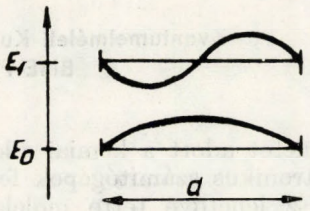
Haben Sie herzlichen Dank für Ihre Einladung, etwa im nächsten Herbst wieder einmal nach Budapest zu kommen. Da wir uns an unseren letzten Besuch in Ihrer schönen Stadt und in Ihrem Haus gern erinnern, können wir uns gut denken, daß wir die Einladung annehmen; nur scheint es mir jetzt noch etwas früh, das definitiv zu entscheiden. Wir wollen im Herbst des nächsten Jahres auch an einer Tagung in Dubrovnik teilnehmen, und vielleicht lassen sich die beiden Reisen auch in eine vereinigen. Vielleicht können wir im kommenden Sommer noch einmal darüber korrespondieren.

Sie fragen noch, ob ich ein Vorwort für die ungarische Übersetzung meines Buches "Der Teil und das Ganze" schreiben könnte. Ich könnte natürlich schreiben, daß ich mich freue, daß das Buch nun auch dem ungarischen Leser zugänglich gemacht wird; andererseits habe ich bisher für keine der Übersetzungen ein besonderes Vorwort geschrieben. Darf ich fragen, wer die ungarische Übersetzung gemacht hat und wie Sie selbst damit zufrieden sind?

Mit vielen Grüßen

Ihr

W. Heisenberg



ban kvantumjelenségnek kell lennie. „Mi az élet?" című írását tekintik a modern biokémiai tankönyvek a molekuláris genetika születésenapjának. Az élet két alapvonása a genetikai stabilitás és a spontán mutációk öröklődő genetikai ugrása. Az élő sejt kromoszómáiban egy gén (egy tulajdonság) alig 1000 atomra összpontosul. Ennek a struktúrának a stabilitása érthetetlen a klasszikus mechanika alapján. (A Brown-mozgás minden információt kitörölne.) De egy kis d átmérőjű tartományba zárt részecske a kvantummechanika szerint alapállapotban $\lambda/2 = d$ hullámhosszal, $mv = h/\lambda$ impulzussal, tehát élesen meghatározott $E_0 = mv^2/2 = h^2/8md^2$ energiával rendelkezik. Ha a struktúrát meg akarjuk bontani, ezt csak úgy érhetjük el, hogy a felharmmonikust gerjesztjük. Az első felhangnál $\lambda = d$, tehát $E_1 = 4h^2/8md^2$ a gerjesztett állapot energiája. Amíg a hőmozgás kT energiája kisebb a gerjesztéshez szükséges $E_1 - E_0 = 3h^2/8md^2$ energiakvantumnál, addig a kötött kvantumállapot merev struktúrának mutatja magát. Ez magyarázza az atomok és molekulák keménységét, az elemek és vegyületek tulajdonságainak meghatározottságát, a gének és fajok állandóságát. Ilyen alapon látta előre Schrödinger, hogy a kromoszómának kvantumstruktúrának, aperiódikus kristálynak kell lennie. E téren egy évtizeddel előzte meg Rosalind Franklin, Francis Crick, James Wattson felfedezését, a kettős csavar megismerését.

A kvantummechanika a kevés szabadsági fokkal rendelkező rendszerek tanulmányozásával indult el. De közben nagykorúvá érett a tudományt hasznosító technika is. Fokozódott a kísérleti kutatás intenzitása, egyre több energiát koncentráltak az atomra. Az anyag mélyén felolvadtak a befagyott szabadsági fokok. Az anyagban rejlő lehetőségek kimeríthetetlen kincsesháza tárult fel. Heisenberg, Pauli, Wigner, Dirac végtelen szabadsági fokú rendszerekre általánosították a kvantummechanikát. Ebből fejlődött ki a nagyenergiájú részecskefizika. Heisenberg és Landau írták le elsőként új részecskék csoportos keletkezését. Azóta sincs megállás. De mindig azé lett a megértés díja, aki egyenest haladt tovább a Heisenberg által 1925-ben kijelölt úton. Soha nem kellett visszakanyarodnunk az 1925 év előtti álláspontho z, hogy másik irányban keressük a megoldást.

Az utolsó évtizedekben Heisenberg a világegyletet, az atomi részecskék kimerítő mozgástörvényét kutatta. Egyetlen egyenletbe kívánta sűríteni az anyagi világ egységét. Az anyag azonban — éppen kvantumos viselkedése által — kimeríthetetlennek bizonyult. A hetvenes években tárult fel egy minőségileg új világ: a proton parton-szerkezete. A modern természettudomány átformálta világképünket és szüntelenül alakítja műszaki környezetünket.

Egy hideg februári vasárnapon 1976-ban Werner Heisenberg kívált a kutatók sorából. Neve és egyénisége ott lesz a jövő évezred történelemkönyveiben. Ragyogó 20. századunk legnagyobb fizikusaként fogják tisztelni. Vannak, akik őt ítélik minden idők eddig legnagyobb fizikusának. Talán Galilei, Faraday és Einstein voltak hozzá hasonlók, akik ilyen elfogulatlanul tiszta kíváncsisággal tudták fürkészni a természetet. De Heisenberg ezt olyan területen tette, ahol érzékszerveink, szavaink és józan eszünk támogatására sem lehet számítani. Ahol csak az objektív mérés és szabatos logika adhat útbaigazítást, ahol csupán a valóság feltétlen tisztelete segít. Annak a kisiskolásnak, akit ezer év múlva a 20. századról kérdeznek, ez is eszébe jut majd: „Akkor született a kvantummechanika, akkor élt Heisenberg. . ." Szerencsés az a fizikus nemzedék, amelyik mindennek kortársa lehetett. Találkozhatott Heisenberggel, vitatkozhatott vele és példát vehetett róla. Amelyik fizikus-nemzedéknek az atomszerkezet feltárása adott kenyeret.

M. Gy.

A KVANTUMMECHANIKA ÉS A KÉMIA

Kapuy Ede
Kvantumelméleti Kutató Csoport
BME Fizikai Intézet

A kvantummechanika megszületése a fizika után legközvetlenebbül a kémiát érintette. A XIX. század elején gyors fejlődésnek induló ún. klasszikus kémia komoly érdemeket szerzett az ókori atomelmélet feltámasztásában és kísérleti megalapozásában. A vegyértékfogalom bevezetése és a szerkezeti elmélet fejlődése hasznos segítséget nyújtottak az egyre növekvő tapasztalati anyag rendszerezéséhez. A korabeli fejletlen kísérleti technika azonban nem tette lehetővé, hogy kimutassák az atomok összetett voltát és megismerjék az alkotórészeik között ható erők természetét. Ezeknek a kérdéseknek tisztázásában a XIX. század vége óta már a fizika játssza a vezető szerepet. Thomson felfedezi az elektront mint valamennyi atom univerzális alkotórészét. Rutherford szórási kísérlete azt mutatja, hogy az atomok parányi bolygórendszerhez hasonlatosak: tömegük zöme, valamint a pozitív töltés kis átmérőjű gömbben van koncentrálva és ekörül keringenek a negatív töltésű elektronok. A modell elméletét Bohr adja meg ún. kvantumfeltételekkel egészítve ki a klasszikus mechanika törvényeit. Az elmélet segítségével sikerült magyarázni az egyelektronos atomok színképét. Később kiderült azonban, hogy nem alkalmas a többelektronos rendszerek, köztük a kovalens kötés legegyszerűbb példájaként ismert hidrogénmolekula tárgyalására.

A kémiai kötés értelmezése csak a kvantummechanika segítségével vált lehetővé. Közvetlenül Heisenberg és Schrödinger alapvető dolgozatai után, még 1927-ben jelenik meg Heitler és London munkája a hidrogénmolekula kötéséről. Noha az általuk számított kötési energia nem egyezett meg pontosan a kísérleti értékkel, nyilvánvalónak látszott, hogy az eltérés oka pusztán matematikai természetű: az alkalmazott közelítő módszer hiányosságaira vezethető vissza. A közelítés finomításával a kötési energia számított értéke egyre pontosabbá válik.

Heitler és London dolgozatának megjelenésétől számítva napjainkig a kémia maradt a kvantummechanika egyik leghálásabb alkalmazási területe. (A kémián belül a kvantummechanikát sokan külön szóval kvantumkémiának nevezik, de meg kell jegyezni, hogy a szónak még nincs egységesen elfogadott jelentéstartalma.)

A kvantummechanika legfontosabb feladatai a kémiában a következők:

1. A kémiai fogalmak elméleti megalapozása.
2. Atomok és molekulák fizikai (kémiai) állandóinak kiszámítása.
3. Atomok és molekulák kölcsönhatásainak (van der Waals erők, kémiai reakciók) tárgyalása.

Ezek a feladatok természetesen nem függetlenek egymástól. A 2. feladat megoldása szükséges feltétele az 1. és 3. feladatok eredményes megoldásának.

Nagy lendületet adott a kémiai alkalmazásoknak az elektronikus számítógépek felhasználása (1956 óta). Ez lehetővé tette molekulák egyes olyan fizikai állandójának kiszámítását, amely nehezen mérhető.

A legmegbízhatóbbak az ún. ab inició számítások, amelyek a rendszer összes elektronját figyelembe veszik és az atomi állandókon kívül nem használnak fel egyéb tapasztalati adatot.

A legtöbb számítást eddig a független-részecske modell Hartree—Fock—Roothaan-féle változatával végezték, amely a rendszer pályáit elemi függvények szerint fejti sorba és a sorfejtés együtthatóit iterációs módszerrel határozza meg. A független-részecske modellen alapuló módszerek jó eredményt adnak a molekula konformációjára (az atomok egymáshoz viszonyított helyzete a molekulában) és töltéseloszlására.

Az irodalomban található legnagyobb számításokat a karbazol-trinitro-fluorenon komplexre (50 atom, 248 elektron) és a tetratiofulvalen-tetracianokinodimetán (TTF—TCNQ) komplexre (34 atom, 208 elektron) végezték. Ilyen méretű számítások csak az eddig ismert legnagyobb számítógépeken végezhetők (pl. IBM 370/195). Egyre gyakrabban találkozunk viszont 100 körüli elektront tartalmazó rendszerek tárgyalásával. Szerves molekulák konformációjának meghatározása gyakorlatilag is nagy jelentőségű. A gyógyszer-hatékonyság nagyon érzékenyen függ a konformációtól. A kísérletileg hatékonynak talált molekulák konformációjának ismeretében viszont megállapítható, hogy melyek azok az atomcsoportok, amelyek az adott hatás szempontjából lényegesek. Ily módon hasonló hatást mutató más molekulák szintetizálhatók, amelyeknek egyéb tulajdonságai esetleg előnyösebbek. Kvantummechanikai konformáció-számítások felhasználásával sikerült pl. a major trankvilláns típusú gyógyszerek hatócsoportját felderíteni és új major trankvillánsokat szintetizálni.

A független-részecske modellen alapuló közelítő módszerek hátránya, hogy a vegyértékhéj energiaváltozásaira nem adnak pontos eredményeket. Ennek oka az, hogy elhanyagolják az ún. elektronkorrelációt, vagyis a rendszer elektronjainak csak az átlagos kölcsönhatását veszik figyelembe és nem a „pillanatnyi" kölcsönhatását.

Jelenleg már több olyan módszer is rendelkezésünkre áll, amely az elektronkorrelációt is figyelembe veszi.

Kis elektronszámú ($N = 2 - 4$) rendszerekre léteznek olyan eljárások, amelyeknek pontossága eléri, sőt meghaladja a spektroszkópiai mérések pontosságát. Az elmélet és a kísérlet előnyösen kiegészíti egymást. Ez jól szemléltethető a hidrogénmolekula példáján. Amikor a molekula disszociációs energiáját nagy pontosságú közelítő módszerrel kiszámították, kitűnt, hogy a számított

és mért érték eltér egymástól, az eltérés nagyobb a mérés hibahatáránál. Több éves vizsgálat után derült ki, hogy a mért érték a hibás. A hiba okának megtalálása után revideált mért érték (36 117,3 ± ± 1 cm^{-1}) már a hibahatáron belül megegyezik a számítottal (36 117,4 cm^{-1}).

Nagyobb elektronszámú ($N = 10 - 30$) rendszerekre a hatalmas mennyiségű számítási munka miatt ilyen pontos eredmények nem nyerhetők. A közelmúltban számos olyan módszert kidolgoztak, amely túlmegy a független-részecske modellen és a vegyértékhéj energiaváltozásaira annál egy nagyságrenddel pontosabb eredményeket szolgáltat. Példaképpen nézzük meg a 10 elektront tartalmazó metánmolekulát. A molekula atomjaira való szétbontásához szükséges energia a mérések szerint 18,3 eV. A független-részecske modell alapján számított kötési energia 14,3 eV (eltérés: 21,5%), míg az elektronkorrelációt is figyelembe vevő módszer 17,6 eV-ot (eltérés: 3,9%) ad. A molekula első ionizációs energiájának kísérleti értéke 14,4 eV ,a független-részecske modell alapján számított érték 14,9 eV (eltérés: 3,2%), az elektronkorrelációt is figyelembe vevő módszer pedig 14,3 eV-ot (eltérés: 0,8%) ad.

Az ab iníció módszerek alkalmazását a szükséges számítási munka mennyisége korlátozza, amely a tárgyalt rendszer elektronjainak számával rohamosan nő. Jelenleg a 300 körüli elektront tartalmazó rendszerek jelentik a felső korlátot. A számítógépek és a számítási módszerek fejlődése következtében azonban ez a korlát folyamatosan tolódik el a nagyobb elektronszámú rendszerek irányába.

Az ab iníció módszerekkel szemben az ún. félempirikus módszerek kevésbé megbízhatóak, de jóval kevesebb számítási munkát igényelnek. Kellő kritikával ezek is eredményesen alkalmazhatók speciális vizsgálatokra.

A számítások elterjedése visszahat a kémikusok szemléletére is. Egyes fogalmak jelentése pontosabbá válik (pl. delokalizáció — lokalizáció) mások fokozatosan kiszorulnak a használatból (pl. hibridizáció).

A kvantummechanikát a kémiában eddig főképpen meghatározott számú atommagból és elektronból álló rendszerek „normális" állapotainak vizsgálatára alkalmazták. Sokan úgy vélik, hogy mind a kémiában, mind a biológiában fontos szerepet játszhatnak a szupravezető állapothoz hasonló „anomális" kvantumállapotok is. Ilyeneket eddig még nem sikerült kimutatni. Kombinált kísérleti és elméleti vizsgálatuk jelenleg az érdeklődés homlokterében áll.

Végül felmerül a kérdés, van-e határa a kvantummechanika érvényességének és mennyiben érinti ez a kémiai alkalmazásokat? A kvantummechanika törvényei a környezettől elszigetelhető zárt (illetve a környezettel adott kölcsönhatásban levő nyílt) rendszerekre vonatkoznak. Az eddigi tapasztalatok azt mutatják, hogy a viszonylag kis szabadsági fokú atomok illetve molekulák ilyen rendszereknek tekinthetők. A szabadsági fokok számának növekedésénél azonban egyes esetekben olyan új tulajdonságok léphetnek fel, hogy a rendszer már nem szigetelhető el környezetétől. Eddig nem sikerült azonban kijelölni azt a határt és azokat a rendszereket, ahol ez bekövetkezik.

A FIZIKA TANÍTÁSA

A TERMÉSZETTUDOMÁNYOK KOMPLEX TANÍTÁSA ÉS A MATEMATIKA

Korsós Ferencné
Budai Nagy Antal Gimnázium, Budapest

A Budai Nagy Antal Gimnáziumban 1972. szeptember óta folyik a természettudományok komplex tanítása, — azaz egy-egy osztályban már első évfolyamon fizikatanítás kezdődik, — vagy folytatódik, ha az általános iskola szemszögéből nézzük — összehangolva a többi természettudománnyal, elsősorban a kémiával. Erről a témáról már megjelent néhány cikk a Fizikai Szemlében, (1973/1 szám, 1973/12. szám, 1974/3. szám) és A Fizika Tanításában (1974/1. szám), nem érintették azonban ezek a cikkek, hogy hogyan viszonyul a problémához a matematika?

Múlt tanévben kapcsolódtam be a kísérletbe matematikusként, és úgy érzem, egy év távlatából már érdemben tudok számot adni tapasztalataimról.

A lényeg röviden szólva: a fizika órákon a szaktanár ne ütközzék technikai nehézségekbe, azaz a matematikaapparátus már készen álljon egy-egy probléma megoldására, s ne kelljen a mélyebb összefüggések kutatása közben állandóan beleütközni az ellenvetésbe, hogy „ezt matematikából még nem tanultuk"; — s aztán valamiféle áthidaló vagy félmegoldást keresni.

Másrészt a matematika órák tanmenetét úgy kell összeállítani, hogy az semmiképpen se csorbítsa a tárgy saját belső logikáját, és mindenkor szem előtt tartsa a fokozatosság elvét, a tanulóknak pedig módjuk legyen a rendelkezésre álló tankönyvek használatára.

Első osztályban a következő tematika szerint haladva sikerült a kettős célnak eleget tennem, megfelelő eredményességgel:

I. Függvények,
II. Műveletek természetes számok halmazában,
III. Műveletek racionális számok halmazában,
IV. Műveletek valós számok halmazában,
V. A hatványozás általánosítása, n.gyök,
VI. Ponthalmazok keresése és egymáshoz rendelése (geometriai transzformációk bevezetése, hasonlóság is),
VII. Egyenletrendszerek.

Ugyanakkor a fizikát Török Tivadarné kartársnő a következő fejezetek szerint tanította:

I. A mozgás,
II. Az erő és tömeg,
III. Munka és energia,
IV. Merev-testek egyensúlya.

A két tárgy közötti koncentrációt közelebbről megvizsgálva:

Elengedhetetlenül fontosnak tartom, hogy a tanulók elsősorban a függvénytani alapfogalmakkal ismerkedjenek meg. A halmazok egymáshozrendelése és az arányosságok vizsgálata során rendkívül tág lehetőségek vannak az általános iskolában tanult fizikai összefüggések elemzésére, érvényességi körük megállapítására; közben már a matematika órán szóba kerülnek az egyenesvonalú egyenletes mozgás grafikonjai; — sőt különböző kezdeti feltételekkel induló (siető, illetve késő) és nem egyirányú mozgások ábrázolása és viszonyítása is megtörténik; majd a másodfokú függvény vizsgálatakor újból szó kerül a függvény menete és a sebesség viszonya közti kapcsolatról is (derivált előkészítése). Az implicit alakban megadott függvények kifejtése közben máris előfordul az egyenletek átalakításából annyi, amennyire a tanulóknak a fizikai képletek rendezésekor egyelőre szükségük van.

A következő három fejezet során a számfogalom tervszerű fejlesztése és a valós számkör kialakítása történik meg. A természetes számok halmazának elemzése során a tanulók megismerkednek a halmazelméleti alapfogalmakkal, jelölésekkel, a részhalmaz és egyesítés definíciójával; s ennek megfelelően ponthalmaz—keresési feladatokat oldanak meg az analitikus síkon is. A hatványozás és a számelméleti alapfogalmak taglalása közben kombinatorikai meggondolásokat végeznek, majd a számkörbővítés logikai menetét követve a halmazok körében az „elhagyás" és a „közös rész képzés" műveletével ismerkednek meg.

A racionális számok halmazának felépítése folyamán főhangsúlyt kap az, hogy a műveletek végzése törtek osztályai közt történik; s ekkor már százalékos mozgási és munkavégzési feladatokat oldanak meg paraméteres formában is.

Ezek a feladattípusok megelőzik a kémia órákon történő, oldatok koncentrációjával foglalkozó számításokat, s ugyanakkor az eddig vázolt halmazelméleti felépítés nagymértékben hozzájárul a tanulók logikus gondolkodásának, összehasonlító és elvonatkoztató készségének fejlesztéséhez, amely a koordinált tantárgyi oktatás alapszemléletének lényegét képezi.

A valós számok halmazának kialakításával együtt a négyzetgyök fogalma, azonosságai, és alkalmazása is első osztályban kap helyet a megfelelő függvények ábrázolásával együtt, azt rögtön követi a hatványozás általánosítása, a n.gyök fogalma és az exponenciális függvény.

Így körülbelül január végére a tanulók a logaritmálás kivételével megismerik (vagy átismétlik) a műveleteket, ill. azok inverzeit. Éppen ez az egyik nagy előnye ennek a tárgyalási módnak: megtörténik az általános iskolai anyag magasabb szintű rendszerezése, s ezzel párhuzamosan a függvénykapcsolatok fogalomkörének bővítése és a matematikai logikai nyelv tervszerű fejlesztése.

Fizika órákon pedig éppen ekkor következnek olyan feladatok, mint tömegvonzási erők számítása, összehasonlítása a Coulomb-féle elektrosztatikus vonzó- és taszítóerőkkel, s ezekből következtetések a magerőkre, mint nagyságrendileg a legnagyobbakra.

Geometriai ismeretek szerzésére a matematika órákon csak ezután kerül sor. Ponthalmazok megfigyelése, keresése, majd egymáshoz rendelése következik. Az egybevágósági és hasonlósági transzformációk bevezetésekor a szemléltetés és a térszemlélet fejlesztése dominál, s a leíró jellegű tárgyalást majd csak a tanév végi rendszerező ismétlésnél követik több órán át komolyabb szerkesztési feladatok. Most a főcél: mire a tanulók fizikából elkezdik a merev testek sztatikáját, már váljon készséggé a szögfüggvények használata derékszögű háromszögre visszavezethető feladatok megoldásában.

Így nem ütközik nehézségbe fizika órán a legáltalánosabb tárgyalási mód: erőrendszerek vizsgálata x és y irányú komponensekre bontással; vagy egyensúlyi feltételek egzakt felírása egyszerű gépeknél, főleg a lejtőnél.

Az eltolás transzformációjának tanítása során viszont a matematika órán már készen áll a vektorfogalom és a vektorok összeadása, amely fizikai tapasztalat eredménye, s ezzel kapcsolatban csak a műveleti azonosságok tisztázása van hátra.

Végül az egyenletrendszerek beiktatása azt a célt szolgálja, hogy az évvégi összefoglalások során mind matematikából, mind fizikából lehessen kissé összetettebb feladatokat is megoldani.

Nem került sor első osztályban a polinomokkal, tört- és irracionális kifejezésekkel való műveletekre; — ez második osztályban fog megtörténni, ugyanazt a halmazéleti felépítésmódot követve, mint ami a valós számkör kialakítását meghatározta az első osztályban.

Nem érezzük hiányát! Ilyen átalakításokra nincs még szükség a fizika órákon sem, s a tanulóknak jobb második osztályban találkozni a sok algebrai kifejezéssel, amikor számolási készségük már jóval fejlettebb.

Későbbre maradtak ennek megfelelően a törtes egyenletek, egyenlőtlenségek, egyenletrendszerek is, — hiszen a tanulók jól ismerik a fordított arányosságok függvénykapcsolatát, grafikonját, — s többre még nincs szükségük ebből a témakörből.

Ugyancsak másodikban kerül sor a különböző geometriai tételek kimondására, bizonyítására és megfordítására is, amelyek eddig a geometriai transzformációkhoz kötődtek. Tapasztalatom szerint első osztályban a tanulók többségének absztraháló képessége nem jut el arra a nívóra, hogy világosan lássák a viszonyt a szükséges és elégséges feltételek között; kedvezőbb a helyzet, ha második osztályban tanulják ezeket a hozzájuk kapcsolódó feladatokkal együtt.

Sokkal lényegesebbnek tartom, hogy előtérbe kerüljön az analízis, az újkori matematika legnagyobb alkotása, és a matematika tanításában is uralkodóvá váljék a modern filozófia és természettudomány mozgást, változást és fejlődést vizsgáló világképe.

Így a matematika valóban a természettudományok alaptárgyává válhat, s nem csupán az önálló logikus gondolkodásra nevelés megvalósítása képezheti egyenlen célját.

A tanításban igen jól segít és sok ötletet ad az a matematikai módszertani anyag, amelyet az Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Karának Matematika Szakmódszertani Csoportjától rendszeresen kapok, s ezért ezúton is szeretném köszönetemet kifejezni.

ESEMÉNYEK

AZ EÖTVÖS LORÁND FIZIKAI TÁRSULAT DEBRECENI VÁNDORGYŰLÉSÉNEK MEGNYITÓ SZAVAI

Szigeti György

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat Jubileumi Vándorgyűlését ezennel megnyitom. A vándorgyűlés kétszeresen jubileumi, először hazánk felszabadulásának 30. évfordulóját ünnepeljük, másodszor az Eötvös Loránd Fizikai Társulat Debreceni Csoportja megalakulásának 25. évfordulóját. Hogy mit jelentett mindannyiunk számára és különösképpen a magyar fizika fejlődése számára az a tény, hogy 30 évvel ezelőtt egész Magyarország felszabadult már a fasiszta rémuralom alól, azt hiszem a jelenlevők előtt nem kell különösebben hangsúlyozni.

Magyarországon 1919 és 1945 között a fizika oktatására és különösen a kísérleti fizika fejlesztésére az akkori kormányzatok igen szegényes támogatást biztosítottak. Szervezett fizikusképzés, tehát olyan képzés, amely kimondottan fizikusokat nevelt volna hazánkban, nem folyt. Az egyetemen matematika-fizika vagy kémia-fizika szakos tanárokat képeztek, akiknek főfeladata a középiskolákban a fizika oktatása volt. A középiskolai anyag általában nem tárgyalta a fizika újabb eredményeit, rendszerint befejezték a fizika fejlődését a Bohr-féle atommodellel (jó, ha odáig is eljutottak).

Egyedül az elméleti fizika terén folyt az 1930-as évek kezdetén már európai színvonalú oktatás a Tudományegyetemen Ortvay Rudolf vezetésével. Az ő munkáját folytatták a felszabadulás után Novobátzky Károly majd tanitványai Marx György, Nagy Károly. A Műegyetemen Gombás Pál munkája volt alapvető, az atomos kötés megismerése szempontjából. Ezen a területen világszínvonalon álló iskolát nevelt maga körül.

Fizikusaink közül, akik ebben az időben egyetemi tanszékeken működtek, modern kísérleti fizikát először itt Debrecenben Szalay Sándor kezdett oktatni és művelni, majd Szegeden és később Budapesten Bay Zoltán. A Budapesti Műegyetemen a klasszikus fizika terén említésreméltóak voltak Wittmann Ferenc előadásai, majd halála után Pogány Béla a kísérleti fizika vonalán, főleg a spektroszkópiai kutatások megalapozása terén végzett magyar viszonylatban alapvető munkát. Említésre méltóak emellett a modern elméleti fizika köréből tartott speciális előadásai is. Pogány halála után a spektroszkópiai kutatásokat Gerő, Schmid, majd Budó és Kovács folytatták. Kovács főleg a molekulaspektroszkópia, Budó pedig az organikus anyagok lumineszcenciája terén végzett eredményes kutatást, és létesítettek a felszabadulás után ezen a területen elismert iskolát. A szilárdtestek fizikája és a kristálytan területén Gyulai Zoltán és Tarján Imre végeznek már ez időben eredményes kutatásokat. A Budapesti Műszaki Egyetemen Gombás Pál után Kónya Albert kiterjesztette a kutatásokat és a kvantumkémia és szilárdtestfizika elméleti kérdéseinek tisztázásán túlmenően a kisérleti vizsgálatok megindítására is. Az általa vezetett Fizikai Intézetben korszerű módszer (SIMS) bevezetésével a felületvizsgálatok igen eredményes metódusát indította meg.

Az egész helyzetre azonban jellemző volt, mint említettem, a rendkívül szegényes anyagi támogatás, ami a munkákat rendkívül megnehezítette.

Gyökeresen megváltozott a helyzet a felszabadulás után, amikor a fizikai kutatás az addiginak sokszorosát kitevő anyagi támogatásban részesült. Ennek következtében elsősorban a tanszékeken fellendült a komoly kutatómunka; megindult a tanárképzéstől független fizikusképzés és sorra alakultak nagy beruházásokkal a fizika terén működő — főleg az MTA-hoz tartozó — kutatóintézetek és csoportok. Az elsőnek megalakult Központi Fizikai Kutató Intézet első igazgatója a molekulaspektroszkópus Kovács István lett, majd utána Jánossy Lajos és később Pál Lénárd vette át az intézet vezetését. Jánossy a felszabadulás előtt Angliában, majd Írországban dolgozott, főleg a kozmikus sugárzás vizsgálata terén ért el kiváló eredményeket, később a mérések értékelésének kérdését dolgozta fel. Pál Lénárd már a felszabadulás után végzett a Szovjetunióban, a mágnesség területén és a híg ötvözetek vizsgálatában ért el kiváló eredményeket.

A felszabadulás után nyílt lehetőség arra, hogy az atommagfizikai kutatásokat elsőnek itt Debrecenben, a debreceni Egyetem által szerkesztett és felépített Van de Graaf generátor és más modern eszközök segítségével valóban színvonalasan művelhessék, a budapesti Műegyetemen pedig az alapítványi tanszéken Bay Zoltán szervezte meg az atomfizikai kutatásokat.

Hogy azóta a fizika hazánkban mennyire fejlődött, milyen új kutatóintézetek és tanszéki kutatócsoportok létesültek, pl. a MTA Atommagkutató Intézet itt Debrecenben, a Műszaki Fizikai Kutatóintézet Budapesten, az MTA Izotop Intézete stb., vagy az MTA Elméleti Fizikai Tanszéki Kutatócsoportja, a Kristályfizikai Tanszéki Kutatócsoport, a Kristálynövekedési Tanszéki Kutatócsoport, a Kvantumelméleti Tanszéki Kutatócsoport (mely ma a Kristálynövekedési és más tanszéki kutatócsoportokkal együtt a Műszaki Egyetem Fizikai Intézetét alkotja) stb. Hogy ezek milyen új eredményeket értek el, arról most részletesen nem kívánok beszámolni, hiszen erről a Fizikai Szemle elmúlt évfolyamában hosszú cikksorozat adott áttekintést.

Mindenképpen meg kell azonban emlékeznem arról az óriási segítségről, amit a Szovjetuniótól kaptunk. Elsősorban természetesen hazánknak a Vörös Hadsereg által történt felszabadítása volt egész további fejlődésünk alapja, de speciálisan a fizika területén a szovjet kutatóintézetekkel kialakult bensőséges baráti együttműködés, majd később a Szovjetunióban létesült dubnai nemzetközi intézet jelentett óriási segítséget a hazai fizikusok képzése és a fizika művelése szempontjából. Az így képzett fizikusok elsősorban egyetemi intézetekben, majd később az óriási befektetésekkel létesülő és eredményesen működő fizikai kutatóintézetekben, de más kutatóintézetekben és az ipar számos területén nyertek és nyernek elhelyezést. Azt, hogy hol tart jelenleg a magyar fizika egyrészt a hazai és nemzetközi szaklapokban publikált cikkek, az ezekre történő reagálások nagy száma mutatja, de a jelenlevők most a vándorgyűlésen is képet kaphatnak a hazai fizika mai helyzetéről. Azt hiszem nem kell szégyent vallanunk.

Szeretnék azonban külön, az előzőknél részletesebben megemlékezni a Debrecenben kialakult tudományos iskoláról és az Eötvös Loránd Fizikai Társulat Debreceni Csoportjáról is, amely most ünnepli születésének 25. évfordulóját. Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat kongresszusok, diszkussziók, viták szervezésével, tanári ankétok létrehozásával, rendszeresen megtartott heti előadások keretében igyekszik a fizika legújabb eredményeit a nagy nyilvánosság elé tárni, és a fizika művelése és oktatása terén felmerült problémákat megvitatni, a megoldás módját lehetőleg megtalálni, erre illetékesek felé javaslatot tenni. Ebben a fontos munkában nagy szerep jutott vidéki csoportjainknak, így a most 25 éves Debreceni Csoportunknak is.

Több vándorgyűlés bonyolódott le a Csoport szervezésében elismerésre méltó nagy sikerrel, több kiváló előadót sikerült megnyerniök és viszont debreceni előadókat küldeni a Budapesten vagy más helyen megrendezett nemzetközi összejövetelekre. A csoport működésében alapvető irányító szerepet játszott mindvégig Szalay

Sándor, Medveczky László, majd Gáspár Rezső. Mint már említettem, Szalay volt az első, aki a korszerű kísérleti fizikát Magyarországon egyetemi szinten oktatni kezdte, már 1936-ban, amikor átvette a Kossuth Lajos Tudományegyetem Kísérleti Fizikai Intézetét. Angliai hosszú tanulmányútja során ismerte meg a korszerű fizikának a hazánkban művelttől bizony erősen eltérő módszereit és irányvonalait. Cambridgeben Ellis és Rutherford professzorok mellett beletekinthetett az akkor kialakulóban levő kísérleti magfizika módszereibe, az ottani kutatásokból aktívan kivette részét. 1937-ben még a cambridgei intézetből keltezi publikációit, 1938-ban a bécsi Institut für Radiumforschung-ból, de 1939-ben már Debrecenből keltezett magfizikai tárgyú közleményei jelennek meg. 1936-tól a debreceni Kossuth Lajos Tudományegyetem Kísérleti Fizikai Intézetét vezeti, majd 1954-ben megalakul a Magyar Tudományos Akadémia Atommagkutató Intézete ugyancsak Szalay Sándor vezetésével. A kutatóintézet alakulását az egyetemi Kísérleti Fizikai Intézet keretében elért eredmények alapozták meg.

Szalay Sándor vezette iskola munkássága során az atommagreakciók vizsgálata mellett több rendkívül érdekes és új kutatási eredmény született: Így

1. a hazai uránelőfordulások feltárása, ezzel kapcsolatban lényeges felismerések az uránnak tőzegben történő feldúsulására vonatkozólag;

2. 1955-ben kimutatják a Debrecenben lehulló csapadék radioaktivitásának a föld túlsó oldalán végzett légköri atomrobbantásokkal való szoros összefüggését. Ezek az eredmények vezettek a kísérleti atomrobbantások az egész földre kiterjedő veszélyességének általános felismerésére, és az így kialakult nemzetközi közvélemény adott alátámasztást a légköri kísérleteket megtiltó egyezmény aláírásához.

3. 1957-ben Csikai Gyulával együtt Szalay Sándor mutatja ki elsőnek kísérletileg a neutrino által okozott visszalökési effektust a He^6-β reakcióban.

Ezek az alapvető munkák adják meg Szalay Sándor kutatásainak későbbi jellemző irányait.

Nem szabad megfeledkezni Szalay állandó munkatársairól: Csongor Éváról, Medveczky Lászlóról, Csikai Gyuláról Berényi Dénesről sem, akik ezen eredmények létrehozásában igen hathatósan közreműködtek, és akik körül számos jó fizikus nevelődött ki.

A debreceni Egyetem Elméleti Fizikai Tanszékét Gombás Pál kitűnő tanítványa, Gáspár Rezső professzor vezeti, akinek munkássága a quantumfizika és quantumkémia közötti határterületre esik, és ebben a vonatkozásban világszerte elismert eredményekkel gazdagította a tudományt, és szerzett elismerést a debreceni kutatóknak.

Mint már említettem, hazánkban a Tanácsköztársaság bukásától a felszabadulásig az egyetemeken folyó fizikai kutatás igen mostoha körülmények között tengődött. Ezzel szemben az iparvállalatok közül az Egyesült Izzó volt az, amely a fizikakutatásnak alapvető fontosságát felismerte, és komoly anyagi támogatást biztosított számára, megalapítva 1922-ben Pfeifer Ignác vezetésével a vállalat kutató laboratóriumát. Ebben a laboratóriumban az ipari, az alkalmazott fizika művelésére alakult ki egy kutatógárda: Selényi Pál, Bródy Imre, Turi Pál, Millner Tivadar, Tarján Imre, Czukor Károly és Winter Ernő vezetésével. Többek között ennek a kutatógárdának a működése tette lehetővé azt, hogy a gyár termékei a világszínvonalat állandóan tartani tudták, és a magyar ipar számára nagy exportlehetőséget biztosítottak. 1937-ben Pfeifer Ignác nyugalomba vonulásakor vette át ezen laboratórium vezetését Bay Zoltán az Egyesült Izzó kutatólaboratóriumának további ténykedéséről itt nem kívánok részletesebben szólni, csak azt említem meg, hogy ennek az első magyar ipari kutatóintézetnek a szellemében és ma is időszerű tudományos irányvonalát követve működik a MTA Műszaki Fizikai Kutatóintézete, de erről ugyancsak már több alkalommal hangzott el beszámoló Társulatunkban.

Befejezésül szeretném hangsúlyozni, hogy a jelenleg vándorgyűlésünk a magyar kísérleti atommagkutatás és általában a kísérleti fizika megindításának helyén ült össze és remélem, hogy a genius loci nagyban hozzájárul majd jelen vándorgyűlésünk sikeréhez, és az itt elhangzottak hasznosítása útján a magyar fizika további fejlődéséhez.

AZ EÖTVÖS LORÁND FIZIKAI TÁRSULAT XVI. VÁNDORGYŰLÉSE ÉS KÖZGYŰLÉSE

(Debrecen, 1975. augusztus 21-23.)

Félszerfalvi János
KLTE Alkalmazott Fizikai Tanszék

A Társulat legutóbbi Vándorgyűlése jubileumi vándorgyűlés volt, amely Hazánk felszabadulásának 30. évfordulója tiszteletére és a debreceni csoport megalakulásának 25. évfordulója alkalmából mintegy 250 fő részvételével Debrecenben került megrendezésre. Érdemes megemlíteni, hogy ez már a harmadik vándorgyűlés Debrecenben. Társulatunk itt rendezte meg II. és IX. vándorgyűlését 1952, illetve 1962-ben (az első Pécsett volt 1951-ben).

A XVI. Vándorgyűlés a Kossuth Lajos Tudományegyetemen, az Egyetem új kémiai épületében, — amelyik a debreceni Nagyerdő fái között helyezkedik el, — tartotta üléseit. A tudományok integrálódásának gondolata jegyében már korábban Gáspár Rezső vezetésével a Vándorgyűlés tudományos programjának összeállítására alakult bizottság olyan előadások tartására kért fel előadókat, amelyek a fizika szerepét mutatják be más tudományágakban, a kémiában, a biológiában, a csillagászatban. A fizika ugyanis valamennyi természettudomány közös alapját képezi, a természet minden jelenségében érvényesek, tükröződnek a fizikai törvények.

A Vándorgyűlés ünnepélyes megnyitójára augusztus 21-én fél 12-kor került sor. A megnyitó elnökségében a Társulat vezetői mellett helyet foglalt Kónya István professzor, a KLTE rektora, Beck Mihály akadémikus, az MTESZ Hajdú-Bihar megyei elnöke és Debrecen város Tanácsának, valamint a Városi Pártbizottságnak a képviselője. Szigeti György, a Társulat elnöke megnyitójában a mai fizikus generáció útjának kezdetéről szólt, felsorolta azokat a kutatóhelyeket, kutatási centrumokat, amelyekből mint apró kristály-magokból a mai magyar fizikai kutatócentrumok kialakultak. Megemlítette, hogy az intenzív fizikai kutatás és oktatás hazánkban csak a felszabadulás utáni években kezdődhetett meg kormányunk nagyarányú támogatásával. Nagyban elősegítette a fejlődést az is, hogy a 40-es évek végén, az 50-es évek elején a tanárképzéstől független fizikusképzés is megindult és sorra alakultak meg nagy beruházással — a Magyar Tudományos Akadémia irányításával — a kutatóintézetek és kutatócsoportok. Ebben jelentős szerepet és helyet kapott Debrecen és az itt dolgozók eredményei azt igazolják, hogy méltán kapják és kapták a bizalmat, támogatást.

Ezután Kónya István rektor az Egyetem és a város lakossága nevében köszöntötte a Vándorgyűlés résztvevőit, vendégeit és eredményes munkát kívánt valamennyiüknek.

A Vándorgyűlés tudományos programjában a következő előadások hangzottak el:

Fizika és légkör

Szalay Sándor (ATOMKI) A primordiális atmoszféra

Fizika és biológia

Szalay László (JATE) Fotoszintézis





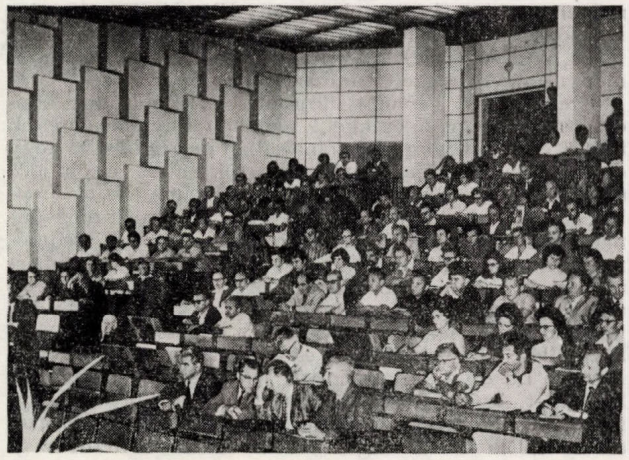
Szemerédy Pál (ELTE) A felső földi légkör fizikája
Damjanovich Sándor (DOTE) A modern biológia néhány fizikai problémája
Karvaly Béla (Szegedi BK) Membránfizika

Fizika és csillagászat

Bay Zoltán (USA) Magyar holdvisszhang kísérletek 1944—46-ban
Almár Iván (KGI) Űrkutatás és csillagászat
Dezső Lóránt (Napfiz. Obsz.) A Nap fizikája

Fizika és kémia

Tompa Kálmán (KFKI) Mag mágneses rezonancia (NMR) alkalmazása a kémiában és a biológiában
Berényi Dénes (ATOMKI) Újabb fizikai módszerek alkalmazása a szerkezetkutatásban
Gáspár Rezső (KLTE) Kvantumkémia.



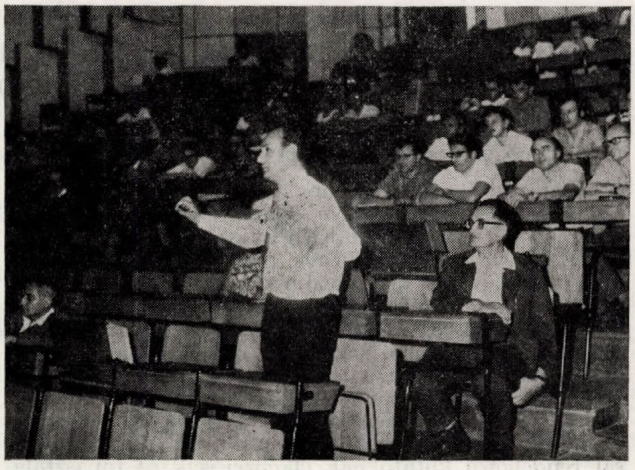
A Vándorgyűlés megnyitásának napján, este 8 órakor „Alkalmazott kontra alapkutatás?" címmel kerekasztal megbeszélés volt, amelyen először Berényi Dénes, Csikai Gyula és Kónya Albert foglalták össze gondolataikat a problémáról, mint felkért hozzászólók, majd Gáspár Rezső, Medveczky László, Szigeti György és Tarján Imre vettek részt a vitában.

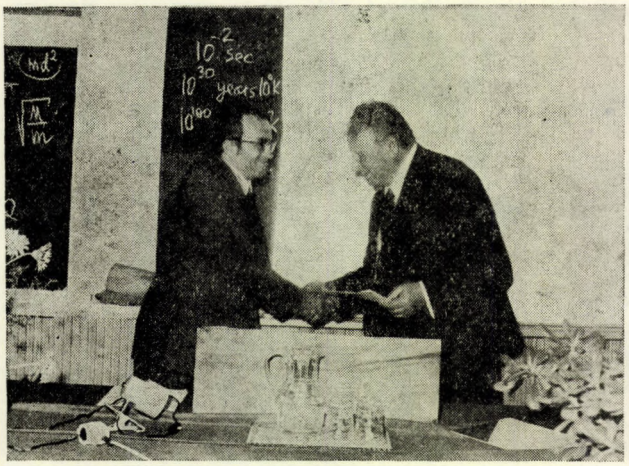
A Vándorgyűlés második napjának estéjén hangulatos banketten találkoztak egymással a résztvevők a nagyerdei Újvigadó éttermében, ahol a Fizikai Szemle és a debreceni csoport 25 éves évfordulója mellett az első magyar holdvisszhang kísérletek 30. születésnapját is megünnepelték.

Augusztus 23-án, szombaton került sor a Társulat közgyűlésére. A főtitkári beszámolót Marx György tartotta „A fizika és a többi természettudományok" címmel. A Társulat legutóbbi közgyűlése óta kb. fél év telt el, ezalatt az idő alatt a társulati élet aktivitása nőtt, a taglétszám 15%-kal emelkedett, és a tudományos rendezvények számát és színvonalát illetően is komoly fejlődésről beszélhetünk. A Társulat szervezte pl. a Nemzetközi Fizikai Unió konferenciáját. A Társulat vezető tisztségviselői közül Szigeti György az Európai Fizikai Társaság tiszteleti tagja.

Részletesen elemezte ezután Marx György a fizika tudományának tárgykörét, a fizika beilleszkedését a természettudományok rendszerébe, majd a fizikával kapcsolatban kialakult mai szemléletet. Beszámolóját azzal a gondolattal zárta, hogy a fizika oktatásakor nem a végeredmény száraz, hűvös, kész anyagát kell a diákoknak átadni, hanem azt az életformát és gondolkodásmódot, amiben a fizikus dolgozik és él.

A főtitkári beszámolót követően Kedves Ferenc az integrált oktatás kérdésével kapcsolatban felsorolta azokat a fizika tanításával kapcsolatos kísérleteket, amelyek hazánkban folynak. A 67—68-as évektől az általános iskolák alsó tagozatán Pálffy Györgyné vezetésével a természetismeret oktatását, 71-től pedig több budapesti és vidéki középiskolában a kvantummechanika és





az anyagszerkezet oktatását vezették be kísérleti jelleggel. Egységes nyelvet kell kialakítani a természettudományok területén és figyelembe kell venni az általános műveltség távlati követelményeit. Előadásához Kovács László, Holics László és Tóth Eszter szóltak hozzá ismertetve oktatási kísérleteik eredményét a természettudományok egybehangolt tanítása területén.

Ezek után a Társulat közgyűlése „Társulatunk kapcsolata más egyesületekkel" témában folytatta tovább ülését. Szigeti György felszólalásában megemlítette, hogy egyre alakulnak újabb szakcsoportok és az elmúlt időszakban megnőtt a vidéki csoportok száma. Ez a társulati élet erős decentralizálását jelenti, amelynek megvannak a komoly előnyei. Természetesen ez azt is eredményezi, hogy a különböző szakcsoportok és vidéki csoportok rendezvényei időben nem eléggé koordináltak. Sajnálattal állapította meg, hogy a klubesteket aránylag kevesen látogatják. Javasolta, hogy a Társulat 1976. évi közgyűlése tűzze napirendre és vitassa meg ezt a kérdést. Bozóky László a szakcsoportok jelentőségére hívta fel a figyelmet. Az egyes szűkebb szakterületeken olyan mennyiségű publikációs anyagot kell figyelemmel kísérni, amely kollektív összefogás nélkül nem valósítható meg. Ezt csak a szakcsoportok fokozott tevékenységével lehet elérni. Marx György is igen fontosnak tartja a vidéki csoportok fejlesztését, megerősítését.

A Közgyűlés vitája és a hozzászólások után V. J. Goldanszkij professzor, a Szovjetunió Tudományos Akadémiája levelező tagja, az amerikai NTA tagja „Alagút-effektusok kémiai jelentősége" címmel tartott előadást, amely egyben „székfoglaló" előadása volt, mint a Társulat tiszteletbeli tagjának. Goldanszkij professzor közel két évtizede áll szoros kapcsolatban a magyar fizikusokkal, 1957-ben járt először Magyarországon. A tiszteleti tagnak járó érmet és oklevelet Szigeti György, a Társulat elnöke adta át Goldanszkij professzornak, aki meghatott szavakkal köszönte meg a Társulat elismerését.

A Közgyűlés záróakkordja a Társulat érmeinek és díjainak kiosztása volt. Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat érmét Turi Istvánné kapta, aki a Fizikai Szemle szerkesztésében 25 éven keresztül végzett eredményes irányító munkájával döntő mértékben járult hozzá ahhoz, hogy Társulatunk lapja magas szinten tudja betölteni a neki szánt szerepet. A Fizikai Gondolkodás Terjesztéséért érmet Kunfalvi Rezső fizikatanár, a KÖMAL fizikai rovatának vezetője, a fizikai diákolimpiákon elsők között szereplő magyar fiatalok felkészítéséért kapta. A Társulat Bródy Imre díját Gaál István (MFKI), a Gyulai Zoltán díjat Korecz László (ELTE), a Novobátzky Károly díjat Gálfi László (ELTE), a Schmid Rezső díjat Farkas Győző (KFKI), a Selényi Pál díjat pedig Bencze Gyula (KFKI) kapta.

A debreceni Csoportból azok, akik 25 év óta folyamatosan tagjai a Társulatnak és aktív munkásai a debreceni Csoportnak, díszes emléklapot kaptak.

A Vándorgyűlés és Közgyűlés Szalay Sándor, a debreceni Csoport szenior elnökének zárszavával ért véget.

Megemlítjük végül, hogy a debreceni Vándorgyűlés programját intézetlátogatások egészítették ki (ATOMKI, Napfizikai Obszervatórium, a KLTE Kísérleti és a KLTE Alkalmazott Fizikai Tanszékei, a DOTE Biofizikai Intézete), továbbá — mint az előbbiekben már ismertetett programból is kitűnt, az utóbbi években kialakuló hagyományokhoz hűen — amely szerint egy-egy külföldre szakadt és ott kiemelkedő eredményeket elért magyar fizikust is meghív a Társulat vezetősége a vándorgyűlésekre — előadással szerepelt Bay Zoltán (National Bureau of Standards, Washington, USA) is.

SZIMPÓZIUM A GYORS NEUTRON KÖLCSÖNHATÁSOKRÓL ÉS A NAGYÁRAMÚ NEUTRON GENERÁTOROK PROBLÉMÁIRÓL

(1975 augusztus 27-30, Debrecen)

A nemzetközi szimpóziumra az Eötvös Loránd Fizikai Társulat Magfizikai- és Alkalmazási Szakcsoportja, valamint a Debreceni Kossuth Lajos Tudományegyetem Kísérleti Fizikai Tanszékének rendezésében került sor. Ismeretes, hogy a kis neutron generátorok és alacsony feszültségű gyorsítók a magfizikán kívül számos felhasználást nyernek az alap- és alkalmazott kutatásokban, valamint a képzésben. A konferencia célja a következőkben foglalható össze: a tudomány és technológia azon területeinek áttekintése, ahol az alacsony feszültségű gyorsítókkal keltett neutronok játszák a döntő szerepet; lehetőség biztosítása a közelítően azonos kísérleti bázissal rendelkező kutatóknak elképzeléseik és tapasztalataik ismertetésére a gyors neutronok alkalmazása terén; a generátorok és a méréstechnika lehetséges fejlesztési irányainak megvitatása különös tekintettel a nagyáramú gyorsítók technológiai problémáira.

A szimpóziumnak 13 országból 66 résztvevője volt: 12 szocialista, 10 nyugati és 44 magyar. A viszonylag alacsony létszám biztosította, hogy az elhangzott 23 előadást érdemi vita kövesse, lehetőséget adott továbbá prognózis kialakítására a neutron generátorok várható legfontosabb felhasználására és a nagyáramú generátorok fejlesztésével kapcsolatos eddigi tapasztalatok összegezésére.

A gyors neutronokkal végzett magfizikai kutatások széles köréből az utóbbi években kiemelkednek az egyensúly előtti állapotokból történő bomlások elméleti és kísérleti vizsgálatai. 20 MeV feletti gerjesztési energiánál a magreakciók során kibocsátott részecskék energia spektrumát a direkt-, vagy a közbenső mag reakció mechanizmussal illetve ezek kombinációjával nem sikerült értelmezni. Kézenfekvő volt az a feltevés, hogy részecske emisszió nemcsak az első ütközésből vagy az egyensúlyi állapotból eredhet, hanem ezek közé eső úgynevezett közbülső állapotokból is. Ezen egyensúly előtti (preequilibrium) állapot tulajdonságainak leírására több modellt is használnak (magon belüli kaszkád + párolgás; Fermi-gáz egyensúlyi; exciton; Fermi-gáz egyensúlyi és exciton egyesítés), amelyekben közös az, hogy a bombázó részecske energiája két-test kölcsönhatásokon keresztül statisztikusan oszlik szét, nem ad számot a magszerkezeti és impulzus momentum effektusokról, valamint a végmag specifikus állapotaira történő átmenetekről. Az egyensúly előtti modellek elsősorban az energia spektrumok és a gerjesztési függvények leírására használhatók.

Ezért várható volt, hogy a gyors-neutron reakciókban emittált részecskék (alfa, proton, neutron) energia spektruma ezek segítségével értelmezhető. P. Oblozinsky (Bratislava) és D. Seeliger (Drezda) rámutatott, hogy az exciton modell különböző változatai alkalmasak a gyorsneutronok inelasztikus szórásának és az (n,p), $(n,2n)$ reakciók leírására. Nyitott kérdés maradt az alfa részecskék (és általában a komplex részecskék) képződésének és emissziójának értelmezése az egyensúly előtti modell alapján.

Több előadás foglalkozott a gyors-neutronok radiációs befogási hatáskeresztmetszetének problémájával, nevezetesen azzal, hogy az aktivációs módszerrel és a gamma-spektrum alapján meghatározott értékek közötti eltérés — az aktivációs javára — ténylegesen létezik-e, vagy csupán kísérleti hibának tudható be. Az eltérés azt jelentené, hogy az elméleti várakozással szemben a magasan gerjesztett óriás rezonancia állapotból kaszkád legerjesztődés is bekövetkezhet a kötetlen állapotokon keresztül. H. Vonach (Bécs), G. Magnusson (Lund) és Pető G. (Debrecen) rámutatott a szórt neutronok jelentős szerepére az aktivációs hatáskeresztmetszetek mérésénél, továbbá ismertették ezek pontos figyelembevételére vonatkozó méréseiket. Az új eredmények egy részénél az aktivációs hatáskeresztmetszet értékek továbbra is nagyobbak, mint amit a spektrum mérés-, ill. a direktféldirekt reakció modell alapján kaptak, ami a közbenső mag mechanizmus szerepe mellett szól. Ezt erősítette meg a gamma-spektrumra és az (n,gamma) gerjesztési függvényére vonatkozó mérés is a ^{28}Si és ^{32}S esetén 8 MeV alatt, amelyről L. Nilsson (Uppsala) számolt be. A gyorsneutronok sugárzásos befogásának tisztázása további kísérleti és elméleti vizsgálatot igényel. Egy ilyen lehetőséget tárgyalt F. Cvelbar és A. Likar (Ljubljana) előadása, amely rámutatott arra, hogy dipól átmenet mellett lehetséges a kvadrupól átmenet is és ezek interferenciája a prompt gamma-részek szögeloszlásában aszimmetriát eredményezhet.

A magasan gerjesztett állapotok gamma emissziójának vizsgálata elősegítheti az $(n,2n)$ hatáskeresztmetszetek N−Z szimmetria paraméter függésének értelmezését is. Urai I. (Debrecen) ismertette, hogy az Os izotópokan végzett (n,p) és $(n,2n)$ hatáskeresztmetszet mérések megerősítik a korábbi szisztematikákat, ami az $(n,2n)$ esetén azt jelenti, hogy az N−Z függés magas gerjesztési energiáknál is érvényes. Vonach mérései szerint az $(n,2n)$ küszöb közelében nem hanyagolható el a gamma legerjesztődés a neutron emisszióhoz viszonyítva, ellentétben az elméleti várakozással. S. M. Qaim (Jülich) az (n,t) és $(n,^3\text{He})$ reakciók hatáskeresztmetszeténél is észlelte a szimmetria paraméter függést. A kérdés végleges tisztázásához $(n,2n)$ és (n,n') spektrumokat kellene mérni, lehetőleg a gamma részekkel koincidenciában. A végmag első gerjesztett állapotához vezető rugalmatlan neutronszórást követő gammarészek differenciális hatáskeresztmetszetének méréséről számolt be A. J. Cox (Birmingham). Ezen a területen különösen kevés a rendelkezésre álló adat, noha ez mind a magreakció modellek, mind a gyakorlati alkalmazások szempontjából igen fontos lenne. A maghasadásra vonatkozó kutatásokról egy előadás hangzott el, Daróczy S. (Debrecen) ismertette az ^{238}U hasadásánál keletkező rövid felezési idejű fragmentek tömegeloszlására vonatkozó eredményeit, amelyet radiokémiai szétválasztás nélkül közvetlenül Ge/Li spektrométerrel vizsgált 15 izotópra. Ezen a területen egy gyors csőposta és a Ge/Li detektor kombinálása további számos új információ szerzésére ad lehetőséget.

A szimpozium másik nagyobb témaköre az alacsonyfeszültségű neutron generátorok magfizikán kívüli alkalmazásait érintette. Qaim előadásában részletesen foglalkozott a szabályzott fúziós reaktorok tervezéséhez szükséges nukleáris adatok helyzetével. Ezek közül sokat a kisgyorsítókkal lehet meghatározni, így pl. a D+T reakció hatáskeresztmetszetét 10 KeV alatt, a szerkezeti anyagok gyors-neutron sugárkárosodását, a reaktor köpeny neutron sokszorozását, a tricium újratermelést az (n,t) reakcióval, stb. K. H. Czock (IAEA, Bécs) a reaktorok neutron terének méréséhez szükséges aktivációs hatáskeresztmetszetek jelenlegi helyzetét ismertette, kiemelve a ^{103}Rh (n,n') reakció gerjesztési függvényét, amelyre az eddiginél pontosabb adatokra lenne szükség. Az egyéb mindennapos alkalmazások közül a neutron aktivációs analízis témaköréből több előadás hangzott el. Bornemisza P. (Debrecen) a 14 MeV-os neutron aktivációs analízis alkalmazási lehetőségeit tárgyalta a spektrál tiszta Os szennyezőinek, valamint híg acélötvözetek mikroösszetevőinek a több komponensű komparátor módszerrel történő meghatározására. Raics P. (Debrecen) ismertette az ^{238}U/^{235}U izotóp arány roncsolásmentes meghatározására kidolgozott gyorsneutron aktivációs módszert, amellyel kb. 3−5%-os pontossággal állapítható meg a dúsítási arány a szokásos összetételű reaktor fűtőelemeknél. Egy új alkalmazást ismertetett Vonach, a F/N aránymérését csontokban $(n,2n)$ reakcióval, amely kormeghatározást tesz lehetővé kb. 1 millió évig visszamenőleg, mivel a fluor és nitrogén viszonya időben lineárisan csökken.

A szimpozium harmadik nagyobb témaköre a neutron generátorok és a kapcsolódó méréstechnika továbbfejlesztési lehetőségeit és az erre vonatkozó igényeket érintette. B. E. Leschenko (Kiev) az utóbbi években a kievi egyetemen kifejlesztett folytonos és impulzus üzemű generátorokat ismertette. A kisebb mint 1 nsec szélességű és 7 MHz gyakoriságú impulzusok a gyorsneutron spektroszkópiában kedvezően használhatók. A magfizikai kutatásokban új lehetőségeket nyit meg a polarizált neutronokat szolgáltató kis generátor, amelyről J. Vincour (Prága) számolt be. I. Enchevich (Szófia) általános áttekintést adott a kisgyorsítók felhasználási lehetőségeiről a magfizikán túl az asztrofizikában, az in-beam spektroszkópiában, a forró-atom kémiában, a csatorna effektusok és ion implantáció terén, stb. Ezeken kívül a neutron terápia, a neutron radiográfia, a fúziós kísérletek, a nagyáramú neutron generátorok kifejlesztését igénylik, ami számos technológiai kérdés megoldását teszi szükségessé. T. S. Green (Abingdon) a más célra kifejlesztett nagyáramú (>1 amper) ionforrások neutrongenerátorokban történő alkalmazási lehetőségeit tárgyalta különös tekintettel a 200−300 kW teljesítménnyel együttjáró elvi és gyakorlati problémákra. J. Darvas (Jülich) ismertette a target megoldási lehetőségeket, a nagy teljesítménysűrűség (100 kW/cm^2) elvezetését, továbbá a tricium kezelésének kérdéseit. J. Pivarc (Bratislava) a jelenleg használatos targetek hatásfokának növelési lehetőségeiről, a többréteges targetek kidolgozásáról számolt be. S. Bederka (Bratislava) egy elektrosztatikus ionnyaláb vezérlő rendszert ismertetett, amely lehetővé teszi, hogy a nyaláb a target felületen spirál alakot írjon le ami az egyenletes teljesítmény sűrűséget biztosítja.

A szimpózium egy kötetlen vitával zárult, amely összegezte a különböző kutatási területek igényeit a neutrongenerátorokkal szemben. A költséget és a technológiai problémákat tekintve a 200 kW/100 mA tel-



jesítményű neutron generátorok kifejlesztése a kisebb laboratóriumok számára is elérhetőnek látszik. Ilyen berendezéssel tartósan néhányszor 10^{13} n/s hozam érhető el, néhány cm^2 target felület esetén. Ez a hozam az alacsony hatáskeresztmetszetű folyamatok tanulmányozásához, az aktivációs analízishez, a fúziós reaktor adatok méréséhez, a neutron terápiához és biológiához elegendő. Közelítően egy nagyságrenddel nagyobb hozamra van szükség a sugárkárosodás vizsgálatához a fúziós reaktorok szerkezeti anyagainál, amely a kis országok lehetőségeit ma még meghaladja.

Cs. Gy.

A KÖZÉPISKOLAI MATEMATIKAI LAPOK PONTVERSENYE

Az Eötvös verseny eredményének kihirdetése után Kunfalvi Rezső számolt be a Középiskolai Matematikai Lapok fizika pontversenyéről. Az 1974/75. tanévben benevezett 140 iskolából 1252 tanuló, 1074 fiú és 178 lány. Az előző tanévben a nevezők száma 792 volt 111 iskolából, tehát a növekedés jelentős. Ugyanekkor meg lehet állapítani, hogy az állandó megoldók száma mindössze 36%, az évközi lemorzsolódás igen nagy. Nem kielégítő a lányok részvétele és a budapesti, debreceni, szegedi, miskolci iskolák sem szerepelnek olyan súllyal, mint az a tanulók és az iskolák száma alapján elvárható lenne. Az osztályok szerinti megoszlás a következő: I. osztályba járt 304, II. osztályba 373, III. osztályba 364 és IV. osztályba 197 tanuló. Évek óta növekszik az érdeklődő első osztályosok száma, ami azért örvendetes, mert az első osztályban általában fizikát nem tanulnak, így a Laphoz fordulnak ismeretük bővítése érdekében. Igen kicsi az általános iskolások száma: mindössze 14. A Lap még mindig nem jut el az általános iskolai tanulók kezébe, holott a „Gyakorlatok" rovat elsősorban nekik szólt eredetileg. A 140 iskola közül budapesti mindössze 26. A vidéki iskolák a résztvevők száma és az elért pontszám alapján is az élen járnak. Az egri Gárdonyi Géza Gimn. 39 tanulója 1463 pontot szerzett. Utána következnek: a Rózsa Ferenc Gimn. (Békéscsaba 26 tanuló 1168 ponttal, Batsányi János Gimn. (Csongrád) 19 tanuló 977 ponttal, Ketona József Gimn. (Kecskemét) 36 tanuló 965 ponttal, Petőfi Sándor Gimn. (Aszód) 25 tanuló 745 ponttal és a Földes Ferenc Gimn. (Miskolc) 28 tanuló 673 ponttal. A listán csak jóval hátrább következik a legjobb budapesti gimnázium: a Móricz Zsigmond Gimn. 9 tanulója 522 ponttal. A szakközépiskolák közül a legjobban szerepelt a Zipernovszky Károly Szakközépisk. (Pécs) 11 tanuló 409 ponttal.

A pontverseny egyéni. Első díjat kapott a különböző kategóriákban Kaufmann Zoltán (Vác, Hámán Kató Ált. Isk.), Fekete László (Miskolc, Földes Ferenc Gimn.), Weber Zoltán (Balatonlelle, Ált. Isk.), Wolf László (Karcag, Gábor Áron Gimn.), Kruchio Gábor (Békéscsaba, Rózsa Ferenc Gimn.), Vankó Péter (Budapest, Móricz Zsigmond Gimn.), Koncz István (Eger, Gárdonyi Géza Gimn.), Kőrösmezey Ákos (Budapest, Piarista Gimn.), Zimányi Gergely (Budapest, Fazekas Mihály Gimn.) és Schmidt József (Esztergom, Dobó Katalin Gimn.).

Az 1974/75. évi pályázatra 14 igen értékes kísérletezve-kutató pályamű érkezett a legkülönbözőbb témakörökből. 5 pályamunka első díjat kapott, 1000—1000 Ft-ot a Magyar Tudományos Akadémia Debreceni Atommagkutató Intézetének adományából, 5 további munka 400—400 forintos második díjat az Eötvös Loránd Fizikai Társulat adományából. Köszönet illeti meg Szalay Sándor akadémikus, igazgatót, aki a kísérletező munkát évek óta díjak kitűzésével és tudományos irányítással támogatja. A Meteorológiai Társasággal közösen hirdetett pályázat szintén jó eredménnyel zárult.

Az év eseményeihez tartozik a VIII. Nemzetközi Fizikai Olimpia és az Ifjúsági Fizikai Kör két, három-három napos ankétja. Ezekről külön számolunk be.

K. R.

AZ 1975. ÉVI EÖTVÖS-VERSENY

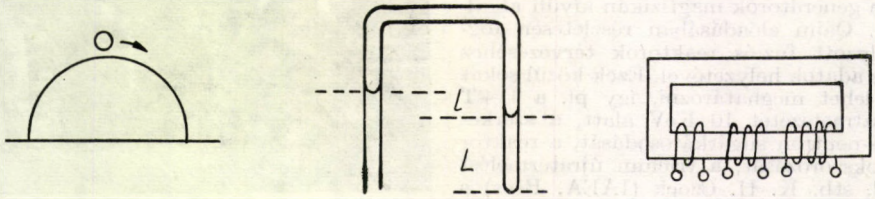
Az idei, sorrendben 52-edik versenyét az Eötvös Loránd Fizikai Társulat október 25-én tartotta. A Budapesten, Debrecenben, Szegeden, Miskolcon, Veszprémben, Egerben, Pécsett, Nyíregyházán és Győrött egyidejűleg rendezett versenyen 5 órai munkaidőben három feladatot kellett megoldani. Bármely segédeszköz használata meg volt engedve. A feladatok a következők voltak.

1. $R = 36$ cm sugarú félhenger tetejéről $r = 4$ cm sugarú golyó gurul le. A súrlódási együttható $\mu = 0{,}4$. Hol csúszik meg a leguruló golyó?

2. A rajz szerinti vékony csőben higany van, az elzárt légoszlop hossza L, a higanyszintek különbsége l. Mi történik, ha a higanyszintek véletlen lökés folytán kissé elmozdulnak?

3. Közös, teljesen zárt vasmagon ugyanazon huzalból készült 200, 300 és 400 menetes tekercsek vannak. Hogyan kell ezeket összekapcsolni, hogy a keletkezett tekercsrendszer önindukciós együtthatója a lehető legkisebb legyen?

A versenyzők száma 367 volt, kb. 60-nal kevesebb, mint tavaly, de ennek ellenére a látogatottság megfelelőnek mondható. A versenyzők városok szerinti megoszlása: Budapest 140, Debrecen 32, Szeged 40, Miskolc 31, Veszprém 11, Eger 12, Pécs 38, Nyíregyháza 47, Győr 16. Foglalkozás szerint 48 honvéd, 18 egyetemi és főiskolai hallgató, 6 egyéb foglalkozású, vagyis összesen 72 idén érettségizett és 295 középiskolai tanuló volt a résztvevő. Az idén érettségizettek elég nagy száma elsősorban a honvédek közül került ki.



A három feladat közül az első elég szokásos volt a súrlódás tárgyköréből. Ezt a feladatot csak 10 versenyző oldotta meg, ami elég kevés. A második feladat tárgya az egyensúlyi helyzet stabilitásának megvizsgálása és mint ilyen egyszerűen, érdekesen tárgyalható. 17 versenyző oldotta meg ezt a problémát. A harmadik feladat során a párhuzamosan kapcsolt tekercsek induktivitását illetőleg elég mély dolgok kerültek felszínre. Ennek nagyjában kielégítő meglátása két dolgozatban volt megtalálható. A sikeres megoldások elég erősen szóródtak, vagyis ritkán oldott meg ugyanaz a versenyző két feladatot. A Középiskolai Matematikai Lapok az 1976. év februári számában részletesen elemzik a problémákat.

A november 22-én történt díjkiosztáson a következők kapták meg jutalmaikat.

Az I. díj nem került kiosztásra. II. díjat nyertek egyenlő helyezésben *Szép Jenő* honvéd (Budapesten érettségizett a Veres Pálné gimnáziumban mint Kishonti Istvánné tanítványa) és *Zimányi Gergely*, a budapesti Fazekas gimnázium IV. osztályos tanulója, Mihály István tanítványa. III. díjat kapott *Virosztek Attila*, a szolnoki Verseghy gimnázium IV. osztályos tanulója, Sebestyén István tanítványa. Egyenlő szinten dicséretet kaptak mint 4.—7. helyezettek: *Gulyás Mihály*, az orosházai Táncsics gimnázium IV. osztályos tanulója, Györös Gyula tanítványa; *Molnár László*, a budapesti Veres Pálné gimnázium IV. osztályos tanulója, Pápai Tiborné tanítványa; *Nagy Tamás*, a debreceni Kossuth gimnázium IV. osztályos tanulója, Farkas József tanítványa és *Zsigmond Géza*, a budapesti Fazekas gimnázium IV. osztályos tanulója, Mihály István tanítványa.

Vermes Miklós

EREDMÉNYEK

SZOBAHŐMÉRSÉKLETŰ SZUPRAVEZETŐK?

A szupravezető kutatás gyakorlatilag közvetlenül hasznosítható első eredménye 1973-ban született, amikor sikerült olyan ötvözetet előállítani, amelynek átalakulási hőmérséklete határozottan meghaladja a bűvös határt: a folyékony hidrogén forráspontját (20 °K). Ez az anyag — az Nb_3Ge összetételű ötvözet — egyben irányt mutatott a további kísérleti és elméleti munkának is.

Az Nb_3Ge egzakt sztöchiometrikus arányban tartalmazza komponenseit, és egy speciális köbös szimmetriaosztályba tartozik, amely A-15 szerkezet néven ismert. A szupravezetés elméletének alapjaiból következik, hogy ha sikerülne egy teljesen hasonló ötvözetet kisebb atomsúlyú elemekből felépíteni, akkor ennek kritikus hőmérséklete nagyobb lenne. (Lényegében arról van szó, hogy ezekben az anyagokban a szupravezetést rácsrezgések által közvetített elektron-elektron kölcsönhatással magyarázzuk. Ha a rácsot alkotó ionok tömege kisebb, akkor könnyebb azokat rezgésbe hozni, és ezért a kölcsönhatás erősebb lesz.) A figyelem tehát az Nb_3Si ötvözet felé fordult, ahol azonban az A-15 struktúra nem stabil; az egyensúlyi szerkezet ún. Ti_3P típusú tetragonális rács. A két komponensből csak Nb_4Si összetételben lehet A-15 szerkezetet felépíteni, ekkor viszont a kritikus hőmérséklet csak 9 °K.

A problémát V. M. Pan és csoportja oldotta meg sikeresen (Piszmo v ZSETF, *21*, 494 (1975)). Észrevették, hogy a Ti_3P típusú rács lazább szerkezetű, mint a kívánt A-15 struktúra és ezért Nb_3Si pormintát nagy nyomás alá helyeztek. A megabar nagyságrendű nyomást robbantással érték el. Végeredményben olyan anyagot kaptak, amelynek egyes részei — a röntgen analízis szerint körülbelül 5%-a — a metastabil A-15 szerkezetben kristályosodtak, és ezen részek sűrűsége valóban nagyobb volt, mint a normál Nb_3Si sűrűsége. A legfontosabb eredmény, hogy ennek a meglehetősen rendezetlen és deformált kristálynak a szupravezető hőmérséklete a 19 °K-t is eléri, és ez a magas érték egyértelműen jelzi az A-15 szerkezet kialakulását. Tudjuk, hogy a kristályhibák és feszültségek csökkentik a megfigyelhető kritikus hőmérsékletet (ezért nem lehetett ebben az esetben pontosan meghatározni azt), és így várható, hogy a további kutatások során jobban megközelítik az elméletileg jósolt maximumot. (Egyszerű becsléssel $T_c = 38$ °K adódik, de a pesszimistább kutatók is legalább 25 °K-t tartanak lehetségesnek [D. Dew-Hughes, Cryogenics *15*, 435 (1975)]).

Az A-15 szerkezet különleges tulajdonságai az elméleti fizikusok érdeklődését is felkeltették. L. P. Gorkov és O. N. Dorokov (J. Low Temp. Phys. *22*, 1 (1976)) egy, már korábban is javasolt modellt vizsgálnak, amelyben az átmeneti-fém atomokat egy dimenziós láncokba rendeződve képzelik el. A láncok mentén (a *d* pályák átfedése miatt) az elektronok könnyen mozoghatnak. A kristály ilyen láncok megfelelő módon rendezett összességéből épül fel, és a szupravezetést az teszi lehetővé, hogy megengedjük az elektronok (gyenge) láncközi terjedését is.

A megoldás során a szigorúan egy dimenziós rendszerek számításában korábban elért eredményekből indulnak ki. A láncközi csatolás megfelelő figyelembevételével vizsgálják az anyag rugalmas, elektromos és mágneses tulajdonságait. A kedvező szupravezető hőmérsékletet kapcsolatba hozzák az A-15 ötvözetek martenzites jellegű szerkezeti átalakulásával. A modell közös alapokból kiindulva értelmezi a fonon spektrumban kísérletileg tapasztalt változásokat, valamint a mágneses szuszceptibilitás és a rugalmas állandók anomális hőmérsékletfüggését. A számított fonon spektrum a modell kísérleti ellenőrzését is lehetővé teszi.

Azóta, hogy a BCS elmélet felállításával kvalitatív módon megmagyarázták a szupravezetés jelenségét, az elmélet nem sok segítséget nyújtott a magasabb kritikus hőmérsékletért folytatott küzdelemben. Úgy tűnik, hogy az A-15 szerkezet tulajdonságainak megértésével az elméleti kutatás utoléri az empirikus szabályokkal dolgozó fémfizikusokat, és talán a közeljövőben várható, hogy végre igazi áttörés következik be a valóban magas hőmérsékletű szupravezetők felé.

Mihály László

Marx György: Kimeríthetetlen anyag.

Magvető Kiadó, Budapest, 1975. Második kiadás 111 lap

A kis kötet három tanulmányt foglal magába. És ezek a tanulmányok — mint Marx György írásai általában — még második kiadásban is nagyon olvastatják magukat. A „Gyorsuló idő", a „Szélesedő látóhatár" a „Kimeríthetetlen anyag" érdekes, vagy talán érdekesebb, mint egy-egy elbeszélés.

De hát tulajdonképpen mik is ezek az írások? Fizikai cikkek? Irodalmi tanulmányok? Filozófiai eszmefuttatások? Egyik se és mindegyik. Egy fizikus beszél a világról, arról, hogy fizikus szemmel hogy látja a világot, vall a fizikáról, a természetről úgy, hogy azt a fizikától legtávolabb álló laikus is nemcsak követni, de élvezni is tudja.

Ezek a tanulmányok és Marx György haonló írásai hivatást, küldetést teljesítenek. A fizikát, a tudományt, annak legújabb eredményeit közérthető formában viszik a tömegek közé, teszik a társadalom legszélesebb rétegeinek közkincsévé. Egy olyan kötelesség és felelősség ez, amelyről a tudomány munkásainak sohasem szabad elfeledkezniük.

Mi az ami túl a dolog érdekességén, az ügyes „tálaláson" magával ragadja az olvasót ezekben a tanulmányokban? A szerző lelkesedése, saját kíváncsisága, saját csodálkozása a természet csodái és kimeríthetetlensége és a tudomány eredményei láttán. Szinte mindegy, hogy hol nyitjuk ki a könyvet, hogy honnan idézünk. „Az atomfizikusok még nem értek útjuk végére. Ahogy az expedíciók mélyebbre hatolnak, a homály sűrűbbé válik körülöttük, mind több megpróbáltatás és meglepetés vár reájuk. A feltáratlan tájak határai egyre hosszabra nyúlnak a már feltérképezett vidék peremén. Az ismeretlen világ ma is csábítja a kalandra, romantikára éhes fiatalokat a XX. század modern pionírtelepeire, Dubnába, Saclayba, Berkeleybe. Gyermekeink álmaiban a prémvadász és sarkutazó mellett megjelent az atomfizikus, aki a kaszkádgyorsító mellett a mesterséges villámoktól védő Farady-kalitkában figyeli a műszerlapok villódzó fényein, hogyan következnek be az általa előidézett magrobbanások".

Vagy nem azt érzi az ember a következő sorokat olvasva, hogy tudomány és művészet, fizika és költészet mennyire közel vannak egymáshoz? „Pillantsunk fel az esti égboltra. Csillagokat látunk, égi lámpásokat, amelyek annyiszor szerepelnek népmesékben és költeményekben. A fizikus szemében a csillagok a természet hatalmas alkimista kohói, amelyekben minden aranycsináló álmot felülmúlva végbemegy a kémiai elemek átalakulása egymásba. Ez az átalakulás termeli az energiát, amely a mozgást élteti. A mi Napunk egy a milliárd csillag közül. Sok millió fokos hőmérsékleten olvadnak benne eggyé az atommagok, a fúzió energiája napfénnyé alakulva lehelt életet a Föld anyagába. Bolygónk töredék a kozmikus csillag kohók kivetett salakjából. Nyugodtan élünk rajta milliárd esztendeje mi földi élőlények, mert a Nap központi fűtése egyenletes, meleggel lát el bennünket".

Marx György írásival túl a fizika és természettudomány népszerűsítésén az „egy-kultúra" harcosa, aki azért küzd, hogy Galilei és Heisenberg, a tejútrendszerek és az új elemi részek éppen úgy az egyetemes emberi kultúra, a széles tömegek műveltségének részei legyenek, mint Dosztojevszkij és Bartók. „Egy értelmes ember számára nyomasztó volna a gondolat, hogy évszázadok múltán felébredve egy képzelt álomból és visszatekintve életére, azt látná, süketen élt, nem vett tudomást mindenről, amit korából értékesnek ítélnek a következő századok."

Az elmúlt néhány év alatt Marx György egyes mondatai, gondolati valósággal szállóigévé váltak, részévé lettek XX. századi egyetemes kultúránknak. Gondoljunk csak pl. a következő szókapcsolatokra, rövid mondakra „gyorsuló idő", „otthonosan élni az univerzumban" vagy „a glóbusz már belefér egy iskolás gyermek fejébe" Így nem csoda, hogy a tanulmányok olvasása közben az az érzése támad az embernek, mintha már olvasta volna őket valahol, még akkor is, ha ezek az írások először vannak a kezében. Marx György tehát nem írt, nem küzdött hiába.

Berényi Dénes

Fizika 1975
Szerkesztette: Abonyi Iván

Gondolat Kiadó

Nagy örömet jelentett a fizika iránt érdeklődők számára a Fizika 1975 megjelenése. Örömünket fokozta, hogy már a cím is sejttette, a könyv előszava meg is erősítette, hogy a Gondolat Kiadó egy új, évenként jelentkező sorozat első kötetét adta ki.

Régen fennálló érezhető hiány pótlására vállalkozott a szerkesztő és a kiadó. A fizika napjainknak nagyon gyorsan fejlődő tudománya, eredményeit a társtudományok és a technika nap mint nap felhasználják. A termelés, a gazdasági élet, a kultúra el sem képzelhető a tudományos-technikai eredmények nélkül. Érthető tehát az emberek érdeklődése, kívánsága az új ismereteket összefoglaló, kissé könnyebben olvasható könyvek, cikkeki iránt.

A könyvben 10 cikket találunk. Ezek közül csak kettő foglalkozik „tiszta" fizikával (kritikus jelenségek és neutrinó-tömeg a kozmogóniában), négy cikk geofizikai jellegű ismereteket közöl, kettő tárgyalja a lézerek különböző alkalmazásait, olvashatunk a jövő nagy lehetőségéről, a csillagközi rádióüzenetek jelfelfogási kérdéseiről, amelytől várjuk kozmikus értelemben vett „provinciális" helyzetük megszünését, és végül a tizedik cikkből megtudhatjuk, hogy merre tart a fizika.

A kötettel egy új sorozat indul. Ez indokolja, hogy a kezdeményezés, a cikkekben felsorakoztatott ismeretanyag és prezentálás dícsérete mellett nagyobb súlyt helyezzek a kritikára. Valahogy úgy érzem, hogy a Fizika évkönyv az egész fizikus társadalom ügye több szempontból is. Egyrészt így adhatunk hírt kedves tudományunk fejlődéséről más tudományágakban dolgozó kollegáinknak és az érdeklődőknek. Másrészt mi magunk is innen tájékozódhatunk a fizika sok területén elért eredményektől.

A szerkesztő azt igéri, hogy a szakági megoszlás, más témakörök bemutatása hosszú távon fog bizonyos egyensúlyt elérni, ezért lényegében a cikkek kivitelezése, színvonala lehet a megjegyzések tárgya és nem az anyag összeválogatása.

Javasolok bizonyos szemlélet változásokat. Elsősorban adott terjedelem mellett kevesebb cikket kellene megjelentetni, amelyek hosszabbak lennének, tárgyukat részletesebben kifejtenék. Az volt az érzésem, hogy a cikkek problémája nem annyira a magas színvonal (ahogy a szerkesztő mondja: „nem riadtak vissza nehezebb matematikai összefüggések bemutatásától"), hanem a túl tömör, szakszerű kifejtés. Egy-egy rövid oldalon kapunk ismertetést olyan új eredményekről, amelyek tárgyalásához még tíz oldal is kevés lenne. Például megemlítem az időfelbontásos spektroszkópiát (59. o.) vagy a kozmikus és a földi időjárás közötti kapcsolatról írt 17 sort (165. o.).

Helyes lenne a jövőben kevesebb teret szentelni a módszerek leírásának, inkább a segítségükkel szerzett új ismereteknek. Törekedni kellene nehezebb témáknál a szemléletességre. Erre jó példát találunk a kritikus jelenségeket tárgyaló cikkben. Több hangsúlyt kaphatna a választott témakör történeti áttekintése is, hiszen ennek olvasása megvilágítja a felfedezések logikai útját, az olvasót segíti a tárgy követésében.

Néhány formai tanács. Egyes cikkekben az ábrák mellett nincs magyarázó szöveg, amely a megértést nagyon nehézzé teszi. Gyakori az olyan jelölés, amelyek magyarázatával adós marad a szerző.

Befejezésül mégegyszer szeretném hangsúlyozni a vállalkozás fontosságát, és azt a reményt, hogy a következő években megjelenő Fizika évkönyvek hasznos olvasmányai lesznek a fizika iránt érdeklődőknek.

Keszthelyi Lajos

VÉLEMÉNYEK

„ALKALMAZOTT KONTRA ALAPKUTATÁS?"

Szalay Sándor
Debreceni

A „kontra" szó kihangsúlyozza, hogy két ellentétes tevékenységet állítunk egymással szembe, amelyek kölcsönösen kizárnák egymást. Ez alapjában véve helytelen kérdésfeltevés, éppen úgy mintha olyan kérdést vetnénk fel, hogy „együnk-e, vagy igyunk?", — vagy pl. „a pénzt keressük-e, vagy pedig költsük?" Nyilvánvaló, hogy nem két egymást kizáró tevékenységről van szó, hanem éppen ellenkezőleg az alkalmazott és az alapkutatás kölcsönösen feltételezik egymást, éppen úgy, mint a kicsit talán szarkasztikusan felhozott másik két példában szereplő tevékenységek.

Alkalmazott kutatás nem lehet életképes alapkutatás nélkül, a természet törvényeinek megismerése nélkül. Ha nem ismerjük a törvényeket, nem tudjuk alkalmazni azokat. Igaz ugyan, hogy pl. a villamosenergia termelés és elosztás, fogyasztás volt már a múlt században, a nélkül, hogy az elektront ismertük volna. Fel kellett azonban előbb ismerni a villamos jelenségeknek legalább a fenomenológiai törvényeit (Ohm törvénye, indukció törvénye, stb.). Előbb volt alapkutatás és aztán lett alkalmazott kutatás, majd technikai fejlődés. Az elektron megismerése tiszta alapkutatás volt, de nélküle nem jöhetett volna létre az elektronikai alkalmazott kutatás és az elektronikai ipar, hírközlési ipar, stb. példátlan fejlődése.

Az alap és alkalmazott kutatás kölcsönös egymásra utaltságát, mintegy „békés együttélését" természetesen nem szabad szűklátókörűen értelmezni. Nem várható általában, hogy ugyanazon kutató tevékenységén belül a kutatáshoz hozzáállás egyszerre mindkét szempontból történjen. Társadalmi méretekben azonban, sőt esetleg már egy nagyobb kutatóintézeti kollektíva méreteiben is a kölcsönös egymásra utaltság jelentkezik és ahol ezt nem ismerik fel helyesen, ott a kutatás nagyon könnyen zsákutcába juthat.

Nem valószínű, hogy bármilyen társadalom tartósan, hosszú távra népgazdasági arányú jelentős összegeket hajlandó lenne áldozni tiszta alapkutatásra annak reménye nélkül, hogy abból valaha, valami hasznos a társadalom számára ki ne jönne. Természetes, hogy az a népgazdaság vagy társadalmi rendszer, amely hatalmas összegeket áldoz tudományos alapkutatásra, ezt nemcsak azért teszi, hogy társadalma egy nagyon szűk rétegének, a tudósoknak lehetővé tegye az alapkutatásnak mintegy öncélú szórakozás formájában való művelését, minden távlati hasznossági elvárás, vagy annak reménye nélkül

---

Utólagos hozzászólás az 1975-ös debreceni Vándorgyűlés vitájához

Kétségtelen tény azonban, hogy ilyen öncélú tendencia évtizedekkel ezelőtt és a múlt században sok helyen, neves és köztiszteletben álló intézményekben, egyetemeken, tudományos testületekben, akadémiákon előfordult, sőt uralkodott és ma is van hagyománya. Persze akkor a kutatásra a ráfordítások összehasonlíthatatlanul szerényebbek voltak mint ma, és többnyire nem népgazdasági eszközökből, hanem magánadományokból történtek. Az alapkutatás olyan értelmű nagyvonalú támogatását, hogy elvárjuk tudósainktól az eredményes alapkutatást anélkül, hogy szorongó félelemben tartanánk őket a gyakorlatilag hasznosítható eredmény rövid távra elvárása tekintetében, helyeselni lehet. Nem lehet előre tudni hogy egy alapcélkitűzésű kutatási programból mikor születik a társadalom számára beláthatatlan gyakorlati hasznosságú eredmény.

Röviden a válaszom a fenti kérédésre az, hogy az nem szerencsésen van feltéve. Nem „kontra", hanem „és", tehát „Alkalmazott és alapkutatás", Még szívesebben indítanék vitát úgy, hogy: „Az alapkutatástól az alkalmazott kutatáson át a népgazdasági hasznosságig".

Az alapkutatás eredményei még korunkban is és még az iparilag fejlett országokban is viszonylag lassan mennek át a gyakorlati alkalmazásba. Egy szakadék van az alapkutatás és az alkalmazás között. Ezt a szakadékot nem könnyű áthidalni és vitatható, hogy a hídverés melyik oldalról kezdődjék. Az alapkutató is felismerheti a felfedezésének esetleges gyakorlati jelentőségét. Mindenesetre elvárható tőle, hogy gondolkozzon rajta, hogy eredményét nem lehetne-e valahol alkalmazni és ha igen, mit tehetne annak érdekében, hogy az minél hamarabb hasznosuljon. Napjainkban — de talán mindig is — az alapkutatók szemlélete meglehetősen p u b l i k á c i ó c e n t r i k u s. Kutatása közben arra gondol, hogy annak eredményét egy publikációban írja le, ami természetes is. Nem helyes azonban az, ha a publikáció írása mintegy végcéllá válik, kizárólag azért kutat, hogy publikációja legyen. A publikáció a kutatásnak nem végcélja, csupán az eredmény ismertetésének egyik eszköze. Az eredmény publikálása után tovább kell lépnie a hasznosítás irányában. A termeléssel foglalkozó szervezetek, iparvállalatok gyakran nem elég tájékozottak tudományosan és nem vesznek egyhamar tudomást az új tudományos eredményekről. Legalábbis nálunk, Magyarországon nem nagyon várható, hogy az iparvállalatok keressék a kutatók körében a hasznosítható alaptudományi vagy egyéb eredményeket. Fel kell hívni rá a figyel-

müket, ha ilyen születik. Alapkutató intézeteinknél szerencsére most már többnyire kifejlődtek az alapkutatást a gyakorlattal jobban összekötő műszaki fejlesztési csoportok, részlegek, de olykor célszerű volna kisebb próbaüzemeket (pilot plant) is létrehozni kutató intézeteken belül. Ez meggyorsítaná a népgazdasági hasznosításig eltelő átfutási időt. Sok olyan műszer konstrukció, műszaki fejlesztés is születik alaptudományi kutató intézetekben, amelyek sokféle más célra is hasznosíthatók lennének, nemcsak a kutatásban és felsőoktatásban, hanem ipari és más gyakorlati problémák megoldásában is. A szükséges példányszám azonban ilyen különleges eszközökből egy kis országban olyan kicsi, hogy egyetlen iparvállalat sem vállalkozik a gyártásukra.

A legcélszerűbb, ha a kutatóintézeten belül létrejön olyan kisebb termelő részleg, műhely is, amelyik az ország számára szükséges kis példányszámot le tudja gyártani, forgalomba tudja hozni. Minthogy az ilyen intézeti termelőrészlegek az intézet saját alaptudományi bázisára támaszkodnak, biztosítva van a komoly minőségi ellenőrzés és a folyamatos továbbfejlesztés is.

„ALKALMAZOTT KONTRA ALAPKUTATÁS?"

Berényi Dénes
Debrecen

Hozzászólásomat azzal kell kezdenem, hogy a kerekasztal megbeszélés címe meglehetősen provokatív, azaz azonnal vitára ingerel.

„Hogy—hogy", — merül fel az emberben önkéntelenül a kérdés — „hát ma, 1975-ben szembe lehet egymással állítani az alap- és alkalmazott kutatást?" Hiszen a kerekasztal témában a „kontra" szó szerepel.

Véleményem szerint nem lehet szembeállítani. De mégis vannak bizonyos veszélyek és ezekkel a veszélyekkel helyes szembenézni. Egyénileg is, és közösségben is. Ez a mostani alkalom is egy ilyen „közösségi" szembenézés.

Melyek ezek a veszélyek, amelyek az alkalmazott és alapkutatás egészséges szimbiózisát veszélyeztetik?

1. Az első ilyen veszély maga a merev szétválasztás vagy egyenesen „kontra" beállítás. A valóságban se éles határ nincs, se szembeállítás nem lehetséges.

Közismert pl., hogy csak egy-két példát említsek, hogy a magfizikai adatokat (reakció hatáskeresztmetszeteket, radioaktív magok bomlási sémáit stb.) lassan már több évtizede mérik, határozzák meg a magfizikusok, azért, hogy az atommagról, a mag belső szerkezetéről és így tovább mélyebb ismereteket szerezzenek. Most az elektromos áramot szolgáltató nukleáris erőművek tervezésénél használják fel ezeket az adatokat. Sőt kiderült, hogy igen sok esetben a fenti alapkutatási céllal meghatározott magadatok pontossága nem kielégítő a gyakorlati, tervezési igények szempontjából, így most az alkalmazás követeli meg a mérések pontosságának a fokozását. A pontosság fokozása pedig a méréstechnika továbbfejlődését eredményezheti és az alkalmazások visszahatásaképpen hozzájárulhat a természet, pontosabban az atommag és a magszerkezet mélyebb megismeréséhez.

A részecskefizikában a legújabb nagy gyorsítók fejlesztése a szupravezető technikán alapszik, annak fejlődését mozdítja elő. Mindenki tudja viszont, hogy a szupravezető technika milyen lehetőségekkel kecsegtet a jövő gyakorlati igényeinek kielégítése szempontjából.

További példa a nukleáris elektronika esete. Az elmúlt évtizedekben a magfizikai mérésekben támasztott igények nagy mértékben járultak hozzá az elektronika fejlődéséhez, különösen az erősítők, jelformálók, sokcsatornás analizátorok stb. vonatkozásában. Az elektronika továbbfejlődése viszont a tranzisztorizálás, az integrált áramkör felhasználás, a számítógépek új generációi irányában igen nagymértékben segíti elő a nukleáris elektronika továbbfejlődését, pontosabban a magfizikai igények összehasonlíthatatlanul magasabb színvonalú kielégítését.

Velem együtt a jelenlevők közül sokan folytathatnák a példák felsorolását saját tapasztalataikból is.

Láthatjuk, hogy egy ponton túl összefonódnak a dolgok. Az alap és alkalmazott kutatások között az indítékban van végeredményben a különbség, amiért egy adott kutatáshoz hozzákezdünk és csináljuk, de tisztában kell lennünk azzal, hogy akár egyik, akár másik indítékkal kezdünk a kutatáshoz, ha jó kutatást csinálunk, ha igazán meg akarjuk oldani az adott fundamentális vagy alkalmazott problémát, akkor a dolgok egymásba torkollanak: egy igazi alaptudományos eredmény valamilyen értelemben alkalmazásokhoz fog vezetni és az alkalmazott probléma tudományos igényű megoldása majdnem bizonyosan gazdagítja ismereteinket a természet jelenségeire vonatkozóan is.

2. Egy másik veszély, amelyik nyíltan talán ritkán jelentkezik napjainkban, de talán annál inkább lappang vagy tör elő itt-ott többé vagy kevésbé burkolt formában: az alkalmazott kutatások lenézése.

Ha körülnézünk ma bárhol az utcán vagy az életben, mindenütt a modern természettudományok eredményeinek gyakorlati felhasználását, alkalmazását látjuk a röntgensugárzástól a nukleáris energiáig és az elektromos gépektől a TV adásig.

Igazi természettudós nem lehet közömbös, még kevésbé ellenséges az alkalmazásokkal szemben. A természet megismerésének és legyőzésének diadalát látja abban, ahogy alapvető tudományos munkája nyomán átalakul mindennapi életünk, és ezt a maga részéről minden rendelkezésre álló eszközzel igyekszik elősegíteni.

3. Másrészről — és itt a harmadik veszély — nem szabad a tudományt a szűklátókörű prakticizmus, a mindennapi igények szűk kalodájába szorítanunk.

Elhangzott a debrecenbeni vándorgyűlésen.

A természettudományok története arra tanít bennünket, hogy az igazi nagy áttöréseket az alkalmazások szempontjából is a nagy alaptudományos felfedezések hozták. Gondoljunk itt az elektromágneses indukció, a röntgensugárzás, az elektromágneses hullámok, a magban rejlő energia és így tovább felfedezésére. Vagyis — ahogy nemrégiben Casimir, az Európai Fizikai Társaság elnöke megfogalmazta — „Semmiféle használható elektromos áramforrás nem volt Volta munkája előtt. Semmiféle elektromotor azelőtt, mielőtt Oersted megfigyelte, hogy egy áramforrás által létrehozott elektromos áram erőt gyakorol egy mágnesre és viszont. Nem volt dinamó az elektromos indukció felfedezése előtt. A Maxwell elmélet megelőzte az elektromágneses hullámok Heinrich Hertz által történt felfedezését és ez utóbbit követte néhány év múlva a Marconi-féle alkalmazás".

Madách írja le nagyon találóan a Londoni színben, hogy hogy lehet a tudományt kiárusítani, eredeti célját apró-cseprő szolgáltatásokban elvesztegetni, elárulni. Talán nem veszik rossz néven tőlem a vándorgyűlés tisztelt résztvevői, ha idézek tőle néhány sort ezen az esti órán, ezzel élénkítve vitaülésünket.

A Nyegle: Félrébb az útból! tisztelet nekem,
Megőszült tudományban a fejem,
Míg a természet titkos kincseit
Felástam ernyedetlen szorgalommal.

Ádám: Minő csodás bolond ez, Lucifer?

Lucifer: *A tudomány, mely nyegle, hogy megéljen,*
Éppen, mint akkor, hogy tudóskodál,
Csakhogy több zaj kell most mint kelle hajdan.

Ádám: Ilyen mértékben azt sose tevém.
Gyalázat rá!

Lucifer: Arról ő nem tehet,
Természete, ha fél s kerülni vágyik,
Hogy ez ne álljon sírköve felett:
Ex gratia speciali.
Mortuus in hospitali.
Ha másokért áldozván éjt, napot,
Jutalmának kéréséhez jutott.

A Nyegle: Az emberek javára fáradék,
S im, itt van a *dicső* eredmény:
Ez az edényke élet-elixir,
Melytől megifjul a beteg, a vén.
Ezt szedték hajdan a nagy fáraók.
Ez Tankréd bűvös bájitalja:
E szépítőt használta Heléne,
Ez Kepler asztrológiája."

Éppen ezért hadd szögezzem le még egyszer befejezésül azt a meggyőződésemet, hogy alap és alkalmazott kutatást egymás ellen kijátszani nem lehet és nem szabad, különösen nem a szocialista társadalomban.

OKTATÁSI KÍSÉRLETEK A TERMÉSZETTUDOMÁNY EGYBEHANGOLT TANÍTÁSÁRA

Kovács László
Landler Gimnázium Nagykanizsa

Fizikusok számára bizonyára furcsán hangzik ez a szókapcsolat: „oktatási kísérlet". Valószínűleg inkább a „próbálkozás" köznapibb jelentésárnyalatra gondol az, aki hallja, s nem arra a tudományos egzaktságra, amit a műszerek és a számítógépek biztosítanak a kísérletezőknek.

Az igaz, hogy a pedagógiai törvényeket még nem tudják objektív mennyiségi formába önteni, azonban komolyan törekszenek arra, hogy az információelmélet, az irányítástechnika, a matematikai statisztika törvényeit egyre szélesebb körben alkalmazzák a pedagógiában is. Ha a pedagógia maga nem is tarthat igényt a természettudósok elismerésére, bizonyos pedagógiai gyakorlatról azonban csak őszinte megbecsüléssel lehet szólni. Senki sem tagadhatja pl. a budapesti fasori gimnázium kimagasló érdemeit.

Ha egy tanár elégedetlen valamely tananyagrésznél a diákjai által elért eredménnyel, akkor a kötelezően előírt tananyagot megkísérli más módszerrel elsajátíttatni. Ilyenkor módszertani pedagógiai kíséletről beszélünk. (Ha egy fizikus elégedetlen mérési eredményeinek pontosságával, akkor pl. érzékenyebb műszert kezd használni; a tanár sikertelenség esetén természetesen nem teheti azt, hogy pl. tehetségesebb gyerekanyaggal kezd foglalkozni.) A módszertani kísérlet sikerét matematikailag is viszonylag egyszerű leméri, hisz ha a kísérletben a hagyományosan oktatott kontroll-csoporthoz képest jobb eredményt értünk el, akkor a kísérletet eredményesnek mondhatjuk. Ha ez az eredmény a matematikai statisztika módszerével kiszámítva szignifikánsan jobb a kontroll-csoport eredményénél, akkor még általános következtetés levonására is nyílik lehetőség.

Egészen más a helyzet, ha a tanár a kötelezően előírt teljes tanyanyaggal, annak sorrendjével, tartalmával, szemléletével elégedetlen. Ilyenkor tantervi oktatási kísérletet kell kezdeni, amelynek véghezvitele, értékelése már sokkal nehezebb. A helyzetet tovább bonyolítja, ha nem is egy tantárgyról van szó, hanem, mint a természettudomány összehangolt oktatása esetén öt-hatról (fizika, kémia, biológia, földrajz, világnézetünk alapjai, pszichológia). Ha új ismeretanyag tanítását kell előkészítenünk, akkor kétféleképpen járhatunk el: Figyelembe vehetjük a diákok feltételezett előismereteit, a fejlődéslélektan, a didaktika, a neveléselmélet tanításait, és ezek alapján beilleszthetjük az új ismereteket a meglevő rendszerbe. Kiindulhatunk a tudomány oldaláról is. Kitűzzük az elsajátítandó gondolkodásmódot és az ehhez szükséges ismereteket, és kipróbáljuk, hogy adott életkorú és absztrakciós szintű gyerekekkel milyen formában fedeztethetők fel a természet törvényei. A hagyományostól eltérő, új ismeretanyagot természetesen csak a legeredményesebbnek ismert módszerekkel, azaz a legtöbb tanulói tevékenységet igénylő módon érdemes oktatni. Ez történik a természettudomány egybehangolt tanítása során is: a tanulók természetes érdeklődésére építve sértetlenül kerül be az osztályter-

Elhangzott a debreceni Vándorgyűlésen

mekbe a természettudomány, azaz megőrzi érdekességét, szépségét és nem válik megemészthetetlen tananyaghalmazzá.

Az oktatási kísérletek külön érdekessége, hogy azt élő emberekkel végezzük, és így felvetődhet néhány etikai probléma. A szülő beíratja gyermekét egy olyan gimnáziumi osztálytípusba, amelyről többé-kevésbé tudja, hogy milyen művelődési anyagot nyújt. Ha az osztályban tanító tanárok részt vesznek az egybehangolási kísérletben, akkor az a gyermek mást és másképpen tanul, mint hasonló korú társai. A legtöbb diák örül, hogy különleges helyzetbe került, és ez a tény nagyban segíti is a kísérletek eredményességét. Az előkísérletek során azonban néhány IV. osztályban — főleg a szülők aggodalmaskodásának hatására — a diákok az új gondolatok befogadása helyett szívesebben készültek volna feladatok megoldásával a felvételi vizsgára. Alaptalan volt az aggodalom. A kísérletben részt vett tanulók az elsajátított többletényanyag mellett gondolkodásmódjukkal is kitűntek a felvételiken és később örömmel újságolták, hogy amíg egyetemista társaiknak gondot okozott pl. a „kvantumállapot" vagy a „vezetési sáv" fogalma, addig ők örültek, hogy értik ezeket a dolgokat. A kísérleti oktatás eredményessége csak ilyen közvetett módon mutatható ki. A kísérleteket végző, irányító szakembereknek a kísérletek életképességét és eredményét illetően az ad megnyugvást, hogy az oktatás során végig sikerül a tanulók érdeklődését ébren tartani; a modellszerű gondolkodás elemeinek gyakorlása következtében sikerül a tanulókat ok-keresésre, magyarázat-adásra nevelni. Szemléletmódjuk, gondolkodásuk fejlődése alapján új témakörök irányában transzfer-hatás mutatható ki, és ami a legfontosabb: örömmel, szívesen tanulják a természettudományt, értik és alkalmazzák a felfedezett összefüggéseket.

Az egybehangolást végző tanár helyzete, lelkiállapota sokban hasonlít a laboratóriumban kísérletezők helyzetéhez; bizonyos fokú alkotói szabadsággal rendelkezik, korábbi tevékenységéhez képest új dolgot művel, tankönyvet ír, tervezi a demonstrációs és tanulói kísérleteket, és készíti azokhoz a szükséges eszközöket. Az „újat-adás" lehetősége és kényszere szép eredményekhez vezetett. Öröm látni, hogy ha egy-egy új tanár lép be a kísérletező-gárdába, akkor ő új színt, új feldolgozási módot hoz be az oktatásba. Ahogy a diákoknál igen eredményes a saját tevékenységen alapuló ismeretszerzés, ugyanúgy a tanárokat is lelkesíti, hogy saját elképzelésüket valósíthatják meg, saját tankönyvükből taníthatnak. Az egyik évi nyári szemináriumon még csak hurokfilmen megcsodált jelenség, vagy az egyetem tulajdonát képező eszközökkel bemutatott kísérlet a következő tanévben már saját készítésű berendezéssel kerül be az osztálytermekbe. Természetesen ez sok időt, önképzést, komoly erőfeszítést jelent, hisz az egybehangolás akadémiai terve csak a vezérfonalat adja meg. A részletek kimunkálása, a taníthatóság biztosítása, az új tananyag országos bevezetéséhez szükséges módszertani tapasztalatok feldolgozása a kísérletező tanárokra vár.

A kvantummechanika IV. osztályos tanítása során derült fény pl. arra, hogy az anyag elemi formáiról kialakítandó kép megszületését nem segíti, hanem inkább gátolja az a tény, hogy a negyedikesek viszonylag szélesebb ismeretkörrel rendelkeznek, és pl. matematikából többet tudnak, mint az elsősök. Így került az anyag golyó- és hullámmodellje az első osztályba.

A modellszerű gondolkodás kialakítására a gimnázium első osztályában az anyagszerkezet órákon végzett játékos kísérletekből a gyerekekben a játékosság maradt meg jobban, s így nem tudták elég komolyan venni a II. osztályos egzaktabb megfogalmazásokat. A modelljátékokat tehát érdemes lesz az általános iskola felső tagozatába levinni.

A kísérletező tanároknak segítséget jelentenek a nyári szemináriumok és az elmúlt tanévben indult rendszeres évközi előadások, konzultációk. Külön segítség, hogy elismerik, értékelik az oktatási kísérleteket végzők munkáját. Az 1974. évi hódmezővásárhelyi középiskolai fizikatanári ankét előadásainak több mint a felét az egybehangoló, koordináló kísérletekről szóló tanári beszámolók alkották. A Fizikai Szemlében a nyilvánosság előtt is kifejthetők az új elképzelések, mód van alkotó vitára. Az OPI és az MTA anyagi támogatásban is részesíti a kísérletezőket, a TMB Fizikai és Csillagászati Szakbizottsága pedig aspiránsi ösztöndíjjal is segíti az oktatási kísérleteket.

Problémaként csupán azt az esetet említem, amikor majd az egybehangolás országosan bevezetésre kerül, és a jelenlegieknél kevésbé lelkes és más tantárgyak iránt nem nagyon érdeklődő tanárok szembe kerülnek mérsékelt képességű és közepes szorgalmú diákokkal. Komoly előny lesz viszont, hogy kialakul a természettudományos tantárgyak tanításának egységes módszertana, és nagy lehetőségek rejlenek a szertárak egyesítésében is.

A Fizikai Szemle szerkesztőbizottsága az 1972. év januárjában meghirdetett Vélemények sorozatát az olvasók kérésére tovább folytatja ez évben is, az akkor kialakított szerkesztőbizottsági állásfoglalás alapján. E szerint „a Fizikai Szemle feladatául vállalja el, hogy teret nyit a fizikai kutatás és a fizika oktatására vonatkozó egyéni véleményeknek, ha azok értékes gondolatokat tartalmaznak és építő szándékúak, függetlenül attól, hogy egyeznek-e a lap szerkesztőinek nézetével, vagy sem". Ennek szellemében várjuk továbbra is olvasóinknak, várjuk a magyar fizikusoknak leveleit.

A szerkesztőbizottság

INDEX: 25.289

A szerkesztésért felel: Turiné Frank Zsuzsa

Szerkesztőség: Budapest V., Anker köz 1. Eötvös Loránd Fizikai Társulat. Távbeszélő: 227—040

A kiadásért felelős: Siklósi Norbert igazgató

Kiadja a Lapkiadó Vállalat, Budapest VII., Lenin körút 9—11. Levélcím: 1906. postafiók 223 Távbeszélő: 221—293

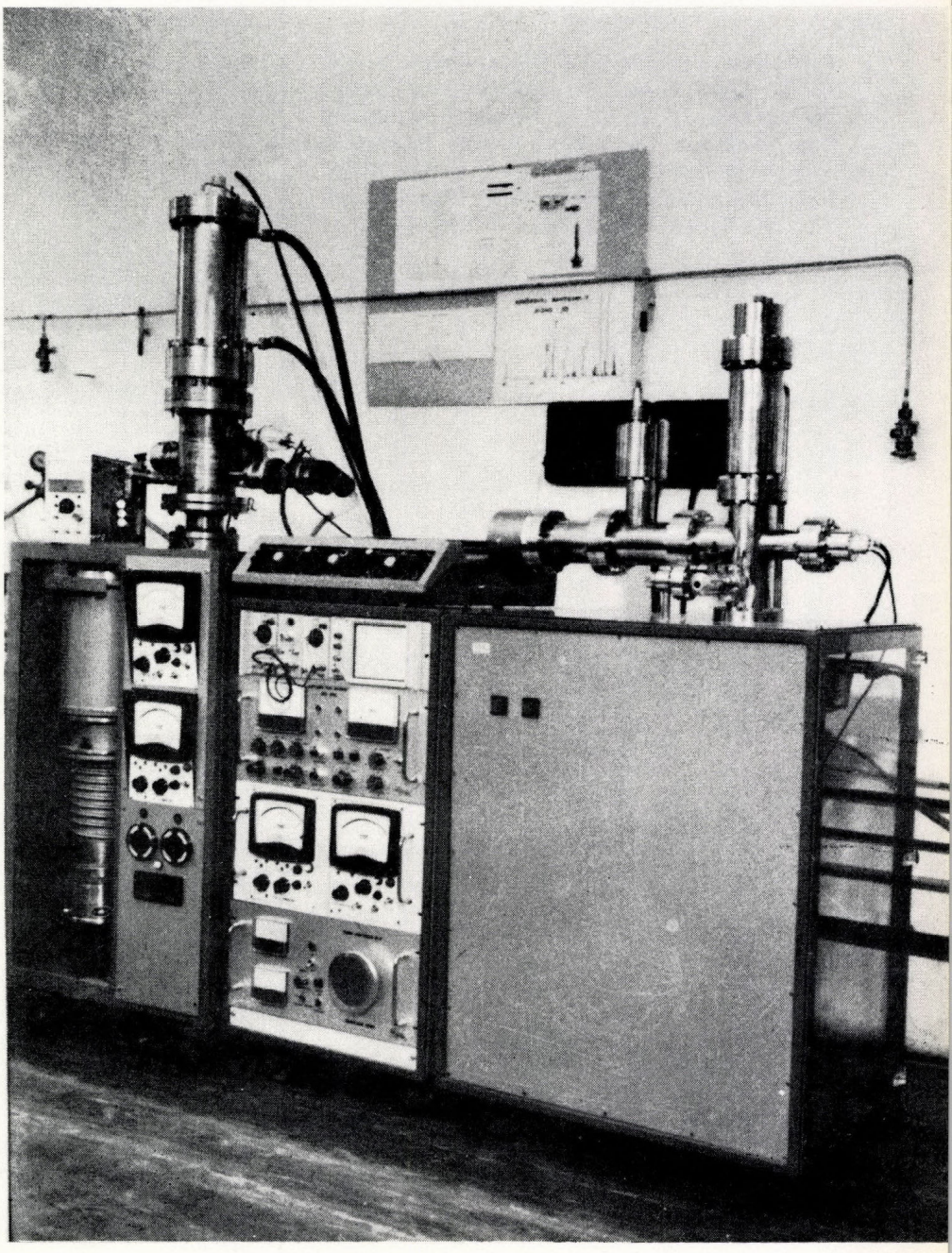
76.2663 Akadémiai Nyomda Budapest V., Gerlóczy utca 2. — Felelős vezető: Bernát György

Terjeszti a Magyar Posta. Előfizethető bármely postahivatalnál, a kézbesítőknél, a Posta hírlapüzleteiben és a Posta Központi Hírlap Irodánál KHI, 1900 Budapest V., József nádor tér 1.) közvetlenül vagy postautalványon, valamint átutalással a KHI 215-96162 pénzforgalmi jelzőszámlára

Előfizetés egy évre 72,— Ft, egyes szám ára 6,— Ft. Megjelenik havonta

fizikai szemle

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat lapja



1976/3

A szerkesztőbizottság elnöke:

Marx György

A szerkesztésért felelős:

Turiné Frank Zsuzsa

A szerkesztőbizottság titkára:

Berényi Dénes

Szerkesztőbizottság:

Balázs Béla, Barlai Katalin, Barta György, Bozóky László, Csekő Árpád, Dede Miklós, Fehér István, Flórián Endre, Gaal István, Groma Géza, Haiman Ottó, Hoffmann Tibor, Holics László Károlyházy Frigyes, Keszthelyi Lajos, Kovács István, Mihály László, Schanda János, Soós Károly, Szigeti György, Tóth Eszter, Valkó I. Péter, Vermes Miklós

Címképünk:

Kvadrupol tömegspektométer

TARTALOMJEGYZÉK

Berecz István—Bohátka Sándor—Murányi László: A fizikai elven alapuló gázelemzés módszerei és azok alkalmazása az orvosi kutatásban és a klinikumban 81 oldal

Bata Lajos: Folyadékkristályok fizikai, biológiai rendszerekben és gyakorlati alkalmazásokban 88 oldal

Szász András: Az ultraibolya fotoemissziós mérési módszer és alkalmazása a szilárdtestek fizikájában 103 oldal

Renner János

A FIZIKA TANÍTÁSA

Csákány Antalné: A hőtan alapfogalmainak tanításáról 108 oldal

ESEMÉNYEK 112 oldal

EREDMÉNYEK 118 oldal

VÉLEMÉNYEK

Zámori Zoltán: Előszó egy diplomamunkához 118 oldal

Berényi Dénes: Az erők egyesítése vagy szétforgácsolása 119 oldal

СОДЕРЖАНИЕ

И. Берец—Ш. Богатка— Л. Мураньи: Физические методы газового анализа и их применение в медицинских исследованиях и наклинической практике

Л. Бата: Жидкие кристаллы в физических и биологических системах и на практике

А. Сас: Метод ультрафинолетовой фотоэмиссии и его применение в исследованиях физики твердого тела

Я. Реннер

ПРЕПОДАВАНИЕ ФИЗИКИ

А. Чакань: О преподавании основных понятий учения о теплоте

СОБЫТИЯ

РЕЗУЛЬТАТЫ

ОТЗЫВЫ И ВЫРАЖЕНИЯ МНЕНИЙ

INHALT

I. Berecz—S. Bohátka—L. Murányi: Physikalische Methoden der Gasanalyse und ihre Anwendungen in der medizinischen Forschung und der klinischen Praxis

L. Bata: Flüssige Kristalle in physikalischen und biologischen Systemen und bei Anwendungen in der Praxis

A. Szász: Die Methode der ultravioletten Photoemission und ihre Anwendungen in der Festkörperforschung

J. Renner

Frau A. Csákány: Über das Unterrichten der Grundbegriffe der Warmelehre

EREIGNISSE

ERGEBNISSE

STELLUNGNAHMEN UND MEINUNGSAUSSERUNGEN

CONTENTS

I. Berecz—S. Bohátka—L. Murányi: Physical methods of gas analysis and their applications in medical research and clinical practice

L. Bata: Liquid crystals in physical und biological systems and in practical applications

A. Szász: The ultra violet photoemission method and its application in solid state research

J. Renner

THE TEACHING OF PHYSICS

Mrs. A. Csákány: On some problems of teaching the basic notions of heat

EVENTS

RESULTS

OPINIONS

fizikai szemle

AZ EÖTVÖS LORÁND FIZIKAI TÁRSULAT LAPJA

Alapította Eötvös Loránd 1891-ben Mathematikai és Physikai Lapok néven

XXVI. évfolyam 3. szám 1976. március

A FIZIKAI ELVEN ALAPULÓ GÁZELEMZÉS MÓDSZEREI ÉS AZOK ALKALMAZÁSA AZ ORVOSI KUTATÁSBAN ÉS KLINIKUMBAN

Berecz István és Bohátka Sándor
MTA Atommag Kutató Intézete, Debrecen
Murányi László
Szegedi Orvostudományi Egyetem, Gyermekklinika

Bevezetés

Szervezetünk fő energiaforrása az oxigén és anyagcsereterméke a széndioxid, a légzés folyamán a tüdőn át cserélődnek. A gázcsere alapfeltételei: a levegő mozgása: *ventilláció;* a vér keringése a tüdőn át: *perfúzió;* a gázok átjutása membránokon: *diffúzió.*

A gázcserének azt a részét, mely a tüdőben zajlik le külső légzésnek nevezzük. Ennek folyamatát szemlélteti *1. ábránk.*

A légzésfunkció megítélésében a gázelemzésnek tehát központi jelentősége van. A gázok elemezhetők a vérben és a légzési levegőben. Mivel az artériás vérből nyerhetjük a legfontosabb információkat, ez esetben főleg a vérvétel technikai akadályaival kell számolnunk, a gázfázisban viszont a rendkívül gyors változások követése a megoldandó feladat.

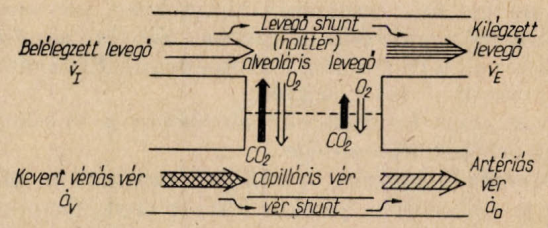
A légzés élettanának alapjait már századunk első felében lerakták, amikor még csak kémiai gázelemzésre volt lehetőség és a kutatóknak munkaigényes módszerekkel nyert sorozatmérési részadatokból kellett rekonstruálni a folyamatot.

Az ötvenes években a fizikai elven alapuló gázelemzéssel új korszak kezdődött a légzésfunkció kutatásában. A gyors ütemben kifejlesztett gyorselemző ún. célkészülékek segítségével regisztrálhatóvá váltak a ciklikus változások, az alveoláris gázkoncentrációk közelségébe sikerült jutni és a diffúzió mérése is általános gyakorlattá vált.

A fejlődés legújabb, alig 10 éves szakaszát az orvosi célra kialakított tömegspektrométerek nyitották meg. Megvalósult az a kívánság, hogy a légzési és idegen gázok azonos fizikai elven, rövid válaszidővel, nagy érzékenységgel és főleg több komponensű módon legyenek vizsgálhatók. Ez a többtényezős elemzés új módszerek kialakításához vezetett.

Cikkünkben az utóbbi két szakasz módszereinek fizikai alapjait és az orvosi alkalmazás fontosabb lehetőségeit kívánjuk ismertetni.

A légzési gázok méréséből nyerhető információk száma igen nagy és sokféle. Az információ-szerzés, a mérés is sokféle lehet. A kémiai módszerekkel viszonylag nagy pontosság érhető el, de a gázok száma eleve korlátozott (pl. nemes gázokra és nitrogénre nincs ilyen módszer), egyszerre csak egy gázkomponens koncentrációja mérhető és a mérés csak szakaszosan, lassan végezhető el.



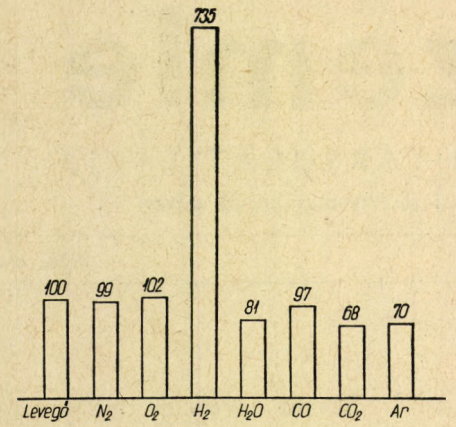
1. ábra. A gázcsere folyamatának vázlata a tüdőben (külső légzés). A szaggatott vonal az alveoláris membránt jelképezi (F. F. Kao nyomán)

A fizikai módszerek közül a legtöbb gyorsaságban felülmúlja a kémiai módszereket, lehetővé téve a gyors, folyamatos, pontos mérést. Ezek fizikailag és technikailag abban különböznek, hogy több légzés átlagos gázkoncentrációját vagy egyetlen légzés gázait elemzik lassabb vagy gyorsabb módon, egyszerre egy vagy több gázkomponenst mérnek.

A légzési gázok vizsgálatára használt berendezéseket az alábbi tulajdonságok szerint jellemezhetjük és hasonlíthatjuk össze:

Megszólalási idő, amely a késleltetési idő és a válasz idő összege. *A késleltetési idő:* a vizsgálandó gázmintában bekövetkezett változás kezdete és a kijelző műszer mutatójának megmozdulása közti idő. *A válasz idő:* amennyi idő alatt a gázmintában végbement ugrásszerű koncentráció-változás 90%-át a kijelző műszer nyomon tudja követni. A késleltetési idő csak a mérendő változás és a regisztrátum időbeli szinkronját határozza meg, s ha ismert és állandó, akkor nem zavaró tényező. A válaszidő szabja meg a készülék gyorsaságát. Ha az egy légzésen belüli (2—3 sec) történő jelenségeket vizsgáljuk, értékének 100m sec körül kell lenni.

Dinamikus tartomány: a legnagyobb és a legkisebb mérhető koncentráció aránya. Ennek a modern műszerekben már legalább 10^3 nagyságúnak kell lenni.



2. ábra. Gázok relatív hővezetőképessége (a levegőét 100-nak feltételezve)

Érzékenység: az a legkisebb koncentráció-változás, melyet még érzékelni tud a műszer, pontosabban: a zaj-amplitúdó kétszerese. Szoros összefüggésben van a dinamikus tartománnyal. Kívánatos, hogy legalább 0,1 % legyen.

Pontosság: hitelesítőgáz mérésekor a valódi és mért értékek különbsége.

Reprodukálhatóság, stabilitás: ugyanazon gázminta többszöri mérésekor kapott eredményeinek különbsége. A rövid idejű (néhány perces) stabilitással szemben szigorúbbak a követelmények, mint a hosszú idejű (8—24 órás) stabilitással.

Univerzális alkalmazhatóság: jellemzője: a berendezéssel egyáltalán mérhető és az egyszerre — szimultán — mérhető gázok száma. A vizsgálandó gázok közül legfontosabb az O_2 és CO_2, de egyes mérés-fajtáknál a N_2, H_2O, CO és tesztgázok, úgymint: He, Ar, Ne, N_2O, Freon. A tesztgázok közül elegendő egyszerre egyet mérni.

Lényeges tulajdonság a *megbízhatóság* (minél kevesebbet kelljen javítani, karbantartani) *egyszerű kezelhetőség* (ne kívánjon műszaki előképzettséget) *csendes működés, mozgathatóság.* Egy légzési periódus során a mintavételi módtól függően enyhe nyomásingadozás megy végbe, amelyre a készüléknek érzéketlennek kell lennie. A vizsgálat nem zavarhatja meg a beteg légzését, ezért a kilégzett levegőnek legfeljebb 1 %-át (50 ml/perc) használhatjuk fel a vizsgálatra. A készülék beteggel érintkező részét — a mintavevőt — sterilizálhatóra kell készíteni. A bronhoszkópiai vizsgálatnál követelmény a kis méret és a hajlékonyság is. A légzéselemzőkkel szemben manapság támasztott követelményeket csak a fizikai elven működő berendezések teljesítik. Ezek közül kívánjuk ismertetni a legelterjedtebben alkalmazott módszereket, valamint a jelenleg legígéretesebbnek látszó tömegspektrométeres elvet.

Hagyományos fizikai gázelemző módszerek

A hővezetéses elv alkalmazása. Ez a módszer azon alapszik, hogy a különböző gázok hővezető képessége külnbözik egymástól *(2. ábra).* A készülék érzékelőjét két egyforma vékony fém huzal képezi, amelyeket azonos és állandó árammal fűtenek. A két huzal egy Wheatstone-híd egy-egy ellenállását alkotja. Az egyik fémhuzalt referencia gáz pl. száraz levegő veszi körül, a másikhoz pedig a vizsgálandó gázt vezetik.

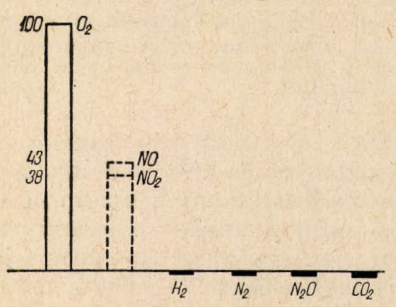
Amennyiben az utóbbi pl. kilégzett levegő ($CO_2 + H_2O$ levegőben), amelynek a hővezetőképessége különbözik a száraz levegőétől, a Wheatstone-híd egyensúlya a hővezetőképesség különbségnek megfelelő mértékben felborul. Az ilyen elven működő készülék empirikus úton kalibrálható, és CO_2 valamint O_2 gázokra néhány század százalékos analizáló pontosság is elérhető. Az analízishez 10—20 sec szükséges, ezért gyors gázösszetétel változás nem figyelhető meg vele. Mivel a gázok hővezetőképessége ugyanazon gázra nézve is változik a hőmérséklettel, az érzékelőrészt egy termosztátban helyezik el.

Meg kell még jegyeznünk, hogy a fenti elv tulajdonképpen csak két komponensű gázok vizsgálatára alkalmas. Ezért valamilyen módon (pl. abszorpcióval) a nem kívánatos komponenseket ki kell zárni. A problémákat az okozza, hogy a hővezetőképesség a gázoknak olyan tulajdonsága, amelyik csak mennyiségileg különbözik egymástól és már 3 komponensű keverék esetében egy mért hővezetés érték többféle gázösszetételnek felel meg.

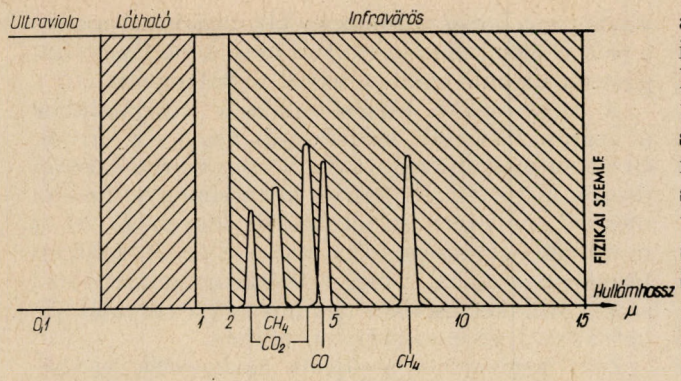
A továbbiakban olyan fizikai elveket ismertetünk, amelyekben a gáz analizálásra felhasznált tulajdonsága egyértelműen csak az adott gázra érvényes és más gázok jelenléte nem okoz zavaró hatást.

Ilyen lehetőséget biztosít az, hogy a kilégzett gázok közül az O_2 nagy *paramágneses szuszceptibilitással* rendelkezik, míg a többi gázok diamágnesek és szuszceptibilitásuk kicsiny *(3. ábra).* A működési elv egészen röviden az, hogy a vizsgálandó gázt egy inhomogén mágneses térbe vezetjük, ahol valamilyen módon mérjük a paramágneses szuszceptibilitást, amely a gázkeverék O_2 tartalmával arányos. A fentiekből következik, hogy itt más gázok jelenléte nem okoz zavart. Nagy hátránya ennek a módszernek, hogy csak egy gázkomponenst (O_2) mér és csak néhány sec-os válasz-idővel rendelkezik.

Sokkal használhatóbb az *infravörös abszorpció* elvén működő gázelemző. A nem azonos atomokból álló többatomos molekulák (pl. CO_2, H_2O, N_2O) infravörös abszorpciót mutatnak *(4. ábra).* Az említett gázok az infravörös sugárzást egy-egy jellegzetes sávban nyelik el, ami lehetőséget ad az



3. ábra. Gázok mágneses szuszceptibilitása (az oxigénét 100 egységnek véve)



4. ábra. Gázok jellegzetes infravörös abszorpciós sávjai

analizálásra függetlenül attól, hogy hány ilyen komponens van a vizsgált gázkeverékben. A működési elvet röviden a következőkben foglalhatjuk össze.

Egy infravörös-emittáló forrás sugárnyalábját a vizsgálandó gázmintán átbocsátjuk, és az áteresztett sugárzást pl. egy prizma vagy diffrakciós rács segítségével felbontjuk. Az abszorbeáló gázkomponensnek megfelelő sugárzási sávban érzékeny infravörös detektorokkal (bolométer) vizsgáljuk az abszorpció mértékét, információt kaphatunk az illető gázösszetevő nagyságáról. Megjegyezzük, hogy készítettek olyan infravörös abszorpciós gázelemzőt, amelyik pl. a CO_2-t $\pm 0{,}01\,\%$-os pontossággal méri. Előnye ezen kívül, hogy viszonylag kis megszólalási idő érhető el vele (0,1 sec). Természetesen gyors koncentrációváltozások esetén biztosítani kell a folyamatos és megfelelő sebességű gázminta-vételt is. Légzésvizsgálatban elsősorban CO_2 és CO mérésére használják. CO esetében néhány $0{,}001\,\%$-os pontosság is elérhető infravörös abszorpciós készülékkel.

Említést kívánunk tenni az ún. *„nitrogén mérő"*-ről, amelyik a légzési gázok N_2 komponensének vizsgálatára alkalmas. A készülék működése azon alapul, hogy a nitrogén elektromos kisülési csőben jellegzetes narancsvörös színt ad, ami különbözik a szokásos többi gázkomponensek kisülési színétől. A mintagázt egy kisülési csövön keresztül szivattyúzzuk, úgy, hogy ott 2 Torr nyomás jöjjön létre. Megfelelő fényszűrőt alkalmazva csak a N_2 által kibocsátott színű fény jut el egy fotocellára, amelyen keletkezett áram arányos a N_2 komponens nagyságával. Az ilyen készülékkel igen jó megszólalási idő (0,02 sec) érhető el, míg a pontossága $\pm 2\,\%$-ot tesz ki.

Tömegspektrométeres gázelemzés

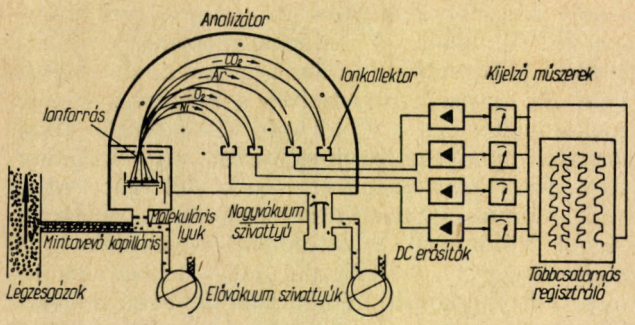
A tömegspektrométerek a gázokat tömegszámuk szerint különböztetik meg. Jellegzetességük, hogy csak nagyvákuumban működnek. Kivétel nélkül 3 fő szerkezeti egységből állnak: az ionforrás, ahol a gázokat ionizálják, az analizátor, amely az ionizált gázatomokat ill. a molekulákat tömeg/töltés szerint szétválasztja, és a detektor, amely a szelektálás után az analizátorból kilépő ionokat érzékeli. A tömegspektrométer-típusok közti legalapvetőbb különbség az analizátorban van. Az orvosi gyakorlatban a mágneses tömegspektrométert és a kvadrupól tömegszűrőt alkalmazzák manapság. Ezek egyaránt nagy érzékenységű, nagy pontosságú eszközök. Jól szét tudják választani az egymástól csak egy atomi tömegegységgel különböző gázatomokat/molekulákat is. Szinte egyetlen hátrányuk, hogy az azonos tömegű, de különböző kémiai tulajdonságú molekulákat nem tudják megkülönböztetni. (Egész pontosan véve ilyen esetekben is van néhány ezred atomi egységnyi tömegkülönbség, amely igen nagy felbontóképességű tömegspektrométerekkel jól kimutatható, de ezek olyan drágák, hogy a klinikai praxisban gyakorlatilag elérhetetlenek). Egyes esetekben a névleges tömegszámok egybeesése sem zavarja a mérést, pl.: a CO_2 és N_2O tömegszáma egyaránt 44, de a N_2O ionizálásakor nagyszámú NO^+ töredék-ion is keletkezik, s ez lehetővé teszi a N_2O mennyiségi meghatározását CO_2 jelenlétében is.

A tömegspektrométer nagy előnye, hogy tetszőleges számú gáz koncentrációja mérhető vele szimultán, a mérés gyors (a válaszidő <100 msec) és kellően érzékeny ($<0{,}1\,\%$).

A tömegspektrométeres légzési gáz elemző méréstechnikáját meghatározza a tömegspektrométer nagyvákuum-igénye. Az atmoszférikus levegőt többnyire 2 fokozatú nyomáscsökkentő rendszeren vezetik a tömegspektrométer ionforrásába, amely egyébként rendszerint elektronütközéses elven ionizálja a gáz atomjait/molekuláit. A 2 fokozatú rendszerben a vizsgálandó gázok egy tört hányadát a mintavételt kényelmessé tevő, legalább 1 m hosszúságú vékony kapillárison szívja át egy forgószivattyú. A kapilláris másik oldalán kialakuló néhány torr nyomásról engedik tovább a gázt egy molekuláris lyukon keresztül az ionforrásba, ahol már csak legfeljebb 10^{-5} torr nyomás uralkodik.

A kilégzett levegő telített vízgőzének kondenzálódását elkerülendő, a kapillárist fűteni szokták. A tömegspektrométeres légzésgáz-vizsgálók megszólalási idejét — a mai gyors elektronikus eszközök mellett — a mintavevő határozza meg. A gázáramlás és diffúzió, valamint az ionizálás, analizálás és a felerősített elektromos jel regisztrálóra való továbbításának ideje — a késleltetési idő — állandó, ezért a méréseknél figyelmen kívül hagyható. Nagysága 100 msec körüli érték. A mintavevőben és az ionforrásban az időben egymás után beérkező gázmolekulák kis mértékben keverednek. Az ebből adódó időállandó általában nagyobb, mint az iondetektálásnál használt erősítők időállandója. A modern spektrométeres berendezések válaszideje 100 msec vagy annál kisebb (létezik 40 msec-os rendszer is).

A mágneses tömegspektrométerben a jól meghatározott energiájú ionok az analizáló mágnes terében a tömegüktől függően különböző mértékű elhajlást szenvednek *(5. ábra)*. Több gáz egyidejű megfigyelésekor vagy az ionok energiáját



5. ábra. Mágneses tömegspektrométeres gázelemző elvi felépítése

változtatják és egy rögzített helyzetű detektorral érzékelik az ionokat, vagy állandó energiával lövik be az ionokat a mágneses térbe és a kívánt számú iondetektort a kérdéses tömegeknek megfelelő helyen rögzítik. Inkább az utóbbi megoldást alkalmazzák, mert nagyobb intenzitású, folyamatos jeleket szolgáltat és elektronikus szempontból kedvezőbb a kivitelezése. Hátránya, hogy a mérendő tömegszám szabad kiválasztása csak az ionkollektor elmozdításával történhet. Érzékenységük: 0,01—0,1%, stabilitásuk: ±1%.

A kvadrupól tömegszűrős gázelemzőkben az analizátor 4 párhuzamos rúdból áll, amelyre nagyfrekvenciás és vele arányos egyenfeszültséget adnak. A szemközti rudak azonos potenciálon vannak. Egy adott nagyfrekvenciás feszültségnél csak egy meghatározott tömegű ionok jutnak át a kvadrupól terén, a többiek kiszóródnak. Az ionkollektorra jutó áram arányos a gázminta koncentrációjával. A nagyfrekvenciás feszültséget megfelelően változtatva tömegspektrumot vehetünk fel. Csúcskiválasztó egység segítségével csak a kezelő által meghatározni kívánt tetszőleges számú gázkomponens jeleit kapjuk *(6. ábra)*. A kvadrupól nem igényel olyan nagy és annyira pontosan meghatározott ionenergiát, mint a mágneses tömegspektrométer, ezért ionforrása egyszerűbb és nagyobb intenzitást tesz lehetővé. Érzékenysége 0,01—0,1%, stabilitása ±1%.

Az ATOMKI-ban is foglalkozunk kvadrupól tömegszűrők építésével, és ennek egyik alkalmazásaképpen respirációs gázanalizátor kifejlesztésével is. Ennek egy kísérleti példánya már elkészült amellyel négy különböző gáz koncentrációváltozását lehet szimultán mérni, 100 msec-nál kisebb válaszidővel. A kísérleti példányon szerzett tapasztalatok alapján folyamatban van az orvosi gyakorlatban jól használható, egyszerűen kezelhető, megbízható berendezés kialakítása.

Respirációs gázelemzéssel nyerhető orvosi információk

Az orvosi kutatásban és klinikumban a fizikai elven alapuló gázelemzőket elsősorban a cardiorespiratios laboratóriumokban alkalmazzák, de egyre gyakrabban használják azokat az életveszélyes állapotban levő betegek ellenőrzésére az intenzív terápiás osztályokon is. Bár az ismertetett módszerek közül a tömegspektrometriával a vérgázok is elemezhetők, ezúttal csak a gázfázis vizsgálatán alapuló módszerekkel foglalkozunk.

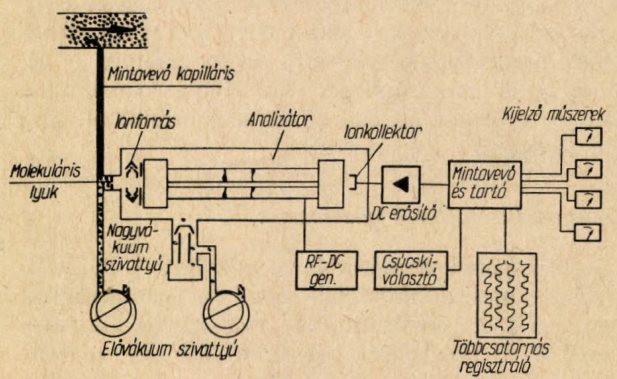
A mintavétel a légzési ciklusok vizsgálatakor a szájba illesztett szájrészből vagy az orrból, esetleg a mélyebb légutakba vezetett bronchoskóp csövön át történhet. Fontos követelmények: *a)* az illeszték holt-tere minél kisebb legyen és *b)* a mintavétel sebessége (elszívás) a kilégzés egyetlen fázisában se haladja meg a levegő áramlási sebességét. Mindkét esetben ugyanis művi torzulás jöhet létre a gázkoncentráció görbén.

Zárt rendszerben gyűjtött gázkeverék vizsgálatakor a mintavétel és az elemzés gyorsaságának technikai kérdései elhanyagolhatók, ekkor viszont az elemzés pontossága az elsődleges kívánalom.

Gázelemzés a légzési volumenek vizsgálatában. Ezúttal a módszert nem a gázcsere tanulmányozására, hanem a közvetlenül nem mérhető volumenek közvetett vizsgálatára alkalmazzuk. *7. ábránk* szemlélteti a legfontosabb légzési volumeneket és kapacitásokat. Ezek közül a teljes kilégzés után a tüdőben maradó gáz volumene (reziduális volumen: RV) és mindazon tényezők melyeknek ez alkotórésze (funkcionálási, reziduálási kapacitás: FRC; teljes tüdő kapacitás: TLC) csak közvetve mérhetők. A gyakorlatban legelterjedtebb a hélium hígítás vizsgálata zárt rendszerben.

Megjegyzendő, hogy a RV, FRC, TLC gázelemzés nélkül is mérhető testplethysmograph-al, de ez a költséges berendezés ma még kevés laboratóriumban áll rendelkezésre, az említett tényezők vizsgálata pedig a klinikai diagnosztika mindennapos rutin feladata.

A légzésfunkciós diagnosztika új fogalma a záródási volumen (closing volume), mely főleg a kisebb átmérőjű légutak állapotáról ad értékes felvilágosítást. Mérése a volumen és a gázkoncentráció egyidejű változásának regisztrálásával történik X, Y irón. A mérendő gázok lehetnek: N_2, He, Ar, vagy esetleg ^{133}Xe. A mérés elvét *8. ábránk* szemlélteti. A teljes belégzés során bolus formában a légáramba juttatott gáz koncentrációját mérjük lassú kilégzés során a volumennel együtt. A gázkoncentráció egyenletes emelkedése (III. fázis) bizonyos volumen elérésekor meredekebben emelkedő IV. fázisba megy át. Ez a pont



6. ábra. Kvadrupól tömegszűrős gázelemző elvi felépítése

jelzi a CV kezdetét. A CV a teljes kilégzés végéig tart. A CV és az RV összege adja az ún. záródási kapacitást (closing capacity: CC).

Az alveoláris gázkoncentrációk vizsgálata. A fizikai elven alapuló ún. gyorselemzők főleg az alveoláris gázok koncentrációjának regisztrálásával értek el áttörő fejlődést. A szakaszos mintavétel az egyidejű vérgázvizsgálattal a kutatás munkaigényes módszere maradt. A folyamatos regisztrálás során felismerték a koncentráció görbék alaki elemzésének jelentőségét, mérhetővé váltak vértelen utakon az alveoláris koncentrációk és a többtényezős vizsgálat egyetlen légvétel alapján több funkció zavarába nyújt betekintést.

A kilégzett levegő koncentráció görbéje három szakaszból áll:

1. Ún. holttér szakasz, mely alatt az előző belégzés végén a felső légutakban maradt küllevegő ürül, tehát légzési gázkoncentráció változás még nincs.

2. Keveredési szakasz, mely alatt a gázkoncentráció gyors változása észlelhető — exponenciális szakasz — melyben a felfutás meredekségét az áramlási tényezők befolyásolják .

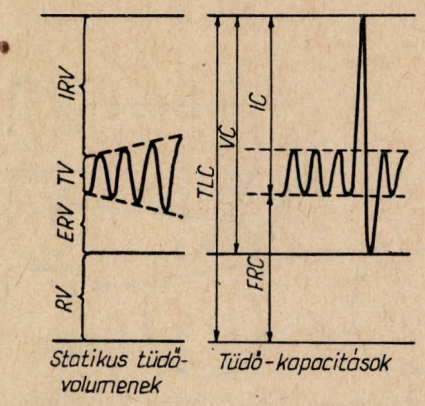
3. Alveoláris szakasz vagy plató — lassú változás lineáris szakasza, mely a gázcsere vizsgálatában a legfontosabb információkat adja.

A gázkoncentráció görbékről leolvasható két legfontosabb adat: az alveoláris (kilégzés végi) abszolút érték és a görbe alakja. Utóbbi számszerű kifejezésére alkalmazott módszerünk vázlatát *9. ábránk* adja. A módszer lényege az egyes szakaszok meredekségének meghatározása és az egyes görbe a szakaszok tangenseivel, illetve azok hányadosaival jellemezhető. Laboratóriumunkban a kiértékelés automatizált módon számítógép segítségével történik.

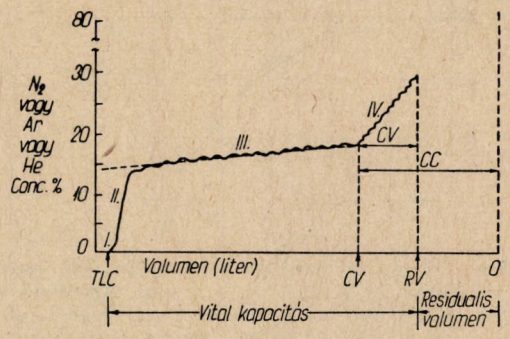
A CO_2 görbe alakjából a tüdőbeni ventilláció illetve a ventilláció és perfúzió viszonyának kóros eloszlására, az oxigén görbéből ezeken kívül a diffúzió eloszlására, míg az argon görbéből a gázeloszlásra — lásd később — lehet következtetni.

Gázeloszlás vizsgálata. A légzés hatásfokát rontja, ha a tüdőbe jutott levegő nem egyenletesen oszlik el. Ezt a jelenséget gázelemzéssel több módon ki lehet mutatni. Egyik gyakran alkalmazott módszer szerint tiszta oxigén belégzés után a N_2 kiürülés sebességét mérik (kimosási görbe). A légvételenként mért ún. közép N_2 koncentráció csökkenés lefutása lassúbb, elhúzódóbb egyenlőtlen eloszlás esetén, mint ép viszonyok között. A gázeloszlás egyenlőtlensége egyetlen légvétel alapján is vizsgálható. Ehhez olyan gázt alkalmaznak, melynek koncentráció-változását csak a gázeloszlás befolyásolja (pl. Argon). Jó eloszláskor az Ar görbe platója horizontálisan fut az alveoláris szakaszban (plató), mely kóros esetben megváltozik *(10. ábra)*. Oxigén belégzés után a N_2 görbe is hasonló módon téjékoztat a gázeloszlás egyenletességéről (egy légvételi technika).

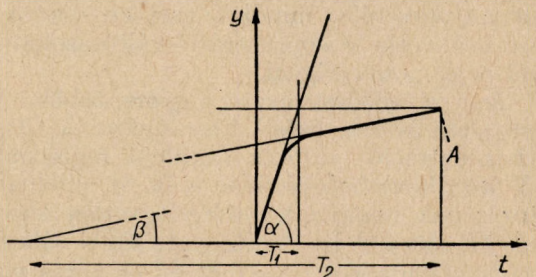
Az *anyagcserét* az oxigén fogyasztás ($\dot{V}_{O_2}$) és a széndioxid termelés ($\dot{V}_{CO_2}$) mérésével vizsgálhat-



7. ábra. Légzési volumenek és kapacitások. Rövidítések: IRV = belégzési rezerv; TV = egyszeri légvételi volumen; ERV = kilégzési volumen; RV = residuális volumen; TLC = teljes tüdő kapacitás; VC = vitál kapacitás; IC = belégzési kapacitás; FRC = funkcionális reziduális kapacitás. Az erőltetett kilégzés végén a tüdőben maradó reziduális volumen (RV) és mindazon paraméterek, melyeknek a RV összetevője, közvetve gázanalízissel, ill. testplethysmograph-al meghatározható



8. ábra. A záródási volumen (closing volumen, CV) mérésének elve. Volumen és gázkoncentráció egyidejű regisztrálása X, Y íróval. A CV kezdetét a gázkoncentráció meredek (IV. fázis). jelzi. A CV a gázkonc. IV. fázisának kezdetétől a kilégzés végéig mért volumen. Záródási kapacitás (closing capacity, CC) = CV + RV. További részletek a szövegben

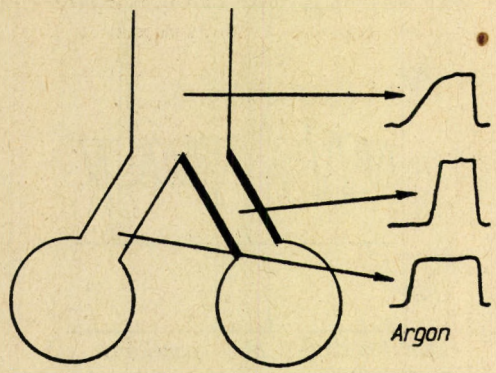


9. ábra. Kilégzési görbe alaki elemzésének módszere a görbe összetevőinek meredeksége alapján. A felszálló és a plató szakasz tangenseivel illetve ezek hányadosával jellemezhető a görbe minősége. X tengelyen idő, Y tengelyen gázkoncentráció.

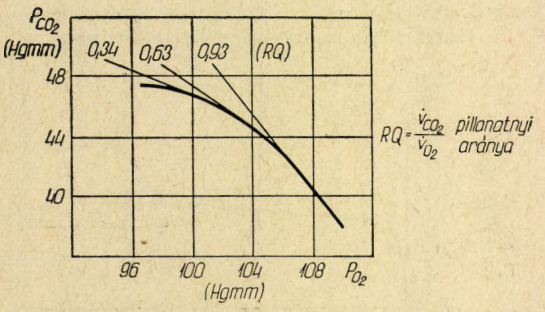
$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{A}{T_1}\,;\quad \operatorname{tg}\beta = \frac{A}{T_2}\,;\quad \text{ebből}\ \frac{\operatorname{tg}\alpha}{\operatorname{tg}\beta} = \frac{T_2}{T_1}$$

mivel $\operatorname{tg}\alpha = t_1$ és $\operatorname{tg}\beta = t_2$, ezért $\frac{t_1}{t_2} = \frac{T_1}{T_2}$

juk. E két tényező aránya a respirációs kvóciens, R. Q. $= \frac{\dot{V}_{CO_2}}{\dot{V}_{O_2}}$. Az időegység alatti gázcsere isme-



10. ábra. Egyenlőtlen gázelosztás kimutatása idegen gázzal (Argon). A jól szellőző tüdőrészből (bal oldal) egyenletesen eloszlott gáz normális koncentrációgörbével ürül (plató vízszintes), a szűkület miatt egyenlőtlenül eloszló gáz jobb oldalról késéssel és magasabb koncentrációban ürül. Ezek eredménye a szájnál regisztrált deformált alakú Ar konc. görbe



11. ábra. Oxigén és széndioxid koncentráció egyidejű regisztrálása kilégzés alatt X, Y íróval. Az eredő görbe meredek emelkedése fokozatosan vízszintesbe hajló szakaszba megy át jobbról balra, mivel változatlan oxigén csökkenés mellett a CO_2 már alig emelkedik az alveoláris levegőben. Az ábra a R. Q. pillanatnyi csökkenését is szemlélteti a kilégzés során, mely nagyobb fokú kóros állapotra utal

retéhez volumen adatokra is szükség van. Zárt és nyílt rendszerben egyaránt vizsgálható a szervezet anyagcseréje, mindkét esetben viszonylag lassan bekövetkező koncentráció változásokat kell mérni nagy pontossággal.

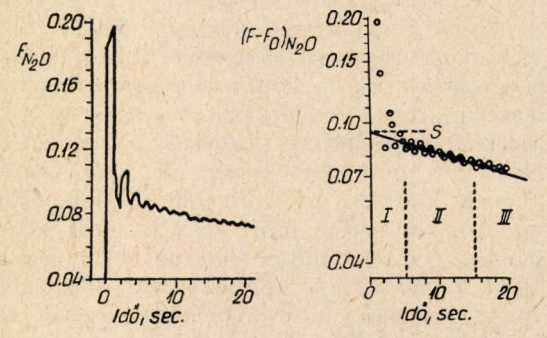
E téren is fejlődést hozott a gyors, többkomponensű elemzés lehetősége, amennyiben a CO_2 és O_2 koncentráció változás egyidejű regisztrálása X, Y irón követhetővé tette a R. Q. pillanatnyi változásának nyomon követését egyetlen légvétel alatt *(11. ábra)*. A R. Q. időegység alatti változása jelentős különbséget mutathat ép és kóros viszonyok között.

Diffúzió vizsgálata. A ventilláció és perfúzió által a tüdőbe jutó gázoknak diffúzió révén kell kicserélődniük. Diffúziós kapacitás alatt az idő (min) és nyomásegység (Hgmm) alatt a membránokon átjutó gáz mennyiségét (ml) értjük. Ez a funkció vizsgálható CO-al és O_2-vel egyaránt. A mérés azon az elven alapul, hogy CO esetén az igen kis koncentrációban az alveoláris térbe juttatott és onnan a keringésbe jutó gáz mennyiségét (koncentráció csökkenés) csak a membránviszonyok határozzák meg, mivel a CO a vér Hb-al az oxigénnél sokkal gyorsabban és erősebben lép kémiai kötésbe és oldékonysága itt nagyobb mint az alveoláris-capilláris membránban. Az infravörös abszorpción alapuló műszer nagy pontossága és a módszer egyszerűségénél fogva ez a módszer terjedt el a gyakorlatban a hypoxiás gázkeveréket igénylő O_2-módszerrel szemben, amelynek alkalmazását a beteg állapota is korlátozza.

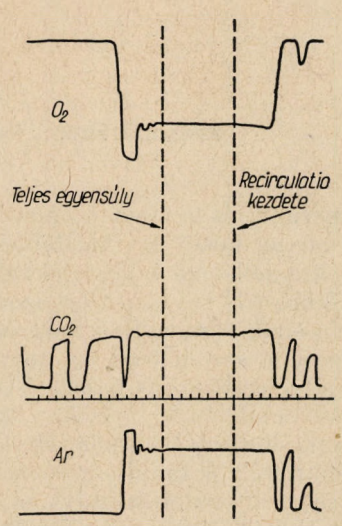
A *tüdő vérátáramlása*, a *perfúzió* ($\dot{Q}$) a gázcsere szempontjából éppoly lényeges mint a ventilláció ($\dot{V}$). A kettő ugyanis szoros funkcionális egységben van. Abszolút értékben kifejezhető mennyiségükön kívül egymáshoz viszonyított arányuk is fontos ($\dot{V}/\dot{Q}$). Utóbbi illesztéséről számos reflexmechanizmus gondoskodik. Ezen arány alakulásáról felvilágosítást ad a légzési görbék alaki elemzése, valamint az alveoláris és vérgáztenziók különbsége.

A pulmonális perfúzió gázelemzéssel is mérhető. E célra olyan gáz alkalmas, melynek alveoláris koncentráció-változásait csak a tüdőbeni vérkeringés sebessége befolyásolja, tehát független a diffúziós tényezőktől. Az ilyen gáz a vérben jól oldódik (pl. N_2O). A légvételenként regisztrált N_2O változás (csökkenés) a perfúzió sebességének függvénye, így ennek meghatározásával a perfúzió mértékére kapunk fontos adatokat *(12. ábra)*.

A szív percolumen indirekt mérése. A beteg állapotát mind nyugalomban, mind munkaterheléskor jól jellemző ezen adat közvetlen méréséhez a szív üregeibe vezetett katéteren át vett minta elemzése szükséges. Többkomponensű gázelemzéssel azonban közvetett módon is megközelíthetők az említett vér-adatok akár munkavégzés alatt is. A vizsgálandó beteg előkészített gázkeveréket lélegez be zárt rendszerben egy ballonból és ugyanoda lélegzi ki. Néhány légvétel után beáll egy pillanatnyi egyensúly a tüdőben levő vér, gáz és a ballon gáztartalma között. Az egyensúly beálltát harmadik, idegen gáz regisztrálásával lehet pontosan megállapítani. Ezek az egyensúlyi pontok



12. ábra. A tüdő perfúzió mérése vérben jól oldódó gáz (N_2O) zárt rendszerű visszalélegeztetésével (rebreathing). A gázkoncentráció csökkenés az alveoláris levegőben a tüdő perfúzió sebességének függvénye. Bal oldalon: N_2O koncentráció görbe visszalégzés alatt, jobb oldalon: a be- és kilégzési végkoncentráció értékek (üres körök) és a térfogatsúly átlagértékek (fekete körök) semilog. ábrázolása. I = kezdeti fázis ; II = exponenciális fázis; III = recirkulációs fázis; S = a fekete körök adatai által meghatározott egyenes metszéspontja a 0 időponttal



13. ábra. A tüdőbe visszajutó kevert vénás vér gáztenziónak meghatározása vértelen úton gázanalízissel visszalégzéses (rebreathing) módszerrel. A teljes egyensúly beálltát az Ar görbe jelzi. Az egyensúly néhány mp alatt a mért gázértéket adják, majd a keringés újabb fordulata során (recirkuláció) az egyensúly megbomlik

tehát közvetlenül a vér megfelelő adatait adják meg, melyek a további számítás legfontosabb adatai. A módszer lényegét *13. ábránk* szemlélteti.

A fizikai elven alapuló módszerek sokoldalú orvosi alkalmazásának minden területét nem ismertethetjük. Összefoglalásul táblázatban mutatjuk be a legfontosabb lehetőségeket, megjelölve az egyes készülékek alkalmazhatóságát. E táblázatból is kitűnik hogy a tömegspektrometria a legsokoldalúbb módszer az orvosi felhasználásban. Érthető tehát az a törekvés, hogy a komplex légzésvizsgáló laboratóriumokat a gázelemzésnek ezzel a lehetőségével szerelik fel. A táblázattal kapcsolatban meg kell jegyezni, hogy a felsorolt tényezők egy része valóban önmagában csak gázelemzéssel vizsgálható, más tényezők azonban csak egyéb felszereléssel együtt (pl. spirometer, pneumotachograph) mérhetők.

A fizikai elven alapuló gázelemzők fontosabb alkalmazási lehetőségei az orvosi gyakorlatban

Vizsgálandó tényezők	Az egyes gázok elemzésére készült berendezések					Tömegspektrométer
	N_2	CO_2	O_2	CO	He	
Residualis vol. RV	+				+	+
Funkcionalis resid. kapacitás FRC	+				+	+
Closing volume CV	+				+	+
Anatómiai holttér	+	+	+			+
Alveoláris ventilláció		+	+			+
Gázeloszlás a tüdőben	+	–				+
Anyagcsere R. Q.						
O_2 fogyasztás			+			+
CO_2 termelés		+				+
Diffúziós kapacitás						
CO módszer				+		
O_2 módszer			+			+
Szív percolumen (indirekt)		+	+			+
Pulmonális perfúzió						+
Kilégzett levegő vízgőz						+
Altató gázok konc.						+

IRODALOM

1. Cerretelli, P.: Bloodless measurement of cardiac output Bull. Physio-Pathol. resp. Nancy *3.* 459. 1967.
2. Comore, J. H. Jr., Forster, R. E., Dubois, A. B., Bricoe, W. A., Carlsen, E.: The Lung Second Ed. Year Book Medical Publishers Chicago 1965.
3. Dollfuss, R. E., Milic-Emili, J., Bates, D. V.: Regional ventillation of the lung studied with boluses of ^{133}Xe Resp. Physiol. *2.* 234. 1967.
4. Fowler, K. T., Hugh-Jones, P.: Mass spectrometry applied to clinical practice and research Brit. Med. J. 1952, II. 1205.
5. Fowler, K. T.: The respiratory mass spectrometer Phys. Med. Biol. *14.* 185. 1964.
6. Murányi, L.: A légzészavarok vizsgálata gyermekekben a széndioxid gázcsere zavara alapján. Kandidátusi ért., 1970.
7. Muysers, K., Schmidt, V.: Respirations Massenspektrometrie F. K. Schattauer Verlag, Stuttgart, New York 1969.
8. Szekeres, I.: Automatikus működésű digitális adatelőkészítő berendezés elsősorban légzésfunkciós vizsgálatok analóg jeleinek on line rögzítésére, gépi adatfeldolgozás céljából Orvos és Techika *13.* I. 1975.
9. Teichmann, J., Adaro, F., Veicsteinas, A., Cerretelli, P., Piiper, J.: Determination of pulmonary blood flow by rebreathing of soluble inert gases Respiration *31.* 296. 1974.
10. West, J. B., Fowler, K. T., Hugh-Jones, P., O'Donnell, T. V.: The measurement of the inequality of ventilation and of perfusion in the lung by the analysis of single expirates Clin. Sci. *16.* 549. 1957.
11. Woolmer, R.: Physical methods of gas analysis Brit. J. Anaesth. *25.* 315. 1953.
12. Lilly, J. C.: Physical methods of respiratory gas analysis Meth. in Med. Res., *2.* 131. 1950.
13. Mosharrafa, M.: Mass spectrometry in clinical and medical research Research Development March. 1970.

FOLYADÉKKRISTÁLYOK FIZIKAI, BIOLÓGIAI RENDSZEREKBEN ÉS A GYAKORLATI ALKALMAZÁSOKBAN

Bata Lajos
Központi Fizikai Kutató Intézet

Bevezetés

Mindennapos tapasztalatunk, hogy az anyagok hőmérséklet-változás során szilárd fázisból folyadék fázisba mennek át (jég—víz). Vannak azonban olyan szerves anyagok, melyeknél ez az átmenet nem ilyen egyszerű. A szilárd és folyadék fázis között több közbülső, azaz mezomorf fázis jelenik meg. Ezeket az anyagokat hívjuk mezogéneknek. Az ilyen anyagok nem gömbszimmetrikus, hanem pálcika vagy korong alakú molekulákból épülnek fel. A molekulák elhelyezkedését az anyagban a tömegközéppontjuk helyzete még nem határozza meg, a transzlációs rend mellett orientációs rend is fontos szerepet játszik. Amíg a transzlációs rend független lehet a molekula alakjától a rotációs (orientációs) már nem. Elvileg tehát kétfajta mezofázis fellépését várhatjuk. Az első, melyben a tömegközéppontok háromdimenziós rendje (kristály rácsa) megmarad, de rotációs rendezetlenség lép fel, a második, melyben a tömegközéppontok háromdimenziós rendezettsége megszűnik (ezért folyadékok), de rotációs rendezettsége bizonyos fokig megmarad (ezért kristályos). Azokat az anyagokat, melyeknek tömegközéppontjuk és irányuk háromdimenziósnál kisebb rendezettséget mutatnak folyadékkristályoknak, az anyagnak ezt az állapotát folyadékkristály állapotnak nevezzük.

Korábban azokt az anyagokat, melyeknek tömegközéppontjuk három dimenzióban rendezett ugyan, de irányuk teljesen rendezetlen (transzlációs rend, rotációs rendezetlenség) plasztikkristályoknak nevezték el. Ma már inkább a folyadékkristályos állapot egyik speciális esetének (szmektikus-B) tekintjük.

1. Történeti áttekintés

Az első folyadékkristályos tulajdonságot mutató anyagra Reinitzer osztrák botanikus talált rá 1888-ban. Észrevette, hogy a szilárd koleszteril benzoát 145 °C-on zavaros folyadékká olvad meg, és csak 179 °C után válik tiszta, átlátszó folyadékká. Amikor hűteni kezdte ezt a folyadékot, 179 °C-nál az anyag kékes színben pompázott, majd ez a színeződés eltűnt, és az anyagminta ismét zavarossá vált. 145 °C-on ismét elszíneződött az anyagminta, és megindult a kristályosodás folyamata.

Reinitzer azt hitte, hogy anyagmintája kettős olvadásponttal rendelkezik, ezért bemutatás céljából elküldte Lehmanhoz, az ismert német fizikushoz. Lehman polarizációs mikroszkóppal kimutatta, hogy a zavaros közbülső fázis kristályokra emlékeztetően optikailag anizotróp tartományokból épül fel. Ezek a mikroszkopikus, optikailag anizotróp tartományok egymáshoz képest rendezetlenül helyezkednek el, és a fény a tartományokon különbözőképpen szóródik, ezért zavaros az anyagminta. Lehman ennek az állapotnak mindjárt nevet is adott, folyadékkristály-állapotnak nevezte el.

Hamar kiderült, hogy nemcsak egy anyag rendelkezik ilyen állapottal. (Ma mintegy 3000 ilyen anyagot ismerünk, és minden újonnan felfedezett 200 kémiai anyag közül egy rendelkezik a folyadékkristályokra jellemző sajátságokkal.)

A folyadékkristály szóösszetétel azonban sokáig ellentmondásosnak tűnt a fizikusok és vegyészek előtt, hiszen nem sorolhatták az anyag termodinamikailag jól megalapozott halmazállapotai közé. Egyesek csak emulziónak, mások a szennyezések hatásának tulajdonították a jelenséget.

A folyadékkristályok tanulmányozása az 1930-as évek elején nagy intenzitással folyt, olyan kutatók érdeklődését ragadta meg, mint Ornstein, Bragg, De Broglie, Max Born stb. 1931-ben Németországban szimpoziumot szerveztek a tárgykör megvitatására. Ennek ellenére az állapot értelmezése terén a következő 25 évben gyakorlatilag semmi sem történt, csak a folyadékkristály-állapotot mutató anyagok számát növelték. A harmincas évek végére ezek a vizsgálatok lekerültek az érdekes kutatások listájáról. Tankönyvek is csak érdekes kuriózumként emlegették, ha egyáltalán megemlítették.

Az 1950-es évek végére azután fordulat következett be. 1958-ban az angol Faraday Társaság szimpoziumot szervezett. Fő előadó Bernal professzor volt. A makromolekulákról tartott előadást. Frank [Fr 58] ismertette a folyadékkristályokra kiépített rugalmassági elméletét, amely mindmáig az elméleti kutatások alapját képezte. A szimpózium után már mindenki érezte, hogy a folyadékkristályok tanulmányozása elvezet a biofizikai kérdésekhez.

1958-ban Amerikában a Westinghous Kutató Laboratóriumban Fergason, a kenti Állami Egyetemen Glenn Brown, az RCA Laboratóriumban Heilmeier vezetésével indultak meg a kutatások. Fergason 1964-ben már a folyadékkristályok érdekes gyakorlati alkalmazására (optika, hőmérséklet-térképek, gőzök kimutatása stb.) hívja fel a figyelmet. Amikor azután 1968-ban Heilmeier [He 68] a folyadékkristályok újszerű szerepére mutat rá a kiíró vagy megjelenítő technikában (display devices), a kutatások e téren még soha nem látott intenzitással indultak be. Megnyíltak az iprvállalatok pénztárcái. Ma már nehéz lenne olyan fizikai kutatóintézetet találni, ahol ezekkel a kérdésekkel ne foglalkoznának. Kentben kutatásukra külön intézetet szerveztek.

A Szovjetunióban a folyadékkristály kutatásokat felfedezésük óta figyelemmel kísérték, és az Ivanovoi Orvosegyetem kutatócsoportja már 1962-ben a folyadékkristályok biológiai és gyógyászati szerepéről könyvet jelentetett meg, amelyet 1966-ban a folyadékkristályok egyéb sajátságait leíró könyv követett. Szervezett kutatások folynak a Szovjetunió Tudományos Akadémiájának Krisz-

tallográfiai Intézetében, a Szerves féltermékek és Festékek Kutatóintézetében és Leningrádban az Állami Egyetemen.

Az angliai Hull Egyetemen már kezdettől fogva egy tudós csoport foglalkozik a folyadékkristályokkal, és 1962-ben G. W. Gray [Gr 62] könyvet jelentetett meg a témáról. Franciaországban Orsay-ban szerveztek laboratóriumot. Az elméleti kutatások de Gennes irányításával indultak be. Ma már itt Európa egyik legjelentősebb folyadék kristályokkal foglalkozó kutatóintézete működik.

Kiterjedt kutatások folynak az NSZK számos és Japán legkülönbözőbb tudományos és ipari kutatóintézetében. Nagy tradíciója van a folyadékkristály kutatásoknak az NDK-ban, Halléban és Lipcsében.

Hazánkban is felfigyeltek ezekre a kutatásokra. Az első összefoglaló monográfia 1972-ben a KFKI gondozásában jelent meg [Ba 72]. A kutatások támogatását az Országos Műszaki Fejlesztési Bizottság is felkarolta, és nem utolsósorban neki köszönhető, hogy ma már szervezett kutatások folynak.

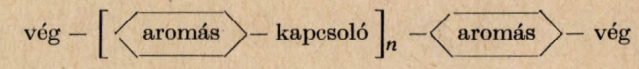
Két alapvető osztályt különböztetünk meg: termotróp és liotróp folyadékkristályokat. A termotrópok szilárdtestfizikai és gyakorlati szempontból (elektro-optikai kijelzők, hőmérséklet és nyomás érzékelők stb.), a liotrópok biológiailag és az élőrendszerekben játszott szerepüket illetően jelentősek.

A termotróp elnevezés onnan származik, hogy ezek az anyagok a hőmérséklet-változás hatására mennek át folyadékkristály állapotba. A molekula tengelyeik viszonya 4—8, a molekula súlyuk 200—500 gm/mól, és minden molekula egyenlő mértékben vesz részt a rendezettség kialakításában.

Nagy rúdalakú molekulák olyan oldószerekben, melyek különben izotróp folyadékok, megfelelő koncentrációjuk esetén anizotróp oldatot képeznek és az előbbi folyadékkristályokhoz hasonló szerkezetet és sajátságokat mutatnak. Ezek a molekulák, vagy azokból összeálló képződmények általában nagyobbak a termotróp anyagok molekuláinál, a molekulatengelyeik viszonya ~15. Ilyen a DNS, dohány mozaik vírus, sok polipeptid, amikor oldószerben (többnyire vízben) megfelelő koncentrációjú oldatot képeznek. Ezekből az anyagokból képződő szimmetrikus szerkezetek stabilitása elsősorban a koncentrációjuktól függ.

I. Termotróp folyadékkristályok molekuláris szerkezete

Jelenleg még nem tudjuk előre megmondani, hogy egy molekula folyadékkristályos anyagot képez-e, de három-négy szerkezeti sajátosság eddig mindenképpen szükségesnek bizonyult: legyenek hosszúkásak, legyen merev törzsük, lényeges továbbá a permanens dipólmomentumok elhelyezkedése és mozgásának módja. Sematikusan egy nagy csoport jellemezhető a következő szerkezettel:

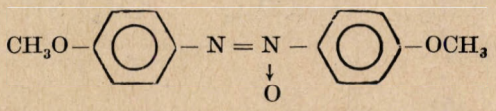


$n = 0, 1, 2$

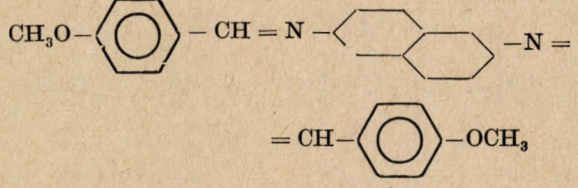
A kapcsoló csoportban többszörös kötések vannak. Erre a szerkezet típusra legyenek példák: *p*-pentil-*p*'-cianobifenil (PCB)



p-azoxy-anizol (PAA)

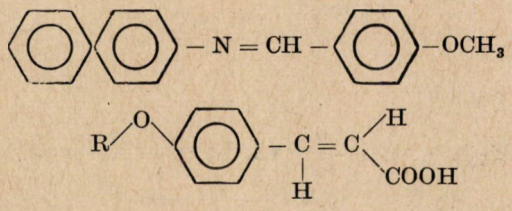


2,6-di-(*p*-metoxi-benzilidénamino)-naftalén

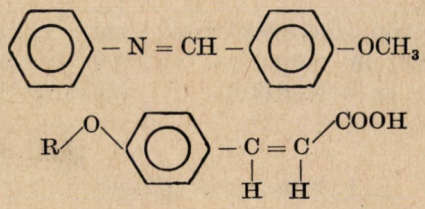


Négy hasonló molekulát annak illusztrálására mutatunk be, hogy milyen kis különbségek elégségesek a mezomorf sajátság megszűnéséhez:

Mezomorf



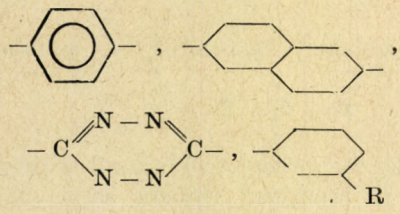
Nem mezomorf



A permanens dipólmomentum elhelyezkedése és a polarizálhatóság dönt ezeknél az anyagoknál. Ennek ellenére táblázatba foglalhatók azok a molekuláris egységek, melyekből a folyadékkristályos anyagok felépülnek.

Termotróp folyadékkristályok a következő csoportokból épülnek fel:

a) Aromás csoportok:



Br, I, NO_2, CN

R=CH_3, F, Cl,

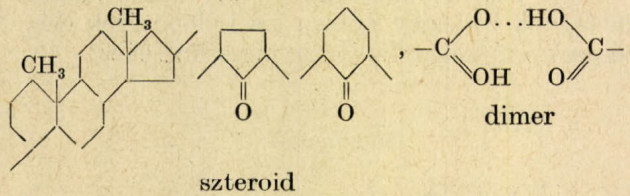
b) Kapcsoló részek:

$-(CH_2)_n-$, $-O-(CH_2)_n-$, $-CH_2-NH-$, $-CH=N-$

$-N=\overset{\nearrow O}{N}-$, $-N=N-$, $-CH=CH-$, $-Hg-$, $-CH=N-$,

$-S-(CH_2)_n-$, $-\overset{O}{\overset{\|}{C}}-C-$, $-C-O-$ (‖ O), $-C\equiv C-$

c) Ciklikus csoportok:



szteroid

dimer

d) Végek:

$CH_3(CH_2)_n-$, RO−, F, Cl, Br, I−, NC−, O_2N-, H_2N-, Me_2N-, RCOO−, R−O−C−, $CH_3-O-(CH_2)_n-O-$

R = alkil vagy aromás csoport vagy Li, Na, K Rb, Cs, Tk

A termotróp folyadékkristályokat G. Friedel [Fr 22] három csoportra osztotta: szmektikus, nematikus és koleszterikus folyadékkristályokra.

1. Szmektikus állapot

Szmektikus folyadékkristályokban a hosszú, rúdalakú molekulák tömegközéppontja egymástól egyenlő távolságra levő síkokban helyezkednek el. A molekulák tengelyei valamilyen szöget zárnak be ezekkel a síkokkal, de egy rétegen belül azonos irányba mutatnak. A síkok vastagsága a molekulák hosszával egyezik meg. Az egy síkban levő molekulák ugyan egy irányba mutatnak, de egymástól való távolságuk, tömegközéppontjuk lehet rendezetlen (mint gyufaszálak a dobozban), vagy rendezett (mint a tekebabák). Utóbbi esetben az egy síkhoz tartozó molekulák sorban rendezettek. Ezek a síkok a könyv lapjaihoz hasonlóan rétegekben fekszenek egymáson. A szmektikus folyadékkristályokban a molekulák elhelyezkedését az *1. ábrákon* mutatjuk be. A molekulák elhelyezkedését illetően több szerkezetet különböztetünk meg.

a) Szmektikus—A szerkezet

A molekulák a síkokra merőlegesek, de tömegközéppontjuk rendezetlen. A rétegvastagság a molekulák hosszával egyezik meg (röntgen-diffrakció). Optikailag egytengelyű.

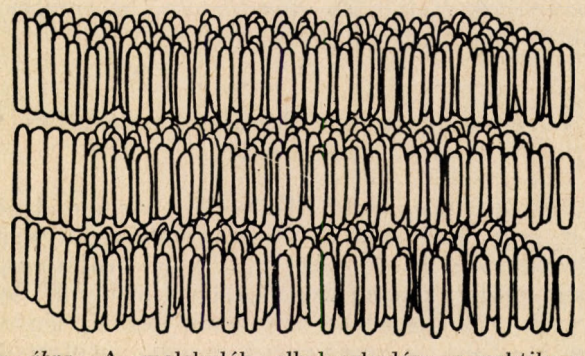
b) Szmektikus — B-rend

A molekulák a rétegre merőlegesek és tömegközéppontjuk rendezett. A plasztik kristályhoz hasonló elrendeződés. Mechanikai tulajdonságai ezeknek az anyagoknak különbözik a háromdimenziós kristályszerkezettel rendelkező szilárd anyagokétól. A kétdimenziós szerkezetű rétegek könnyen elcsúszhatnak egymáson.

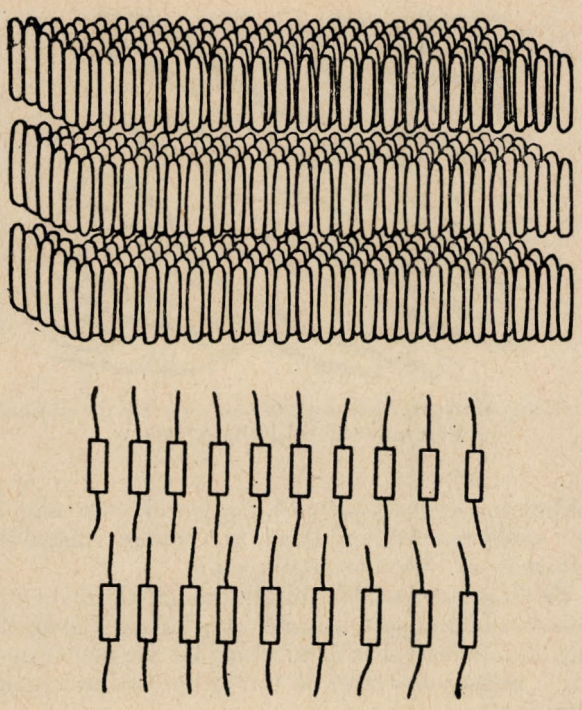
A szilárd—szmektikus—B fázisátmenet során nagy átmenetihőt észlelünk. De Gennes [Ge 72] szerint ekkor csak a molekulák végein levő gyökök lesznek rendezetlenek, a molekulák törzse tovább is háromdimenzióban rendezett marad. Ezeket az elképzeléseket sematikusan az 1b. és c. ábrákon mutatjuk be.

A b. ábrán a molekulák kétdimenzióban rendezettek, a c. ábrán a végcsoportok rendezetlenek, a tömegközéppontok háromdimenzióban rendezett. Mindkét modellel értelmezhetjük a rétegen belül uralkodó erős és a rétegek között fellépő gyenge kötéseket. De Gennes szerint a szmektikus—B szerkezet rotációs rendezetlenséggel rendelkező háromdimenziós kristály. Ezt közel gömbalakú molekulákból felépülő kristályoknál, plasztikkristályoknál sikerült kísérletileg is bizonyítani, rúdalakú molekuláknál azonban még bizonyításra szorul.

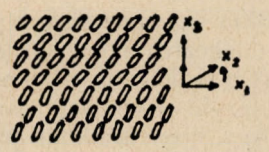
A pivalonitril $(CH_3)_3CCN$ plasztikkristály tulajdonságot mutatja. A molekula rotációs gátja



1a. ábra. A molekulák elhelyezkedése szmektikus-A anyagokban



1b. 1c. ábra. A molekulák rendezett elhelyezkedése szmektikus—B szerkezetben.



1d. ábra. Molekulák elhelyezkedése szmektikus-C szer kezetben

kicsiny a rácsenergiához képest. A hőmérséklet emelésével a molekulák termikus energiája elégséges lesz ahhoz, hogy a rotációs energiagátat átlépjék, de nem elégséges a kristályrács széttöréséhez. A kristályrács csak magasabb hőmérsékleten esik szét, amikor az anyag izotróp folyadékká olvad meg. Érdekes sajátságuk ezeknek az anyagoknak, hogy könnyen deformálhatók, lágyak, „plasztikusak".

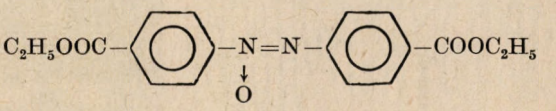
c) Szmektikus—C-szerkezet

Látjuk, hogy szmektikus anyagokban a rendszer transzlációs szimmetriája legalább egy dimenzióban elromlik. A rendszert általában egy dimenziós transzlációs rend jellemzi. Számos esetben a molekulák nem merőlegesek az őket elválasztó síkokra, hanem valamilyen szöget zárnak be vele. Ezeket a szerkezeteket az *1d. ábrán* mutatjuk be és szmektikus-C-nek hívjuk. A röntgendiffrakciós mérések egyértelműen mutatják, hogy a rétegek vastagsága kisebb a molekulák hosszánál, amit a molekulák elhajlásával magyarázunk. Ez a rendszer optikailag kéttengelyű. További szmektikus szerkezeteket (D, E, F, G, H) is sikerült megfigyelni, de szerkezetük még nem tisztázottak eléggé. Azt mondhatjuk, hogy szmektikus állapotban a hőmérséklet elég magas ahhoz, hogy a síkok között levő kötéseket szétszaggassa, de nem elégséges a síkok széttépéséhez. Bizonyos esetekben a síkon belüli kötések is szétszakadnak, és a sík, mint kétdimenziós folyadék viselkedik. A síkok egyébként is könnyen elcsúszhatnak egymáson.

A molekulák a térben rugalmas rétegeket képeznek, és meghajlítás után a rétegek rugalmasan visszaugranak.

A szmektikus elnevezés a görög $\sigma\mu\eta\gamma\mu\alpha$ = szappan szóból származik. Közönséges példa a szmektikus folyadékkristályokra a szappanbuborék. A szappanbuborék belső és külső hártyáját szmektikus folyadékkristály alkotja. A buborék növekedésével intersticiális szappanmolekulák épülnek be a hártyába. A buborék belsejében még vízgőz találhtó.

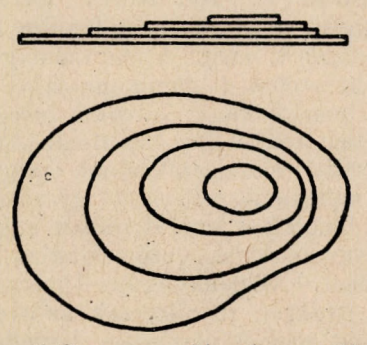
A szmektikus folyadékkristályok jellegzetes képviselője az etil-para-azoxy-benzolát.



A para-azoxy-benzolsav szilárd kristályai 114 °C-on olvadnak meg szmektikus folyadékkristállyá (fk), és 120 °C-on izotróp folyadékká (if). Hűtés során 120 °C-on jelennek meg a pálca formájú folyadékkristály-csírák, majd ezek a csírák összeragadnak, és ún. konfokális textúrát képeznek.

Ezek polarizációs mikroszkópban keresztezett nikolokkal jól láthatók. (Izotróp fázisban a mikroszkóp látómezeje keresztezett nikolokkal sötét.)

Érdekes sajátossága a szfk-nak a lépcsős cseppek képződése. Ha kevés szmektikus állapotot mutató anyagot tiszta sima felületre (csillámlemezre) cseppentünk, a *2. ábrán* látható lépcsős csepp képződik. A lépcsős alakzat a szmektikus fázis réteges szerkezetének következménye. A lépcsők vastagsága az egyedi molekularétegek vastagságának egészszámú többszöröse. A cseppek felületének mechanikai rezgése során megfigyelhető, hogy a rétegek szinte szabadon csúszkálnak egymáson. A rétegek mozgása a szilárd fázis olvadá-



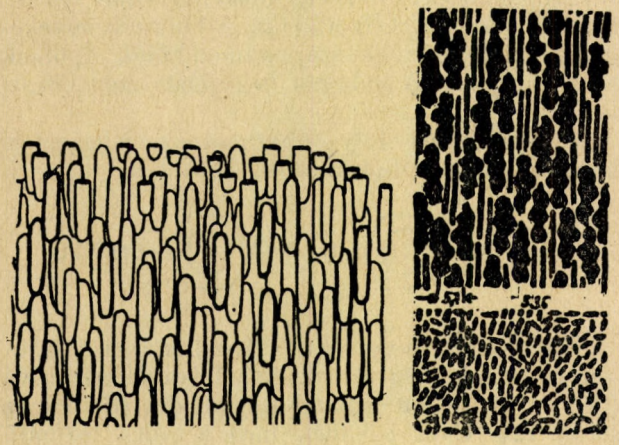
2. ábra. A szmektikus anyag lépcsős cseppjének sematikus rajza

sának pillanatában is megfigyelhető — szétfutnak a felületen.

A szmektikus anyag rendezett tartományai egy tengelyű kristálylemezekkel analóg módon viselkednek a fénysugarakkal szemben. Törésmutatójuk előjele pozitív.

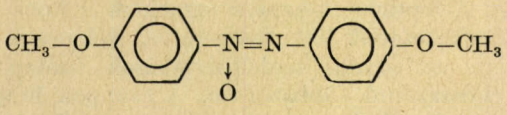
2. *Nematikus állapot*

A nematikus folyadékkristályok nem rendezettek olyan magas fokon, mint a szmektikusok. Bár a molekulák nematikus fázisban is hossztengelyükkel párhuzamosan helyezkednek el, de nem rendeződnek síkokban. A molekulák elrendeződését szemléletesen a *3. ábrán* mutatjuk be.



3. ábra. A molekulák elhelyezkedése nematikus anyag ban

Láthatjuk, hogy a pálca alakú molekulák tömegközéppontjai rendezetlenek, csak a molekulák hossztengelye rendeződik egy meghatározott irányba. A legismertebb nematikus állapotot mutató anyag a para-azoxy-anizol:



116 °C-tól 136 °C-ig van folyadékkristály-állaposban.

A nematikus elnevezés a görög $\nu\eta\mu\alpha$ = fonal szóból származik. Nematikus folyadékkristályokban ugyanis természetes fonalas képződmények figyelhetők meg. A para-azoxy-anizol fonalas szerkezetét a *4. ábrán* mutatjuk be.

Ezek a fonalak vagy szabadon lebegnek, vagy az anyag tartófelületéhez tapadnak. A fonalak az anyag optikai homogenitásának megszakadását jelzik. A molekulák iránya itt gyorsan változik.

Ezek a fonalak a kristályokban megfigyelhető diszlokációk analógiái, ezért diszinklinációknak is hívják őket. Üveglemezek közé helyezett anyagmintában gyakran merőlegesek az üveglapra, és sötét foltok, magok alakjában figyelhetők meg. Polarizációs mikroszkóppal, keresztezett nikolokkal az is megállapítható, hogy ezekből a magokból sötét fonalak indulnak ki. Felületi diszinklinációkat is sikerült megfigyelni.



4. ábra. A nematikus anyagokban polarizációs mikroszkóp segítségével látható fonalak

Teljesen orientált, diszinklinációktól mentes nematikus anyagot a tartó üveglemezek speciális megmunkálásával is előállíthatjuk. De elektromos vagy mágneses térrel is rendezhetjük az anyagmintákat.

3. *Koleszterikus állapot*

A koleszterikus anyagokban a molekulák elrendeződése emlékeztet a szmektikus anyagokra, annyiban, hogy a molekulák síkokban, rétegekben helyezkednek el, de a nematikus anyagokra hasonlítanak abban, hogy a síkban levő molekuláknak csak az iránya rendezett, a tömegközéppontjuk rendezetlen. A szomszédos síkokban a molekulák iránya sem egyezik meg, azok egymáshoz képest kissé elfordultak. Az elfordulás végül teljes periódust képez. Ezt az elrendeződést mutatjuk be az *5. ábrán.*

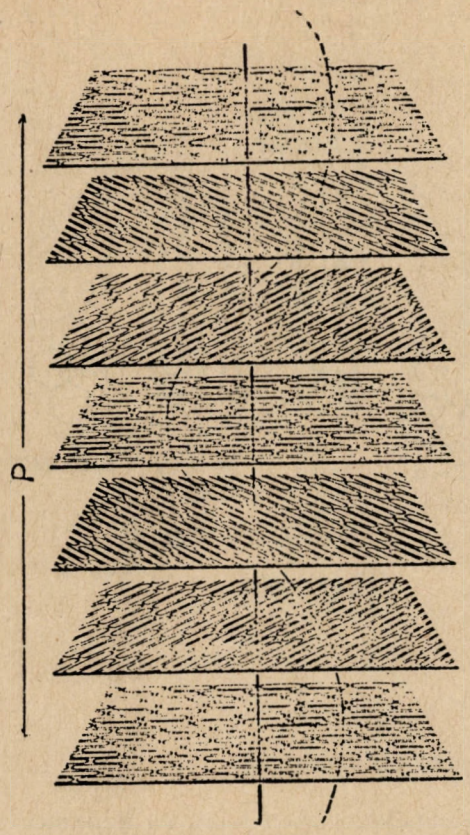
A molekulák ζ és η főtengelyeinek elfordulását x, y derékszögű koordinátarendszerben

$$\zeta = X \cos \frac{2\pi z}{p} + Y \sin \frac{2\pi z}{p},$$

$$\eta = Y \cos \frac{2\pi z}{p} - X \sin \frac{2\pi z}{p}$$

egyenletekkel írhatjuk le, ahol P a spirálperiódus hossza, P határozza meg az anyag réteges szerkezetét. Ebből következik az, hogy amíg szmektikus állapotban a réteg vastagsága egy molekulahossz (20—40 Å), koleszterikus állapotban $\sim$ 2000 Å.

A nematikus anyagok a koleszterikusok határesete, amikor a spirál hossza végtelen ($P = \infty$). Amikor a molekulák a tükör-képükre fektethetők (optikailag inaktívak) nematikus, ha nem fektethetők (optikailag aktívak) koleszterikus szerkezetvalósul meg. (Ha azonos mennyiségben együtt vannak jelen, a tükörkép molekulák ismét nematikusok lesznek.)



5. ábra. A molekulák elhelyezkedése koleszterikus anyagmintában. A síkokban nematikus szerkezet figyelhető meg

A molekulák egymáshoz viszonyított elfordulását a szomszédos síkokban könnyen megérthetjük, ha szemügyre vesszük a koleszteril molekula-csoport térbeli elrendeződését:

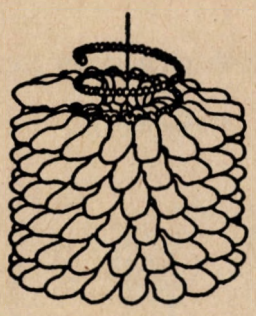
Koleszteril-csoport

A molekulatörzs síkot képez, de a bekeretezett gyökök kiemelkednek a síkból (fel- vagy lefelé). Így a következő rétegben a sűrű elrendeződés céljából a molekulák kénytelenek elfordulni (~15').

A koleszterikus elnevezés onnan származik, hogy ezt az állapotot kezdetben a koleszteril-származékoknál sikerült csak megfigyelni. Jól ismert koleszterikus anyag a koleszteril cinamát; ahol R=C_8H_{17} és 156—197 °C hőmérséklet-tartományban mutat koleszterikus folyadékkristály-állapotot.

II. Liotróp folyadékkristályok

Mint a bevezetőben már említettük azokat az anyagokat, melyek oldatok formájában mutatják a folyadékkristály szerkezeteket liotróp folyadékkristályoknak mondjuk. Ilyen a szappanok vizes oldata, a dohány mozaik vírus, lipidek vizes oldatai stb. A dohány mozaik vírus szerkezete a *6. ábrán* látható.



6. ábra. A dohánymozaik-vírus szerkezete

Legismertebb liotróp anyag a káliumoleát. A káliumoleát vizes-alkoholos oldata a kereskedelemben folyékony káliumszappan néven kapható. Ha ilyen anyagot helyezünk a mikroszkóp üveglemezei közé, akkor már néhány óra leforgása után megfigyelhetjük a szmektikus folyadékkristályok képződését, fázis diagramját a 7. ábrán mutatjuk be.

A T_i vonal felett kis szappankoncentrációnál és magas hőmérsékleten az oldat izotróp, polarizációs mikroszkópban átlátszó. A T_a vonal alatt alacsony hőmérsékleten és magas szappan-(általánosabban lipid-)koncentráció (c) mellett gélek találhatók. Ebben a fázisban a paraffinláncok rendezetten vagy részben rendezetten helyezkednek el. A T_i és a T_d vonalak között a folyadékkristály-állapotra jellemző (fény-kettőstörés stb.) sajátságok figyelhetők meg.

A legfontosabb liotróp rendszerek a lipid—víz rendszerek, amelyek a biológiai ultrastuktúrák elemei.

A lipid molekulák fontos sajátossága, hogy hidrofil-vizet szerető, vízhez kapcsolódó és hidrofól-víztől írtózó részekből épül fel. Fontosabb lipideket az I. táblázatban adjuk meg. A molekulák hidrofilrésze vízben oldódik, szénhidrogénekben nem oldódnak. A lipofil rész vízben oldhatatlan, szénhidrogénben oldódik.

Tipikusan hidrofil részek:

$-OH$, $-CO_2H$, $-CO_2Na$, $-SO_3K$, $-NMe_3Br$, $-PO_4-CH_2$, $-CH_2\ -NH_3^+$

Tipikusan lipofil részek:

$$-C_nH_{2n+1},\ C_nH_{2n+1}-\langle\bigcirc\rangle-,$$

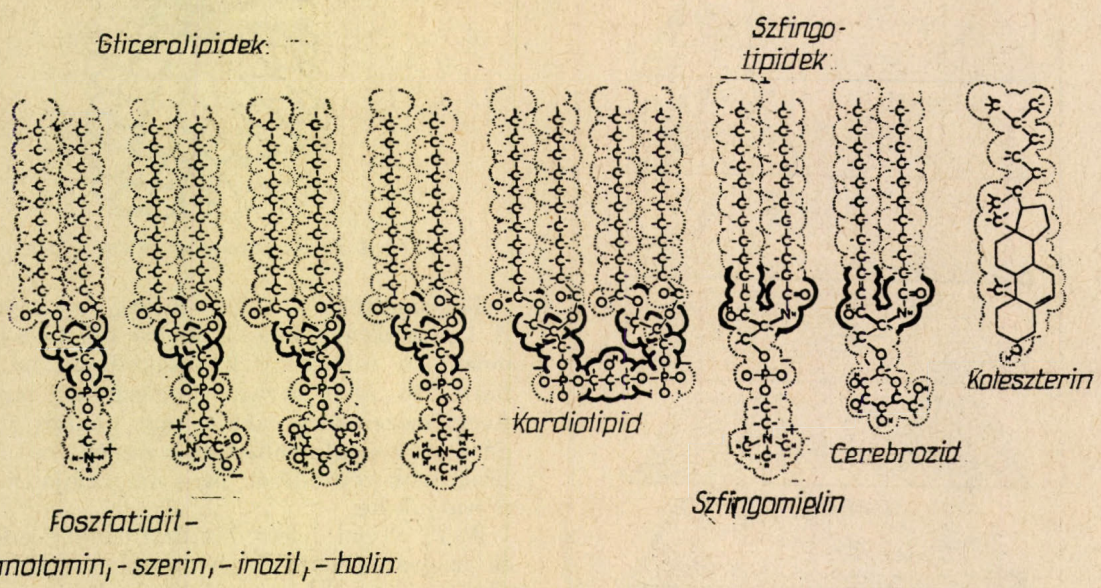
$$C_nH_{2n+1}-O_2C-\underset{|}{CH}-CH_2CO_2-C_nH_{2n+1}$$

Sematikusan a továbbiakban ezeket a molekulákat ⚲ vagy ⚲ jellel jelöljük. A kis gömb a hidrofil, a cikkcakkos szál a szénhidrogénláncot vagy lipofil részt jelzi.

Ilyen molekulákból felépülő rendszerek stabilitását kétfajta kölcsönhatás határozza meg: elektrosztatikus és diszperziós kölcsönhatás. Az elektrosztatikus kölcsönhatás (hidrofil rész) az ionos töltésektől és a dipóloktól származik. A kölcsönhatás az ion-dipól, ion-ion, dipól-dipól álta-

1. táblázat

A fontosabb lipidek szerkezeti képletei:

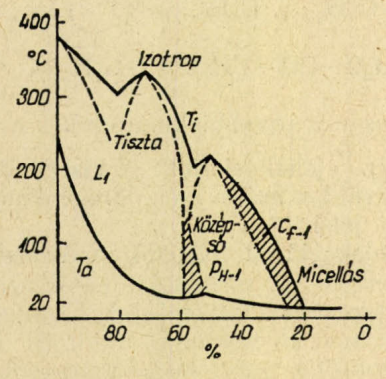


lában vonzó, a hőmozgás az ellen dolgozik. A diszperziós kölcsönhatás a ~~ láncok rendezett elhelyezkedésében játszik nagy szerepet.

A lipidek az élőanyag sejtjeinek alapvető szerkezeti elemei. Az élőanyag sejtjének öt sejtszervecskéjében találhatók meg. Ezek a sejtfal, az endoplazmás retikulum, a Golgi-test, a mitokondrium és a sejtmag.

Az állati sejtekben általában három lipid található meg: a foszfolipid, a glikolipid és a koleszterol. A növényi sejtmembránban a glikolipid, glicerol-lipid, az állatiban szfingolipid.

Biológiai rendszerekben a lipid molekulák majdnem mindig kevert lipid fázist képeznek. Gyakran más típusú molekulákhoz, fehérjékhez stb. kapcsolódnak. Ezekben a rendszerekben mindig található víz is, amely nagy hatással van a lipidek fehérjékkel vagy más molekulákkal való kölcsönhatásának jellegére és fokára. A lipidek szerepének megértéséhez biológiai ultraszerkezetekben fontos megvizsgálni viselkedésüket vizes közegben, és más molekulákkal való kapcsolatukat.



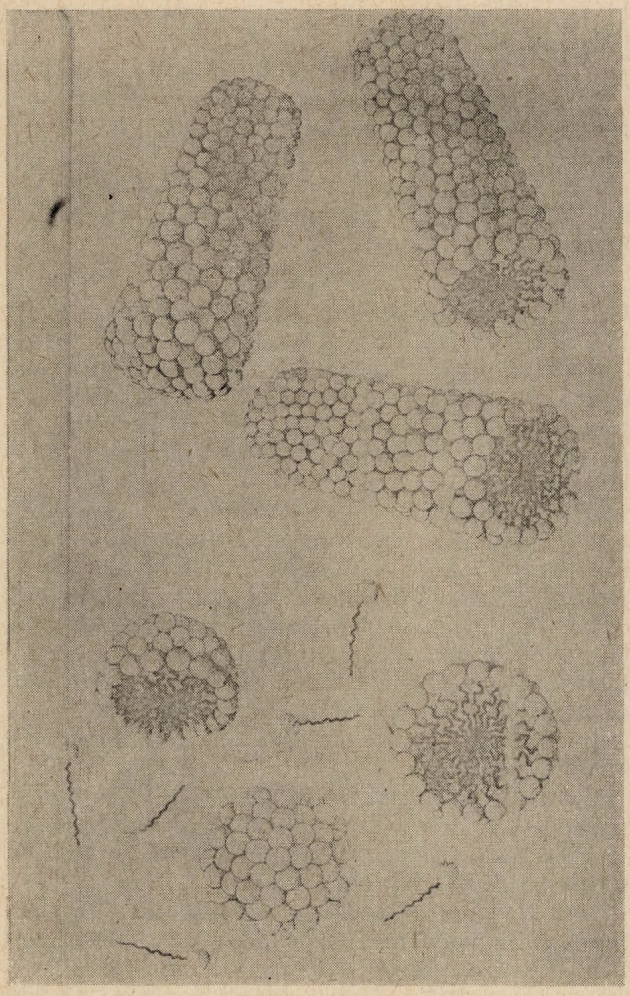
7. *ábra.* A $C_{16}K$- —víz fázisdiagramja

A) Lipid—víz rendszerek

Foszfolipidek vízben könnyen képeznek aggregátumokat, amelyekben a szénhidrogén lánc elszigetelődik a víztől. A szénhidrogén láncok és a vízmolekulák között viszonylag gyenge kölcsönhatás van. Ezért vagy bimolekuláris lipid rétegek alakulnak ki, vagy gömb vagy henger alakú aggregátumok jönnek létre, ahol az ionos csoportok a vizes fázis felé fordulnak. Ezeket a képződményeket micelláknak mondjuk, és a *8. ábrán* mutatjuk be őket.

Amikor ionos lipid (pl. foszfolipid) vízzel kerül kapcsolatba, a víz a lipid poláros rétege közé hatol, és a lipid fázisból kettős fénytöréssel rendelkező fonalak nyúlnak ki. Ezeket a fonalakat és környezetüket mielin figuráknak nevezik. Mindegyik fonal cca 10μm vastag átmérőjű és cca 100 bimolekuláris rétegből koncentrikusan feltekert és vizes alrétegekkel felosztott sávokból áll. A röntgenvizsgálatok azt mutatják, hogy a vékony lipid rétegek felpuffadása vízben a lipidek természetétől és a vizes fázis ionos összetételétől függ. Legjobban a nagy iontöltésű lipidek puffadnak fel kevésbé ionerős fázisban. Bizonyos esetekben a felpuffadás addig tart, amíg a vizes réteg vastagsága a lipidréteg vastagságát nem haladja meg. Ebben az esetben szabályos réteges szerkezet alakul ki. Diszpergálással ezt a folyamatot meggyorsíthatjuk, de ennek eredményeként a rétegek megsérülnek, és gömb alakú mielin cseppekké alakulnak át.

Röntgendiffrakciós vizsgálatok azt mutatják, hogy foszfolipid—víz általában ugyan lamelláris szerkezetű, de kisebb vízkoncentráció mellett hexagonális szerkezet is előfordul. Ezeket a szerkezeteket a következőkben összefoglaljuk.



8. ábra. Gömb és rúd alakú micellák sematikusan

1. Lamelláris csoport

a) L_1 szerkezet

A molekulák koherens kettősrétegben helyezkednek el. Az ionokat víz választja el egymástól. Tiszta szerkezetnek is hívjuk. A molekula párok ferdén helyezkednek el. Sematikus rajzuk a *9a. ábrán* látható

b) L_2 szerkezet

L_1-hez hasonló szerkezet egyszeres réteggel. (Termotróp szmektikus anyagok oldata pl. etil-*p*-azoxy-benzoát.)

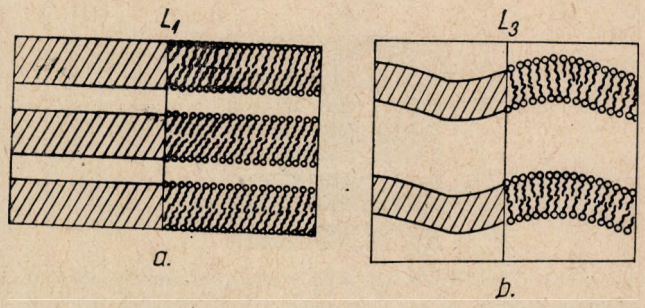
c) L_3 szerkezet

Réteges hullámos kettősréteg szerkezet sematikus rajza a *9b. ábrán.*

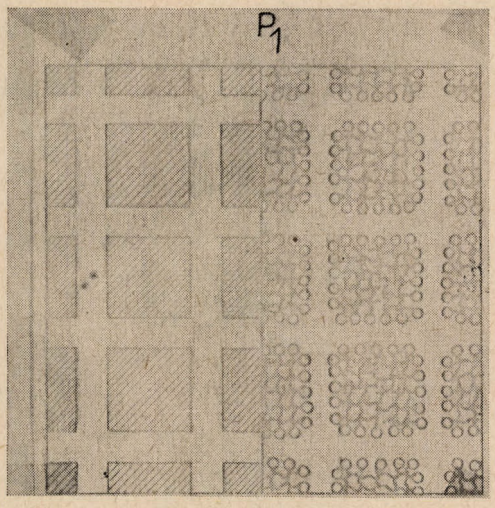
A röntgendiffrakciós vonalak távolságának aránya 1 : 1/2 : 1/3 lineáris szimmetriával.

2. Kétdimenziós derékszögű szerkezetek

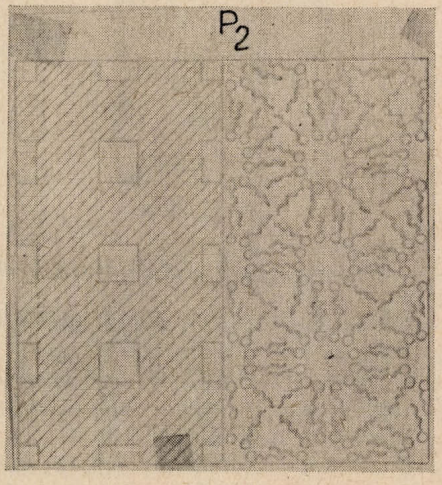
a) P_1. Normál kétdimenziós tetragonális szerzet; *10a. ábra b)* P_1. Kétdimenziós tetragonalis forditott szerkezet. *10b. ábra c)* P_3. Normál kétdimenziós derékszögű szerkezet *10c. ábra.* A röntgendiffrakciós vonalak távolságaránya ennél a szerkezet típusnál 1 : 1/2 : 1/3 : 1/4.



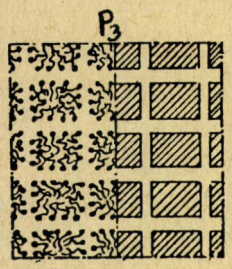
9. ábra



10a. ábra. Lipidekből felépülő hasábok rendezetten helyezkednek el vízben. A lipidrudak négyzetes keresztmetszetűek, melyek vizes környezetben tetragonálisan helyezkednek el



10b. ábra. Négyzetes keresztmetszetű vízoszlopok tetragonálisan helyezkednek el szerves (lipid) közegben



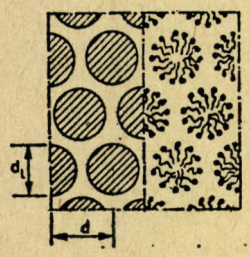
10c. ábra. Lipidekből felépülő téglalap keresztmetszetű hasábok vízben ortorombos szerkezetben helyezkednek el

3. Kétdimenziós hexagonális elrendezés

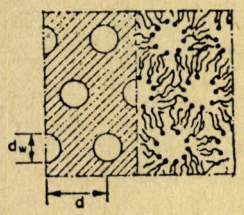
a, P_{H-1}. Hengeres lipid hasábok vizes közegben, melynek metszete síkban kétdimenziós hexagonális.

b, P_{H-2}. Fordított kétdimenziós hexagonális típus. Hengeralakú vízoszlopok lipid környezetben. Metszetük hexagonális.

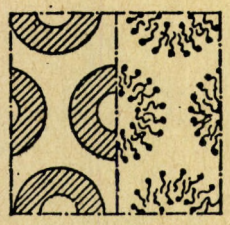
c, P_{H-3}. Komplex kétdimenziós hexagonális. A lipidek csöves szerkezetet alkotnak, melynek belsejében is víz van. Rajza a *11c. ábrán* látható.



11a. ábra.



11b. ábra



11c → 12 ábra

3. Köbös szimmetriájú liotróp folyadékkristályok

Ezek izotróp liotróp folyadékkristályok.

a) C_{f-1}. Normál lapcentrált köbös típus. Liotróp szerves molekulákból álló gömbök lapcentrált köbös szerkezetben helyezkednek el.

b) C_{f-2}. Fordított lapcentrált köbös. Vízmolekulákból gömbök képződnek, ezek lipid környezetben lapcentrált köbös szerkezetben helyezkednek el.

c) C_{f-3}. Komplex szerkezetű egységek lapcentrált köbös szerkezetben.

d) C_{b-1}. Normál tércentrált köbös szerkezet. Lipidekből álló gömbök nedves környezetben tércentrált köbös szerkezetet alkotnak.

e) C_{b-2}. Komplex tércentrált köbös. Komplex szerkezetű (belül víz, lipid kettősréteg-héj) gömbök tércentrált köbös szerkezetet képez.

II.B. Liotróp szerkezetek előfordulása

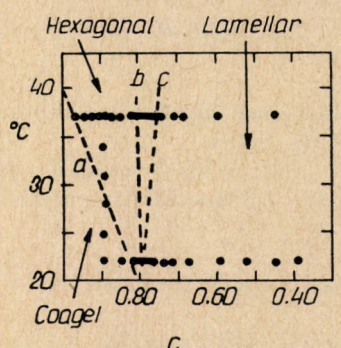
Vannak olyan vélemények, melyek szerint az emberi agy az egyik legérdekesebb folyadékkristály szerkezet. A földi élet kialakulása során a plazma első csomócskái is folyadékkristály szerkezetűek voltak.

Az emberi agy éteres kivonatának fázisdiagramját Luzzati [Lu 62] röntgendiffrakciós mérései alapján a *13. ábrán* mutatjuk be. (A kivonat 52% foszfatidyl-etanol-aminból, és 13% foszfatidyl inozitból állt.) A fázisdiagram a hőmérséklet és a (*c*) koncentráció függvényében mutatja a megfelelő fázisokat. Az *a* vonal alatt éles csúcsokat észleltek. A 4,2 Å távolságnak megfelelő éles csúcsok utaltak a szénhidrogén láncok rendezett állapotára.

Az *a* és *b* vonalak között elhelyezkedő tartomány a *11b. ábrán* bemutatott P_{H-2} hexagonális szerkezetet mutatja. A *c* vonaltól jobbra lamelláris szerkezet lépett fel.

Igen fontos a koleszterin-foszfolipid kölcsönhatás a biológiai membránokban, a mielin rétegben, a vörösvérsejt-membránban. A koleszterol igen gyengén ionos és a molekulája sokkal kisebb a foszfolipid molekulánál. A lipid kettős rétegben a koleszterin a szénhidrogén lánc közepe felé helyezkedik el, és nem hatol be az ionos részbe. Következésképpen a lipid végén levő ionos csoport szabadabban helyezkedik el, a szénhidrogén rész pedig elég tömött.

Lipid—fehérje kölcsönhatást különböző feltételek mellett tanulmányozták: vízben oldott fehérje, egy és kétrétegű lipidek, diszpergált aggregátumok stb. formájában. Ezek alapján állapították meg, hogy a fehérjék megváltoztatják a vízben oldott és annak felületén elhelyezkedő



13. ábra. Az agyvelő lipid—víz rendszerének fázisdiagramja. A pontok a mért állapotokat mutatják

lipid rétegek felületi feszültségét, a foszfolipid poláros végével határos fehérjék monomolekuláris réteget alkotnak, egyes fehérjék megváltoztatják a lipid kettősréteg fizikai sajátságait — lecsökkentik fajlagos ellenállását.

A biológiai lipo-proteidek szerkezetének vizsgálatát az nehezíti meg, hogy a fehérje-lipid komplexek labilisak, és ezért nehéz őket előállítani.

Két lipo-proteid szerkezetet tudunk megkülönböztetni:

— lipo-proteid plazmákat, melyek a vér és a szövetfolyadék vizes fázisában diszpergálva találhatók, és

— lamelláris lipo-proteideket, amelyek a sejtmembrán, az idegszál mielin rétege, a recehártya és a csapok jellegzetes struktúráját képezik.

A lamelláris lipo-proteidekkel részletesen foglalkozunk.

Biológiai membránok

Életciklusa során a sejt igyekszik megőrizni szerkezetét és fenntartani anyagcseréjét. Ehhez megfelelő burokra van szükség. Ez a burok a plazma membrán. A membrán fedi a sejtet és őrzi alakját. Az elektronmikroszkóp segítségével végzett vizsgálatok derítettek fény arra, hogy a membrán nem egy közönséges, de különleges mechanikai funkciókat ellátó burok, hanem sajátos szerkezettel rendelkező réteg, sőt a sejt citoplazmája is tartalmaz különböző típusú membránokat, amelyek igen fontos szerepet játszanak a sejten belüli életfolyamatokban. A sejtet különböző részekre osztják. Ezek között a részek között sajátos anyagcsere-folyamatok mennek végbe. A citoplazma lényegében membrános képződményekből áll. A membránok „válogató áteresztőképességgel" rendelkeznek. Ezek a „válogató áteresztőképességükkel" szabályozzák bizonyos anyagok behatolását, cseréjét a sejt egészében vagy annak egyes sejtszervecskéiben. A membránok nemcsak körülhatárolják a sejten belüli kémiai reakciók többségét, hanem szervezik és irányítják is azokat.

A sejtmembránok egyébként lehetnek mitokondrális, mag-, citoplazma- és más sejten belüli szervecskékből eredőek. A különböző eredetű membránok ugyan nem azonos felépítésűek, de az organizációjuk alapelve azonos.

A biológiai kémia fejlődése, az elektrofiziológiai és elektronmikroszkópos módszerek lehetővé tették a membránok kémiai szerkezetének megállapítását. Réteges szerkezettel rendelkeznek. Vastagságuk 70—150 Å. Kémiai analízisek azt mutatták, hogy 1,7 : 1,0 arányban fehérjéket és lipideket tartalmaznak. A lipid és a fehérje molekulák elhelyezkedése mindig állandó, — azonos terv alapján épülnek fel.

A lipid molekulák úgy helyezkednek el, hogy poláros végük kifelé mutat. Ez teszi lehetővé, hogy kifelé, más anyagok molekuláira aktívan reagáljanak. A fehérje molekulák kölcsönzik a szilárdságot nekik. „Válogató áteresztőképességük"-ért közösen felelősek. Áteresztőképességük segítségével képesek irányítva változtatni fizikokémiai állapotukat.

Ezek alapján is érthető már, hogy a sejtmagmembránok kutatása miért biokémikusok, fizikusok és fiziológusok kutatásainak a találkozási pontja, amikor az élő sejtekben az áteresztőképesség és az energiafelhalmozás mechanizmusát igyekeznek megérteni. Bár igen nagy mennyiségű publikáció foglalkozik leválasztásukkal és egyéb velük kapcsolatos kérdésekkel, de még a molekuláris felépítésük pontos ismeretében sem lehetünk bizonyosak. Megismerésükhöz modellmembránok előállításával próbálnak eljutni.

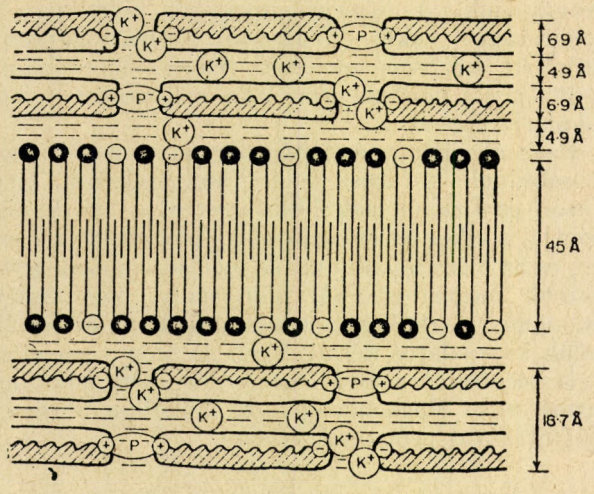
Membránmodellek

A membránok szerkezeti felépítésére több modellt alkottak. Sokáig helyesnek hitték Danielli—Davson 1935-ben megalkotott, illetve Robertson által 1960-ban módosított modelljét. Eszerint a membrán két monomolekuláris lipid rétegből és ezekhez kapcsolódó fehérjékből áll.

A lipidek hidrofób végeikkel érintkeznek egymással, és a fehérjék vannak a lipidek felületén. A sematikus rajz a *19. ábrán látható* (l. később). A transzportfolyamatok értelmezésére Hechter [He 65] módosította a membránról alkotott elképzeléseinket. Ezt mutatjuk be a *14. ábrán.* Hechter szerint a lipid kettősréteg körül elhelyezkedő fehérjék két párhuzamos rétegből állanak. A fehérjerétegeket hexagonálisan elrendeződött korongok alkotják. A fehérjék felülete hidrofil tulajdonságokat mutat. A fehérjék között víz (jég szerkezettel)-csatornák találhatók, amelyek a kationok diffúzióját a *14. ábrán* látható módon segítik elő. A vízmolekulák membránon (lipidrétegen) keresztül történő diffúzióját azonban ez a modell nem írja le megfelelően. Ezért újabb modelljében a lipidek szénhidrogén láncait flexibilisnek képzeli el.

Sok vizsgálatot végeztek eddig mitokondrium membránon. Mitokondriumok a növényi és állati sejtekben egyaránt előforduló, fénymikroszkóppal is látható sejtszervecskék. Számuk sejttípusonként változik. A patkány májsejtjében mintegy 2500 található. Alakjuk változó, többnyire tojásdad, gömbszerű vagy pálcaformájú. Mérete néhány mikron, vastagsága 0,5—0,8 μ. Biokémiai vizsgálatok szerint lipideket és enzimeket tartalmaznak. A szövetlélegzés több enzimje koncentrálódik bennük. A sejt fő energiatermelője.

A velő bár bonyolult szerkezeti felépítésű, eredetét illetően folyadékkristályos. A velő szürke állománya cerebroidokból, foszfátokból, gliceridekből áll, liotróp folyadékkristály. A folyadékkristályok dielektrikumok az idegrendszer vezető útjain. Az idegszálak közül a mielinréteg a jelenlegi élőlények bizonyos szövetei, a sima és a harántcsíkolt izmok rostjai folyadékkristályosak.



14. ábra. Hechter membránmodellje sematikusan

A központi és a környéki perifériális idegszálban az idegimpulzusok (potenciálhatás-hullámok) továbbításában egy réteg, a mielin réteg játszik fontos szerepet. Az impulzus nagysága, alakja és a vezetés sebessége a különböző típusú idegszálakban ugyan különböző, de a vezetés sebessége mindig arányos az idegszál átmérőjével és a mielin réteg vastagságával.

III. A folyadékkristály-szerkezetek fizikai leírása

1. A rendezettség jellemzése

A nematikus folyadékkristályok legfőbb jellemzője a hosszútávú orientációs rend, mely százezer molekulára vagy megfelelő határfeltételek mellett makroszkopikus méretekre terjed ki. Az orientációs rend paraméter definíciója

$$\eta = \left\langle \frac{3\cos^2\Theta - 1}{2} \right\rangle = \bar{P}_2(\cos\Theta),$$

ahol Θ a molekula hossztengelye és a (minta optikai tengelye vagy) rendszer által kiöntetett irány által bezárt szög. P_2 a Legendre polinom. A rendparaméter a hőmérséklet növekedésével csökken a nematikus-izotróp fázisátmenet hőmérsékletéig és ott hirtelen eltűnik.

A szmektikus-A anyagok optikailag egytengelyű szimmetriát mutatnak. Bennük is definiálható egy vektor, pontosabban direktor n, mely mentén a molekulák rendeződni igyekszenek. A röntgendiffrakciós vizsgálatok során tapasztalt éles gyűrűk az egydimenziós transzlációs periodicitást jelzik. A rétegek között ható kölcsönhatás rövid hatótávolságú és

$$e^{-(r_{12}/r_0)^2}\ P_2(\cos\Theta_{12})$$

arányosnak tekinthető. r_{12} a tömegközéppontok között levő távolságot, r_0 a molekulahosszt jelölik. Energetikailag a molekulák irányrendezett elhelyezkedése a legkedvezőbb, a rétegek „sűrűséghullámként" foghatók fel. Ezek a sűrűség hullámok

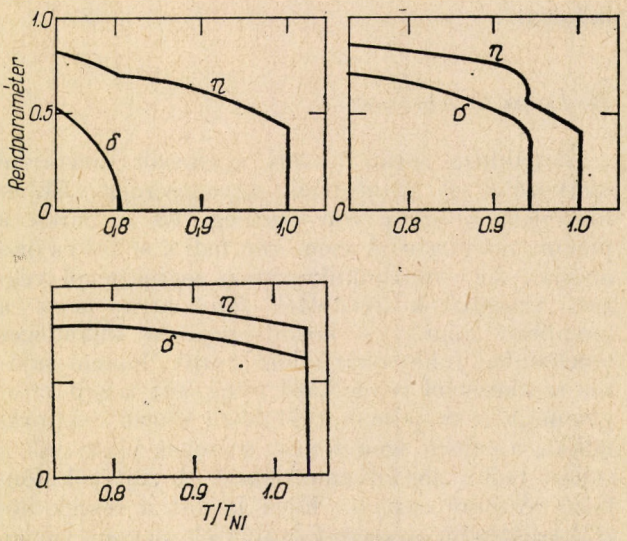
$$\sigma = \langle \cos(\bar{r}\bar{q})\, P_2(\cos\Theta) \rangle$$

és

$$\tau = \langle \cos(\bar{r}\bar{q}) \rangle$$

rendszerparaméterekkel jellemezhetők. $\bar{q} \parallel \vec{n}$ és $q = 2\pi/d$. d a rétegek között levő távolságot jelöli. Izotróp esetben $\sigma = \tau = 0$, $\eta = 0$ nematikus fázisban $\sigma = \tau = 0$, $\eta \neq 0$, szmektikus fázisban egyik sem nulla.

A rendparaméter hőmérséklet függését a redukált hőmérséklet függvényében a *15. ábrán* mutatjuk be. A molekula hossztól függően három különböző eset lehetséges. Lehetséges másodrendű, elsőrendű fázisátmenet, de az is előfordulhat, hogy a hőmérséklet emelésével az anyag szmektikus állapotból a nematikus állapot kihagyásával izotróp állapotba megy át.



15. ábra. A rendparaméter hőmérsékletfüggése különböző hosszúságú molekulák esetében

III.2. Folyadékkristályok fázisátmenetei

A folyadékkristályos állapotok felépítéséről legegyszerűbben kalorimetriás mérésekkel és polarizációs mikroszkópos felvételekkel szerezhetünk információkat. Példaként tekintsük az $n = 7$ és $m = 5$ Schiff bázisú homológ sor DSC termogramját. Az Sz szilárd és I izotróp állapot között a termogram több csúcsot mutat. Alacsony hőmérséklet felől haladva először egy nagy csúccsal találkozunk, mely a kristályrács megolvadásának exoterm folyamatát jelzi. A közbülső állapotokat S_4, S_3, S_2, S_1 és N jelzésekkel láttuk el.

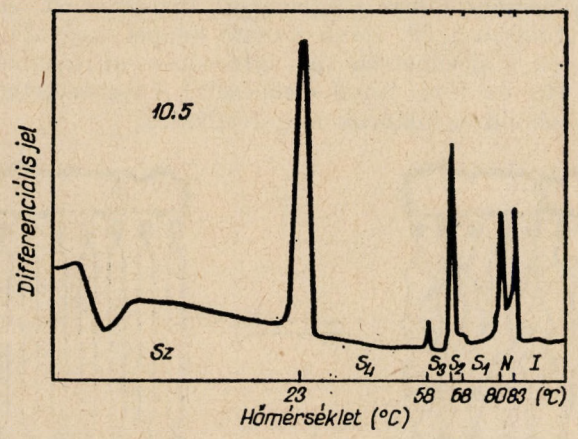
Megállapíthatjuk, hogy végig exoterm folyamatok lépnek fel az említett példában. A kalorimetriás vizsgálatokban jártas szem felfigyel az S_2-vel jelzett vállra, mely másodrendű fázisátmenetre utal. Mielőtt ezzel foglalkoznánk, tisztázzuk a jelzett állapotokat.

Az N-el jelzett S_1N (80 °C)—NI (83 °C) állapotban 3 °C-os hőmérséklet-tartományban polarizációs mikroszkópban könnyen megfigyelhetjük a nematikus állapotra jellemző fonalas szerke-

zetet S_1: 68 °C-tól —80 °C-ig szmektikus-A szerkezetre jellemző legyező (fan), S_2: 64 °C-tól —68 °C-ig szmektikus-C törött legyező, S_3: 58 °C-tól —64 °C-ig szmektikus-B legyező kevesebb diszkontinuitással, S_4: 23 °C-tól —58 °C-ig még nem azonosított feszített legyező kép figyelhető meg. Láttuk, hogy a folyadékkristályos anyagok többféle folyadékkristályos állapotot is mutathatnak.

Termotróp folyadékkristályok polimorfiája

Sok termotróp anyag a szilárd és folyadék fázis között nem egy hanem több folyadékkristály-szerkezettel rendelkezik. Ezeket az anyagokat polimorfoknak hívjuk. Meg tudjuk adni stabilitásuk sorrendjét a hőmérséklet függvényében. A rendezetlen szerkezetek mindig alacsonyabb hőmérsékleten jelennek meg. A hőmérséklet növelésével a sorrend: szilárd → szmektikus-B → szmektikus-C → szmektikus-A → nematikus → izotróp. Azok az anyagok, melyek nem rendelkeznek az összes szmektikus szerkezettel a felsorolt sorrendet nem változtatják meg, hanem egyes szerkezetet vagy szerkezeteket „kihagyják". A koleszterikus



16. ábra. $C_7H_{15}-O-\langle\bigcirc\rangle-CH=N-\langle\bigcirc\rangle-C_5H_{11}$ termogramja

állapot csak a nematikus helyett léphet fel (előtte vagy utána nem). (Rendszerük annyira hasonló szimmetriájú.) Példaként a TBBA-t (tereftal-bis-butylanilin-t), melynek szerkezeti képlete és fázisátmenetei

$$C_4H_9-\langle\bigcirc\rangle-N=HC-\langle\bigcirc\rangle-CH=N-\langle\bigcirc\rangle-C_4H_9$$

Kristály $\overleftrightarrows$ 113 °C S_B $\overleftrightarrows$ 114 °C S_C $\overleftrightarrows$ 172,5 S_A $\overleftrightarrows$ 196,6 °C Nematikus $\overleftrightarrows$ 236,5 °C Izotróp folyadék és a COB-t (ciano-octil-4-*n*'-bifenil-t)

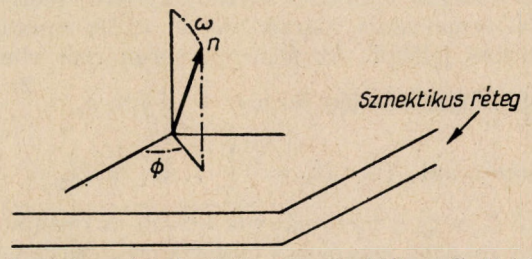
$$C_8H_{17}-\langle\bigcirc\rangle\langle\bigcirc\rangle-CN$$

Kristály $\overleftrightarrows$ 20 °C S_A $\overleftrightarrows$ 32 °C Nematikus $\overleftrightarrows$ 39,5 °C Izotróp folyadék említjük meg.

Fázisátmenetek természete

A folyadékkristályos anyagokban lejátszódó fázisátmeneteket elsőrendűnek hitték, újabban azonban másodrendű fázisátmenetek fellépését is lehetségesnek tartjuk. Ez azért fontos, mert új típusú anyagokon figyelhetjük meg a kritikus jelenségeket, és több fizikai paraméter viselkedése (rugalmas állandók, transzport sajátságok) ekkor erősen eltér a szokásostól. Ez gyakorlati szempontból is érdekes lehet, hiszen az elektromos vezetőképességek hányadosa nematikus anyagokban általában nagyobb, mint egy szmektikus átmenetnél (mert a töltéshordozók nem mennek át a rétegeken), ahol lényegesen kisebb lehet egynél, ami a folyadékkristályos kijelzők működésére nagy hatással van, de ez a fázisátmenet szerepet játszhat biorendszerekben a töltéstranszportban is. Nézzük részletesebben a fázisátmeneteket.

a) Szmektikus-C—szmektikus-A átmenet. Szmektikus-C fázisban a molekula irányát $\vec{n}$, ω elhajlás és Φ azimut szöggel jellemezhetjük *(17. ábra)*. (Pontosabban valamely pl. dielektromos tenzor alapján adhatjuk meg, és ezek a mennyiségek a főtengely polár szögei.)



17. ábra. A molekula helyzete szmektikus C fázisban

Ekkor a molekulák helyzetét $\psi = \omega e^{i\alpha}$ komplex számmal jellemezhetjük, ami a szuperfolyékony hélium $\psi(r)$ hullámfüggvényével (egy kvantumállapotban levő hélium atomok számával) analóg viselkedést mutat. A kritikus állapotok elmélete szerint, ha a C—A fázisátmenet folytonos, a fajhő logaritmikus szingularitást mutat, az elhajlás szöge

$$\omega = \text{const}\,(\Delta T)^{\beta},\ \Delta T = T - T_{CA},\ \beta = 0{,}35,\ T < T_{CA}$$

összefüggés szerint változik a hőmérséklettel. Külső mágneses térben

$$\omega = C(\Delta T)^{\gamma} \qquad \gamma = 1{,}30\ T > T_{CA}$$

T_{CA} felé felülről közeledve az elhajlásszög fluktuációja miatt erős depolarizált fényszórás figyelhető meg az

$$I = I_0 + I_1\left(\frac{T_{AC}}{\Delta T}\right)^{\gamma}$$

egyenlet szerint. I_0 a szmektikus-A állapotban

mért fényforrás. Az I_1 intenzitás frekvenciaspektrumának kiszélesedése

$$\tau \sim \left(\frac{T_{CA}}{\Delta T}\right)^{\gamma} \quad T > T_{CA}$$

szerint változik a hőmérséklettel. $T > T_{CA}$ esetében ω-nak és Φ-nek megfelelően két relaxációs folyamatot figyelhetünk meg. Az ω relaxációja $\tau \sim (\Delta T)^{-\gamma}$ szerint, Φ fluktuációja

$$\frac{1}{\tau_k} = Dk^2; \quad D \sim T^{-0,03}$$

relaxációs idő szerint változik, k a hullámszám.

Láthatjuk, hogy a $C \rightarrow A$ fázisátmenet sok új kutatási lehetőséget tartogat, és a γ és β hatványkitevők mérésére a szmektikus rendszerek jobb lehetőséget biztosítanak a héliumnál. (A fajhőt a rossz hővezetés miatt nehezebb ilyen anyagban tanulmányozni.)

b) Szmektikus-A—Nematikus fázisátmenet

Ez a fázisátmenet nem folytonos, véges látenshővel stb. McMillan [Mc 73] szerint bizonyos kölcsönhatási állandók esetében a fázisátmenet másodrendű lehet, ha a szmektikus-A—nematikus fázisátmenet hőmérséklete T_{AN} sokkal kisebb T_{NI} nematikus—izotróp fázisátmenet-hőmérsékletnél. A hőmérséklet növekedésével a szmektikus-A anyag felbomlik tartományokra, melyeken belül szmektikus marad, de az egész minta nematikus jellegű. Az átmenet során erős röntgen vagy fényszórás lép fel a $k = \pm q_s \bar{n}$, $q_s = \frac{2\pi}{d}$ hullámszámnál és $\Delta k_z = \frac{1}{\zeta_1 T}$, $\Delta k_x = \Delta k_y = \frac{1}{\zeta_2(T)}$ ahol ζ_1 és ζ_2 a tartományok hossza az optikai tengely és arra merőleges irányban. ζ ugyanazt a szerepet játssza itt, mint a korrelációs hossz egyéb kritikus rendszerekben, azaz

$$\zeta \sim (T - T_c)^{-2/3}$$

hatványkitevő szerint változik. A korrelációs hossz hőmérsékletfüggésének vizsgálata folyadékkristályokban a rugalmas állandók mérése útján történhet, mint ezt mérések igazolják.

$$\delta K_i = K_i(T) - K_i(0) = \text{const}\,(T - T_c)^{-\nu}$$

$$i = 2,3$$

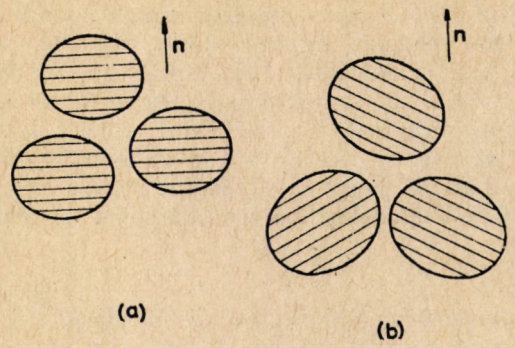
$$\nu = \frac{\gamma}{2-\eta}$$

$$\zeta_{11} \sim (T - T_c)^{-0,75 \pm 0,01}$$

$$\zeta_1 \sim (T - T_c)^{0,625 \pm 0,01}$$

c) Szmektikus-C—Nematikus fázisátmenet.

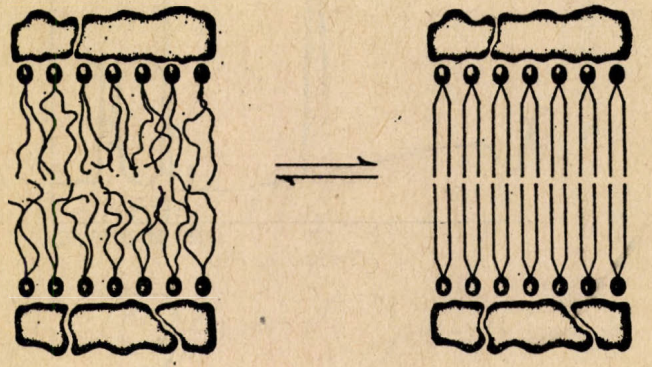
Ez a fázisátmenet az előbbinél komplexebb, itt nem részletezzük, az eltérést sematikusan a *18. ábrán* láthatjuk. A vizsgálandó fizikai mennyiségek itt is a rugalmas állandók.



18. ábra. A fázisátmenet sematikus képe. *a*) szmektikus-A — nematikus; *b*) szemktikus-C — nematikus fázisátmenetek

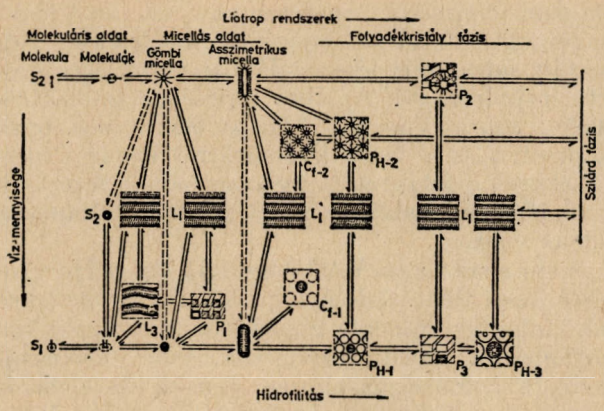
4. Termikus fázisátmenet biomembránokban és liotróp rendszerekben

Mint láttuk, a lipidek a membránokban kettősréteget alkotva, rendezetten helyezkednek el. A hőmérséklet függvényében azonban a membránokban a szénhidrogén-láncokban rend-rendezetlen fázisátmenet vagy rotációs mozgások beindulása mehet végbe. A rend-rendezetlen fázis átmanetre Steim [St 70] figyelt fel. Szerinte a biomembránokban végbemenő fázisátmenet sematikusan a *19. ábrán* látható képpel magyarázható. Kalorimetriás és infravörös mérésekből, a 718 cm^{-1}-es vonal eltűnéséből következtetett a szénhidrogénláncok megolvadására.



19. ábra. A fázisátmenet sematikus képe biomembránokban

Az átmeneti hőmérséklet alatt a lipidek szénhidrogén lánca rendezett „kristályos" elrendeződést mutat. Az átmeneti hőmérséklet felett rendezetlen „folyadék" állapotban található. A fázis átmenetet az egysejtű Mycoplasma laidlawii élő organizmuson (amely nem baktérium) és baktériumon, mint az E. coli és M. lysodektikuson mutatták ki. Ezek alapján azt várjuk, hogy az összes Mycoplasma membránban a lipidek kettősréteg formájában folyadékkristály állapotban vannak jelen. Liotróp rendszerekben a fázisátmeneteket a koncentráció, a hőmérséklet és a hidrofilitás függvényében kell vizsgálni. A II. fejezetben leírt szerkezetek megvalósulási sorrendje a *20. ábrán* látható.



20. ábra

IV.A. Elektro-optikai jelenségek folyadékkristályokban

A folyadékkristályok optikailag többnyire egytengelyű rendszerek. Az optikai tengely (a molekula hossztengelye) irányában a fény kettőstörés nélkül halad át.

Folyadékkristályos rendszert alkotó molekulák dipólmomentummal, dielektromos anizotrópiával rendelkeznek, így elektromos feszültség hatására térbeni elhelyezkedésük megváltoztatható. Ez számos makroszkópikusan megfigyelhető jelenségre vezet.

1. Dinamikus szórás

Ha nematikus anyagból készített vékony réteget egyen- vagy alacsony-frekvenciájú váltófeszültségű térbe helyezzük, az egyébként átlátszó anyag tejfehérré válik. Ezt a jelenséget nevezzük dinamikus szórásnak. A fényszórás a rendszerben kialakuló folyamatosan örvénylő tartományokon lép fel. A feszültség lekapcsolása után 10—100 msec nagyságrendű idő alatt a zavarosság eltűnik. A zavaros és tiszta állapot között kb. 20—30-szoros kontraszt-viszony érhető el.

2. Dinamikusan szóró állapot konzerválása

Ha a nematikus anyagba kevés koleszterikust keverünk, és elektromos térbe helyezzük, a fellépő dinamikus szórás a feszültség kikapcsolása után hosszú ideig (esetleg 1—2 napig is) fennmarad, vagyis a folyadékkristályba beírt információ hosszú ideig tárolható. Hangfrekvenciás feszültség (kb. 700 Hz) rákapcsolásával a dinamikusan szóró állapot megszüntethető, az információt tehát kitörölhetjük.

3. Festett nematikus anyagok színkapcsolása

Ha nematikus anyagban olyan pálca alakú festékmolekulákat oldunk kis mennyiségben /1%, amelyeknek abszorpciós spektruma függ az orientációjuktól, változtatható színű folyadékkristályos anyagot kapunk. Elektromos tér bekapcsolására ugyanis a nematikus molekulák elfordulnak és magukkal fordítják a festékmolekulákat is. Mivel ezek színe függ az orientációjuktól, az egész rendszer színe megváltozik. Ebben az esetben a cella elé és mögé keresztezett helyzetben polarizátor filmet kell helyezni.

4. Elektromosan vezérelt kettőstörés

A folyadékkristálycella elektródjait úgy készítik el, hogy az anyag molekulái arra merőlegesen helyezkedjenek el. Ha a polarizált fénysugár a molekula tengelyek (az optikai tengely) irányában halad át a cellán, a cella után elhelyezett, az elsőhöz képest 90°-kal elforgatott polarizátoron a fény nem tud áthaladni. Elektromos tér (3—8 V) hatására a negatív dielektromos anizotrópiájú molekulák kifordulnak a tér irányából, ez esetben a cella után elhelyezett polarizátor a fényt átengedi. A cella fényáteresztése tehát elektromos térrel vezérelhető, nyitható, zárható. Ezzel az effektussal igen nagy (1000 : 1) kontrasztviszony érhető el. Reflexióban működő cellánál hátul tükröt, elől cirkuláris polarizátort kell elhelyezni.

5. Csavart nematikus szerkezet elektromosan vezérelt forgatása

Az elektródákat úgy készítik el, hogy a pozitív dielektromos anizotrópiájú anyag molekulái az elektródák síkjában egy irányban helyezkedjenek el. A molekulák iránya a két elektródán egymással 90°-os szöget zár be. A cella előtt és mögött polarizátor helyezkedik el. A cellában folyamatos (P/4-es) spirál szerkezet alakul ki ($P \sim 50\ \mu$m). A cellában belépő polarizált nyaláb a molekula forgásával szinkronban elfordul. Elektromos tér rákapcsolásával a molekulák iránya megváltozik, a spirál szerkezet eltűnik és nem forgatja el a polarizált fény polarizációs síkját. Transzmissziós rendszerben a polarizátorok párhuzamosak, tér nélkül a kép fekete, tér hatására kivilágosodik. Reflexiós rendszerben a polarizátrok keresztezettek és a reflektálótükröt a hátsó polarizátor mögé helyezik. Ez a kiíró alapállapotában világos, tér hatására elsötétül.

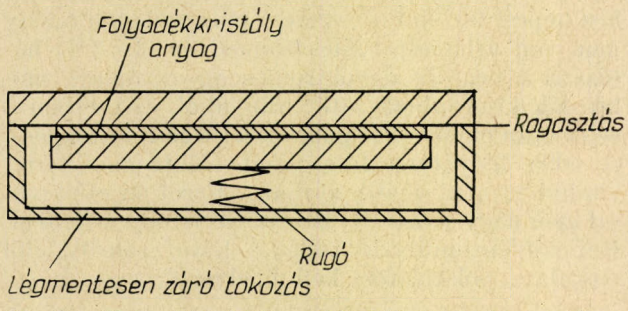
6. Hangolható diffrakció

A koleszterikus anyagok spirálhossza feszültség rákapcsolásával megváltoztatható. A spirálhossz változása azonban egy adott szögben diffraktált fénysugár hullámhosszának, vagyis színének a megváltozását eredményezi, monokromatikus fény pedig a feszültség változtatása hatására különböző szögek alatt diffraktálódik.

IV.B. Termo-optikai jelenségek alapján működő folyadékkristály kijelzők

1. Hőmérséklet-térkép készítése

Megfelelő koleszterikus anyagokból készült filmet hőmérséklet-gradienssel rendelkező felületre téve színes csíkok jelennek meg. Minden színhez megfelelő hőmérséklet rendelhető. Lehet olyan folyadékkristály filmet készíteni, amely 0,1 °C hőmérséklet változás hatására piros színről kékre vált át. Ez az érzékenység még tovább is javítható. A jelenség oka az a már említett jelenség, hogy a hőmérséklet növekedésével a koleszterikus anyagok spirál hossza megnő és egy adott szögben a reflektált fény színe vöröstől kék felé tolódik el.



21. ábra. Folyadékkristály cellák felépítésének sematikus rajza

Ennek a jelenségnek az alkalmazása is széles területen várható, néhány speciális esetben már jelenleg is felhasználják, kis hőmérsékleti inhomogenitások kimutatására. Integrált áramkörök hibahelyein magasabb hőmérséklet alakul ki. A ráfújt vékony koleszterikus film a hibahelyen elszíneződik.

Hasonló elszíneződés lép fel az emberi bőr felületére helyezett filmen, ha a bőrfelülethez közel rákos daganat található.

A Liquid Crystal Industries, Inc. (USA) olyan hőmérsékletérzékeny folyadékkristály sorozatot kínál, amelynek minden tagja 2—4 °C hőmérsékletváltozás hatására ibolyából pirosra színeződik, vagyis a teljes látható spektrumot átfogja.

2. Kiírás infravörös lézerfénnyel

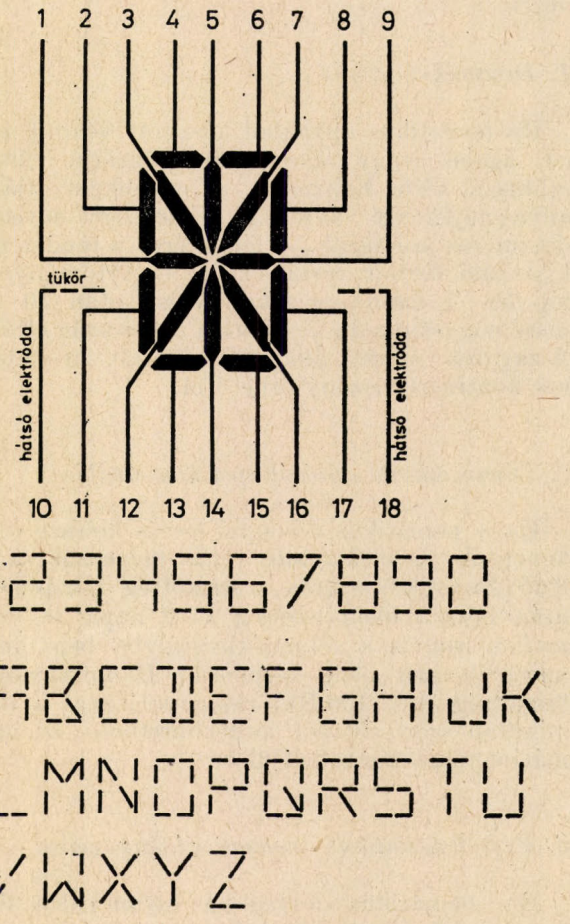
A kijelző a korábbi cellákhoz hasonlóan $In_{2-x}Sn_xO_{3x}$ átlátszó, jól vezető elektródák közé helyezett folyadékkristály anyagból (szmektikus vagy koleszterikus), megfelelően scannelhető beíró infravörös lézerből és a megvilágító fényforrásból áll.

Hő hatására a folyadékkristályos anyagokon fázisátmenetek mehetnek végbe. Így ha kijelző cella egy pontjára infravörös lézerfény (20 mW) esik a folyadékkristály állapotú anyag izotróp folyadék fázisba megy át. Ha ez a hőhatás megszűnik az említett pontban, az anyag gyorsan visszahül a folyadékkristály állapotba, de nem rendeződik, és erősen szórja a ráeső fénysugarakat. Ezzel az eljárással megfelelően reflektált infravörös lézernyalábbal tetszőleges szöveg, rajz kiírható. Az ábra törléséhez az elektródákra 30—40 V-os 1,5 kHz-es elektromos teret kapcsolva és a beíró lézersugárral lassan végigpásztázva a felületet (a gyorsan haladó lézerfény is töröl) a molekulák az eredeti rendezett állapotba állnak vissza.

A címzésre GaAs, YAG vagy 1,15 μm-es He—Ne lézer használható fel. A folyadékkristály molekulák alaphelyzetben rendezettek. Szmektikus anyagnál a molekulatengelyek, koleszterikusnál pedig a spiráltengelyek merőlegesek az elektródákra. A megvilágító fényforrás optimális helyzete a kijelző síkjára merőleges. Ilyen kiíró (kísérleti) felbontása jelenleg 50 vonal/mm 3×3 cm-es felületen. Kontraszt viszonya 10 : 1. Címzési sebessége 10^4 képelem/sec. 20 mW teljesítményű 1,06 μm-es YAG lézerrel. A törlés ideje ~20 sec.

IV.C. Folyadékkristály kijelzők szerkezeti felépítése

A kijelzők két sík üvegfelület között (kb. 10 μ) vékony nematikus folyadékkristály rétegből állnak. Az üvegfelületen a kiírandó jelnek megfelelő



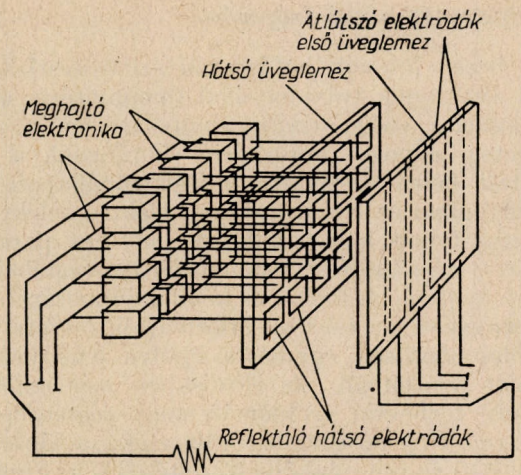
22. ábra. Elektródák kiképzésének sematikus rajza alfanumerikus kijelzőnél



23. ábra Alfa-numerikus kijelzővel írt szöveg és szám

átlátszó elektródákat képeznek ki. A cellák szerkezeti felépítését a 21. ábrán mutatjuk be. A cellák transzmissziós vagy reflexiós üzemmódban működnek. Transzmissziós cella mindkét elektródája átlátszó, a fénysugár áthalad, illetve feszültség rákapcsolásakor nem halad át az elektródán. A reflexiós cella hátlapja (egyik elektródája) Al tükör. A feszültség hatására a kívánt elemek szórják a fénysugarakat. Az elemek kiképzése szerint numerikus (hételemes) alfa-numerikus (14 elemes), vagy mátrix vezérlésű (lehet 5×7 elemes vagy a fényújsághoz hasonló) cellákat különböztetünk meg.

Elektródák kiképzésének sematikus rajzát 14 elemes alfa-numerikus kijelzővel a 22. ábrán mutatjuk be. 23. ábrán a KFKI-ban készített alfa-numerikus kijelzővel írt szöveget és számot mutatjuk be. 24. ábrán mátrix szervezésű TV képcső sematikus rajza látható.



24. ábra. TV-képcsőmátrix sematikus rajza

IRODALOM

[Ba 72] Bata L., Folyadékkristályok. KFKI-73-7495.
[De 74] de Gennes P. G., The Physics of Liquid Crystals. Clarendon, Oxford. 1974.
[De 72] de Gennes P. G. Phys. Lett. 38A.219 (1972). Solid State Comm. 10.753 (1972).
[Fr 22] Fridel G., Ann. Phys. 19.273 (1922).
[Gr 62] Gray G. W., Molecular Structure and Properties of Liquid. London—New York, 1962.
[Fr 58] Frank G. F., Disc. Faraday Soc. 25.19 (1958).
[He 68] Heilmeier G. H., Appl. Phys. Lett. 13.46 (1968) és 13.132 (1968).
[He 65] Hechter, O., Biological Membranes. Academic Press London és New York 1968.
[Lu 62] Luzzati V. I., Cell. Biol. 12.207 (1962).
[Mc 73] McMillan W. L., Phys. Rev. A. 7.1419 (1973).
[St 70] Steim, Liquid Crystal and Ordered Fluids. Johnson—Porter (1971).

AZ ULTRAIBOLYA FOTOEMISSZIÓS MÉRÉSI MÓDSZER ÉS ALKALMAZÁSA A SZILÁRDTESTEK FIZIKÁJÁBAN

Szász András
ELTE Szilárdtest Fizika Tanszék

Hallwachs 1887-ben figyelte meg először a fotoemissziót. Elméleti megalapozása Einstein nevéhez (1905) fűződik. Az ő munkája nyomán a fotoemissziót elsősorban a kilépési munka meghatározására használták fel.

Az 1930-as években a kvantummechanika kifejlődésével az anyagok optikai vizsgálata is előtérbe került, ezzel együtt a fotoemissziós kutatások is fejlődtek, majd külön jelentőségre tettek szert a fotokatódok széles körű alkalmazásánál.

Az 1950-es évek közepén indult meg a fotoemissziós módszer alkalmazása a fémek elektronállapotainak vizsgálatára, a sávszerkezet tanulmányozására.

A módszer — bár elméletileg rendkívül információgazdag —, nem váltotta be a hozzáfűzött reményeket. A nagyon nehéz kísérleti technika (legalább 10^{-8} torr ultranagy vákuum kedvező maradékgáz spektrummal, legalább 10^{-12}A reprodukálható mérése, nagy intenzitású, nagy stabilitású UV fényforrások felhasználása, optikailag megfelelő felületek kialakítása, stb.) nem tette lehetővé, hogy ez a terület gyorsan értékelhető eredményeket szolgáltasson.

Az első, komolyan megalapozott elméleti és kísérleti eredményeket 1964-ben Berglund és Spicer [1] szolgáltatták. Ettől kezdve a módszer rohamos fejlődésnek indult [2], és ma már a szilárdtest elektronállapotok kimérésének elismert eszköze.

Hazánkban már 1960-ban felmerült egy ilyen jellegű mérés lehetősége (Nagy Elemér professzor, ELTE Kísérleti Fizika Tanszék), de a megvalósítás a sok technikai jellegű probléma miatt 7 évet váratott magára [3]. Jelenleg hazánkban az MTA Műszaki Fizikai Kutatóintézetében és az ELTE TTK Szilárdtest Fizika Tanszékén folynak fotoemissziós szilárdtest kutatások. Az előbbi intézetben főleg félvezetők és szigetelőanyagok, az utóbbiban pedig nagyrészt fémek vizsgálata folyik.

A beeső fotonok hatására a szilárdtestből kilépő elektronok tulajdonságai (mennyisége, energiaeloszlása, szögeloszlása, spinpolarizációja, stb.) rengeteg lényeges információt hordoznak a szilárdtest belső szerkezetéről, elektronállapotairól; az anyagban az elektron-foton, elektron-elektron, elektron-fonon kölcsönhatások lényeges paramétereiről; a szilárdtest szennyezőiről, rácshibáiról; a test felületének fizikai és kémiai állapotáról stb.

Természetesen ezek az információk összetetten, a kölcsönhatások egymásra épülve jelentkeznek a mért adatokban. Az előzőekben már említett komoly technikai problémák nagy részét éppen az összetett jelenségek szétválasztása, a jól kontrollálható és reprodukálható feltételek megteremtése jelenti.

Viszonylag kevés technikai jellegű problémát tartalmazó mérés a szilárdtestek elektronállapotsűrűségének (density of states, DOS) mérése.

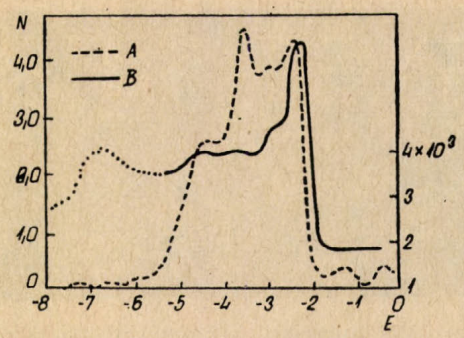
Az emittált fotoelektronok energiaeloszlása (energy distribution curves, EDC) hordozza a DOS méréshez szükséges információkat.

A kísérletek azt mutatják, hogy az elméletileg számított és az EDC-ből kapható DOS nem esik egybe, csak fő struktúrájuk egyezik meg. Az EDC az ún. optikai állapotsűrűségről (pontosabban a fotoemissziós optikai állapotsűrűségről; optical density of states, ODS) ad számot. (1. ábra.) Az eltérés elsősorban abból adódik, hogy a sávok közötti elektronátmenetek a sáv különböző pontjaiban, különböző valószínűségekkel történnek meg, melyek kísérleti meghatározása az EDC-ből történő DOS számításokhoz nem egyértelmű; általában konstans mátrixelem közelítéssel történnek a számítások. A másik fő hibaforrás pedig, hogy a fotoemissziós EDC-ben a sávból-sávba elektronátmeneteken (direkt átmenetek) kívül más átmelnetek is vannak (indirekt és nem-direkt átmenetek).

A direkt (vagy vertikális) átmenetekben az egyik sávban meglevő kváziimpulzus a másik sávban is ugyanaz marad, mivel az optikai frekvenciatartományban a beeső hullám hullámszámvektora $|k| = \frac{2\pi}{\lambda} = 10^4 - 10^6$ cm^{-1}, az elektron k — vektora mellett elhanyagolható, hiszen a Brillouin-zóna dimenziói $\frac{\pi}{a} = 10^8$ cm^{-1} („a" a rácstávolság). Az elhanyagolást az is alátámaszja, hogy az elektron-fonon szórás szabad úthossza általában jóval nagyobb, mint a behatolási mélység.

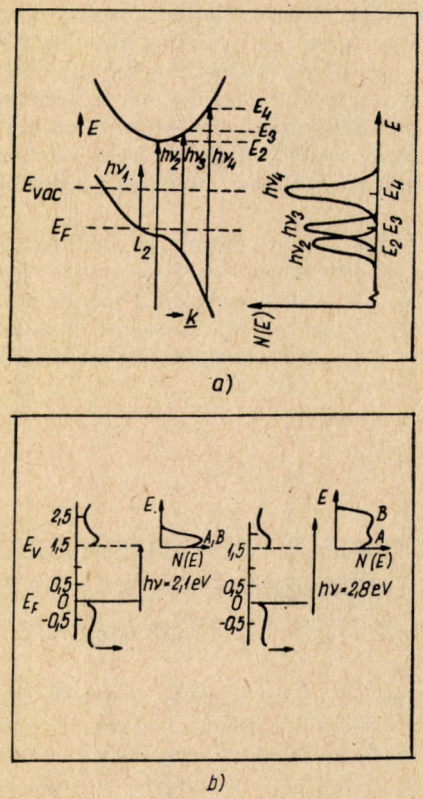
Vannak azonban esetek, amikor a fonon kölcsönhatás jelentőssé válik, (főleg a kilépési küszöb közvetlen közelében). Ekkor tehát már nem hanyagolhatjuk el a fonon-elektron kölcsönhatást (indirekt átmenetek).

A fotoemissziós elektronátmenetek egy nagy részében a kváziimpulzus megmaradása nem jelent kiválasztási szabályt (nem-direkt átmenetek).



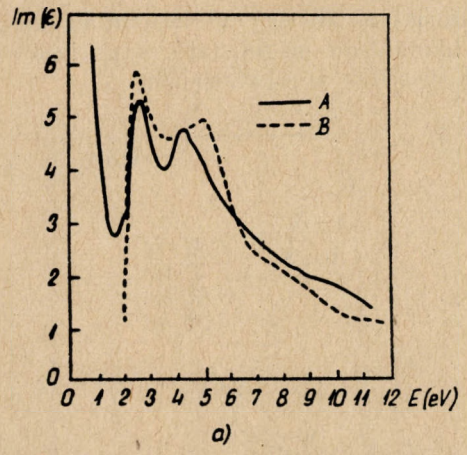
1. ábra. Az elméletileg számított DOS (A) és a kísérletileg kapott fotoemissziós ODS (B) összehasonlítása réz mintárn [2]

Ez utóbbiakról még sok vita folyik az irodalomban. A direkt és nem direkt átmenetek hatását az EDC-re a 2. ábra mutatja.

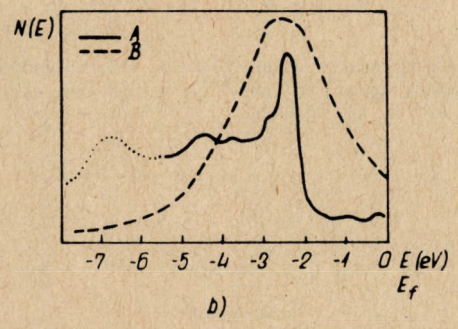


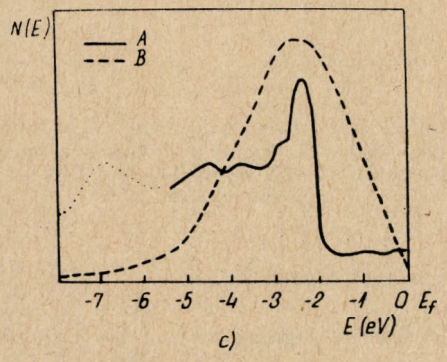
2. ábra. A fotoemissziós direks és nem-direkt átmenetek által létrehozott eloszlástípusok [1]. A direkt (a) átmenet által létrehozott eloszlás karakterisztikus csúcsokat ad cz átmenetre jellemző energiáknál. A nem-direkt átmenetekben a kezdeti és végállapotra jelemző csúcsot csak megfelelő fotonenergiáknál kapjuk meg. Így a foton energiájának ($\hbar\omega$) változtatásakor az EDC csúcsok vizsgálatával eldönthető az átmenet jellege.

Az UV fotoemisszión (UV photoemission spectroscopy, UPS) kívül a DOS mérésre ismerünk még módszereket. A Fermi-felület közelében levő állapotok kimérése (De Haas-van Alphen effektus, ciklotron rezonancia, anomális skin effektus, stb.) mellett vannak a mélyebben fekvő sávok vizsgálatára szolgáló módszerek, pl. a lágy-röntgen spekt-

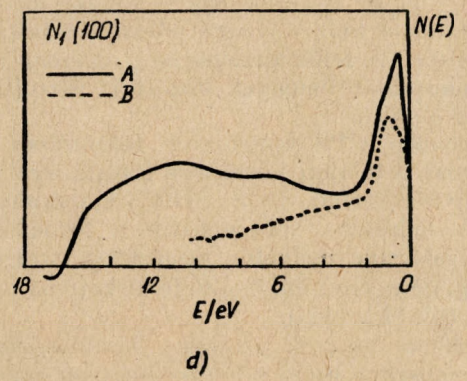


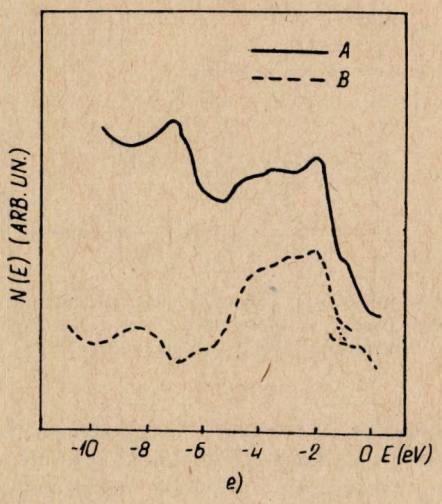
3/a ábra. A dielektromos, állandó imaginárius részének elméletileg számított (B) és az UPS-ból kapott (A) görbéinek összehasonlítása réz mintán [2].





3/b, c ábra Az UPS-ből kapott (A) és az SXS-ből (b) illetve az XPS-ből (c) kapott EDC görbék (B) összehasonlítása [2].





3/d, e ábra. Az UPS-ból kapott (A) és az INS-ből kapott (B) EDC görbék összehasonlítása. (Gyengébb energiafelbontás [10] alapján (d), jó energiafelbontás [9] alapján (e).

roszkópia (soft X-ray spectroscipy, SXS), a röntgenfotoemisszió (X-ray photoemission spectroscopy, XPS), az optikai mérések (optical spectroscopy, OS), az ionneutralizációs módszer (ionneutralisation spectroscopy, INS), a pozitron annihilációs módszer (PA) stb. A 3. ábrán összehasonlítottunk néhány különböző módszerrel mért DOS görbét az UPS megfelelő eredményeivel. Az ábrákon jól látszanak az UPS módszer előnyei, elsősorban kiemelkedően jó felbontóképessége a DOS mérés területén.

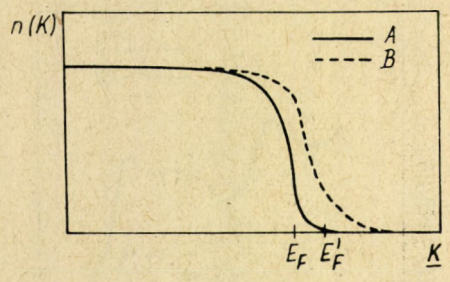
Az UPS jó felbontóképességének köszönhető, hogy a módszer alkalmas a szennyezők által kissé módosított sávszerkezet kimérésére, lokalizált nívók kimutatására is [4].

Fázisátalakulások vizsgálata

Az előzőekben említett előnyök teszik lehetővé, hogy az UPS fázisátalakulások vizsgálatára is alkalmazható.

A fotoeffektussal a fázisátalakulás közben történt elektronállapot-sűrűségváltozást tudjuk nyomon követni. Ezt a legérzékenyebben a Fermi-nívónál — annak eltolódása miatt —, vagy közvetlenül alatta (pl. átmeneti fémeknél d-sáv) figyelhetjük meg a legjobban. Így a fázisátalakulások vizsgálatánál célunk az, hogy a Fermi-felülethez közeli tartományra élezzük ki a mérést, (l. 4. ábra).

Ebben a tartományban erős zavaró effektusok vannak. Elsősorban az, hogy a Fermi-felület közelében történő méréseket a kilépési küszöb környezetében végezzük. Ekkor viszont nagyon megnő a felület zavaró hatása, és a fonon-elektron szórása módosító hatása is szerepet játszik. Amennyiben karakterisztikus változás játszódik le a Fermi-felületnél jóval mélyebben, akkor ennek

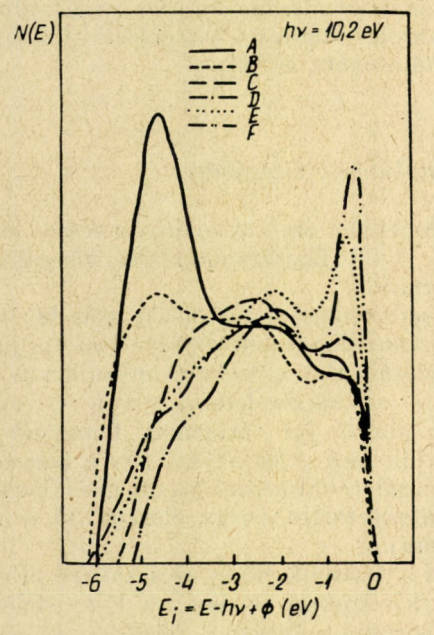


4. ábra A két fázist jellemző eloszlási görbék (A és B) sematikus ábrája. A mérést az E_F és E'_F közötti energiatartományra érdemes kiélezni [11].

vizsgálatakor a nagyobb fotonenergia következményeként a bulk elektronok szabad úthossza erősen lerövidül, és a fotonok behatolási mélysége is jelentősen csökken, tehát ismét felületi hatásokkal kell számolnunk.

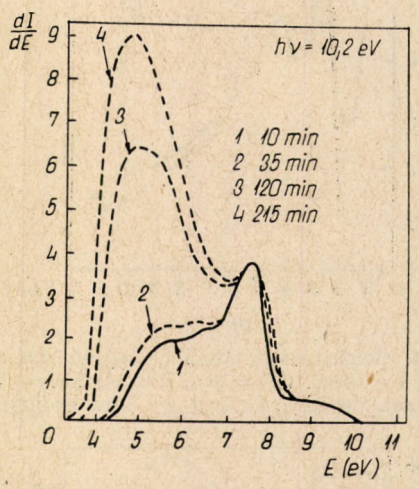
Az order-disorder fázisátalakulás vizsgálat [5], a viszonylag könnyen reprodukálható feltételek, (hiszen a mérés mindig szobahőmérsékleten történhet), és a hatásosan alkalmazható referenciaminta miatt igen sikeres az UPS módszer alkalmazásával. A mérések jól megegyeznek a más módszerekkel (pl. ellenállásmérés) kapott eredményekkel, sőt egyes részletek a probléma mélyebb megértéséhez segítenek hozzá [5].

A mágneses (para-ferro) fázisátalakulások vizsgálata [6], a rendkívül nehéz technikai körülmények, nehezen reprodukálható feltételek miatt az előzőeknél bonyolultabb probléma. Ez a mérési terület most több kutatócentrum érdeklődésének

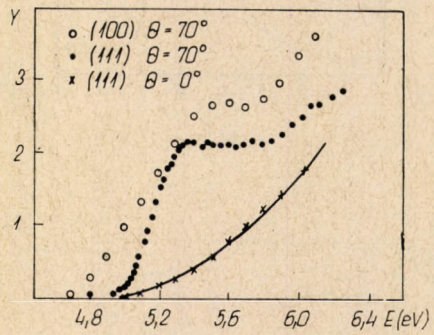


5. ábra. A méréstechnika tökéletesedésével a nikkel mintán mért, oxigénre jellemző csúcs egyre inkább eltűnik az EDC-ből [13]. (A — Blodget és Spicer, 1966; B — Breen, Wooten és Huen, 1967; C — Callcott és MacRae, 1969; D — Vehse és Arakava, 1969; E — Eastman és Cashion, 1971; F — Pierce és Spicer, 1972).

középpontjában áll, így várhatóan ez az alkalmazás hamarosan megbízható, kvantitatív eredmények elérésére is alkalmas lesz.



6. ábra Az ultranagy vákuumban az idő múlásával egyre több felületi szennyező rakódik a mintára, és jellemző csúcsot adnak az EDC-hez [2]. (A mérés réz mintán történt.)



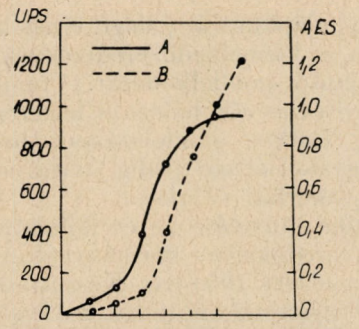
7. ábra Vektoriális fotoemisszió miatt a polarizálatlan fény beesési szögétől függően különböző struktúrát kapunk a kilépési küszöb környékén [14]. (A mérés réz mintán történt.)

Felületvizsgálati alkalmazások

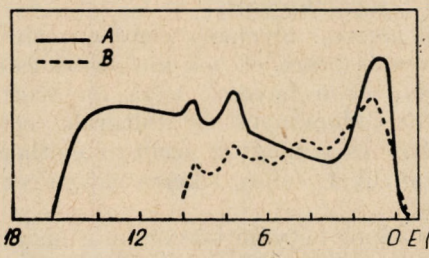
Az első UPS vizsgálatoknál a módszer felületérzékenysége zavaró tényező volt, sok akadályt jelentett a reális ODS spektrumok felvételéhez. A kísérleti technika fejlődésével (elsősorban a fémvákuumtechnika jelentős előrehaladásával), a felületre jellemző zavarok egyre inkább eltűntek, és élesedtek a bulk anyagra jellemző struktúrák. (L. 5. ábra.) A felületérzékenység azonban a legjobb vákuumkörülmények között is torzulásokat okozhat (6. ábra).

A jelenlegi UPS vizsgálatok tekintélyes része foglalkozik a felületi jelenségek kutatásával, a felületi DOS, (surface DOS, SDOS) kialakulásával. Ezek a mérések többségükben a fotoemissziós EDC spektrum mélyebb megértését szolgálják, (pl. [7]), de egyre több önálló felületi téma is megjelenik (pl. [8], [12]).

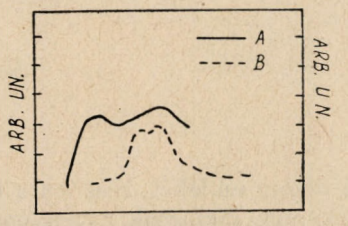
A felületi hatások érzékeny kimutatására az EDC méréseken kívül a kilépő elektron egyéb tu-



8/a ábra Az UPS érzékenység (A) és az AES csúcsmagasság (B) változásainak összehasonlítása [15].



8/b ábra A szénnel és higannyal szennyezett nikkel (100) felületéről kapott UPS (A) és INS (B) eloszlásgörbéinek összehasonlítása [10].



8/c ábra Az UPS EDC-ből nikkelre kapott oxigéncsúcs (A) és az XPS-sel kapott oxigéncsúcs (B) összehasonlítása [16].

lajdonságainak mérése (pl. szögeloszlás) is [8] nagyon jól használható. Különösen figyelmet érdemel az ún. vektoriális fotoemisszió mérése, — melynek lényege, hogy a fotoáram a fény beesési szögétől is függ. A kilépési küszöb körül karakterisztikus különbségeket találunk (7. ábra).

Az UPS más felületvizsgáló módszerekkel összehasonlítva (pl. LEED, Augerspektroszkópia, (AES), INS, téremissziós vizsgálatok (field-emission spectroscopy, FES), felületi visszaverődés vizsgálat (surface reflectance spectroscopy, SES) stb., is jó eredményeket szolgáltat. (A 8. ábrán bemutatunk néhány szemléletes összehasonlítást.)

IRODALOM

1. Berglund C. N.; Spicer W. E.: Phys. Rev. *136A* (1964) 1030 Phys. Rev. 136A (1964) 1044
2. Krolikowsky W. F.; Spicer W. E.: Phys. Rev. *185* (1969) 882 Phys. Rev. *1B* (1970) 478
3. Nagy E.; Pető G.: Phys. Stat. Sol. *23* (1967) K49
4. Pető G.: Kandidátusi disszertáció (1975)
5. Nagy E.; Pető G.: Phys. Stat. Sol. *34* (1969) K91 Phys. Stat. Sol. *A22* (1974) K135
6. Szász A.: Egyetemi doktori disszertáció (1974)
7. Christensen N. E.; Feuerbacher B.: Phys. Rév. B *10* (1974) 234 Phys. Rev. B *10* (1974) 237
8. Gazduk J. W.: Phys. Rev. B *10* (1974) 5030
9. Rowe J. E.; Ibach H.; Froitzheim H.: Surface Science *48* (1975) 44
10. Hagstrum H. D.; Becker G. E.: Proc. Roy. Soc. (London) *A331* (1972) 395
11. Nagy E.: Akadémiai székfoglaló (1975)
12. Menzel D.: J. Vac. Sci. Technol. *12* (1975) 313
13. Pierce D. T.; Spicer W. E.: Phys. Rev. B *6* (1972) 1787
14. Gertland P. O.; Berge S.; Glagsvold B. J.: Phys. Rev. Lett. *30* (1973) 916
15. Stocker B. J.: Surface Science *47* (1975) 501
16. Brundle C. R.: Surface Science *48* (1975) 99

RENNER JÁNOS

(1889 június 5—1976 január 30)

A Magyar Tudományos Akadémia X. Osztálya Geofizikai Bizottsága, a Magyar Geofizikusok Egyesülete, valamint utolsó munkahelye az ELTE Geofizikai Tanszéke nevében meghatva és szomorúan búcsúzom Renner Jánostól, a műszaki tudományok doktorától, az Eötvös Loránd Geofizikai Intézet nyugalmazott igazgatójától, mindannyiunk szeretett János bácsijától.



Dr. Renner János alkotó életének első 30 évében a fizika tudományának szolgálatában állt. Pályájára nagy befolyással volt professzora és példaképe, a mind ez ideig legnagyobb magyar fizikus: Eötvös Loránd. Az ő életművébe torziós inga észlelőként 1911. okt. 1-én mint fiatal matematika-fizika szakos tanár kapcsolódott be, és a mester halála után tovább folytatta és fejlesztette a félbemaradt munkákat.

Sok évtizedes tanári pályája során nagy sikerrel adta át tudását, ismereteit és életszemléletét tanítványainak és azok szerte a világon sikeresen megállták helyüket, és elismerést szereztek hazánknak, iskolájuknak és tanáruknak.

Magas szintű oktatói tevékenység nem is képzelhető el alkotó, kutató munka nélkül. Tanári működése közben 1932—35 között végezte kísér-

leteit a tömegvonzás és tehetetlenség arányosságának kérdéséről. Kísérleteivel az arányosság pontosságát sikerült az Eötvös-féle mérésekhez viszonyítva egy nagyságrenddel fokoznia. Nagyrészt neki köszönhető a rendszeres terepi használatra is alkalmas Eötvös-ingák kifejlesztése.

Pedagógus tevékenysége alatt sohasem szűnt meg az Eötvös-i életmű folytatása során kialakult kapcsolata a földtudományokkal. Tanári működésével párhuzamosan állandóan foglalkozott a geofizika elméleti és gyakorlati kérdéseivel. Tanulmányi szabadságai alatt részben Magyarországon, részben külföldön geofizikai méréseket folytatott a mérési módszerek továbbfejlesztése érdekében. 1923—24-ben és 1925—26-ban Indiában, majd 1927-ben és 28-ban Franciaországban végzett ilyen geofizikai méréseket.

Az MTA Geodéziai és Geofizikai Főbizottságoknak évtizedeken át tagja és a Geofizikai Intézetnek — éppen annak dinamikusan fejlődő szakaszában — megbizott igazgatója volt.

Személyesen ekkor kerültem kapcsolatba vele és mondhatom, hogy sok kezdeti nehézségem leküzdését éppen az ő jóindulatú segítsége tette lehetővé. Ő támogatott az országos mágneses alaphálózat mérésének megszervezésében, és a tihanyi Geofizikai Obszervatórium sem épült volna meg hathatós segítsége nélkül.

Érzéke az alapkutatás jellegű vizsgálatokra más területeken is kiemelkedő eredményekre vezette. Messze tekintő gondolkodásáról tanúskodik az ország gravitációs alaphálózata lemérésének megszervezése; Eötvös gondolatainak bevezetése a geodéziai gyakorlatban pedig mutatja gondolkodásának gyakorlati oldalait.

A geofizika művelésében és fejlesztésében elért mélyreható eredményeit kormányzatunk több más kitüntetés mellett 1953-ban Kossuth-díjjal, majd a Munka Érdemrend arany fokozatával ismerte el. A Magyar Geofizikusok Egyesületének megalapításától kezdve tevékeny tagja, majd Eötvös emlékérmese és társelnöke volt.

Hosszú, sikeres, tevékeny életében sok küzdelem volt osztályrésze, de sok kitüntetés és elismerés is érte. Azon kevesek közé tartozott, akik maradandó tudományos és kulturális értékeket hoztak létre és a magyar szellemi életben megörökítve nevüket, teljes, sikeres életművet hagytak hátra.

Kedves János bátyám köszönöm a magam és a földtudományi társadalom nevében azt a sok értékes segítséget, amit számunkra adtál. Emlékedet szeretettel és tisztelettel őrizzük. Nyugodj békében!

Barta György

Most, amikor szomorú szívvel kell búcsút vennem Dr. Renner Jánostól az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, a volt munkatársak nevében, sok régi emlék támad fel bennem. Körülbelül húsz évig adatott meg nékem, hogy mellette dolgozhassak és én is élvezhessem tudásának, gazdag tapasztalatainak gyümölcsét. Mert ő az elmúlt időkre jellemző, ma már ritkábban fellelhető kettősséget egyesítette magában: eredményes tudós és jó tanár volt. Ismét magam előtt látom azokat az éveket, amikor mint kolléga, tehát a kulisszák mögül láthattam, miként készíti elő óráit, miként írja meg iskolai tankönyveit. Ezért mondom, hogy nemcsak pályatársnak, hanem tanítványnak is érzem magamat. Sok beszélgetésünk történt, ezeknek részben őrzöm emlékét, részben a tudat alatt táplálják lelkemet. Nemcsak az enyémet, hanem a többi volt kollégáit is, valamint számtalan tanítványáét, akik itthon és szerte a világban mint a lelkiismeretesség, pontosság és jóság példaképére emlékeznek rá. Ha egy ilyen végső búcsúban lehet valamilyen vigasztaló momentumot találni, akkor ez az, hogy Renner János hosszú élete folyamán értékeket adott a tudománynak és értékeket adott sokunknak, akik mint munkatársai és tanítványai, hosszú ideig mellette lehettünk. Ezzel a hálával búcsúzom Dr. Renner Jánostól az Eötvös Loránd Fizikai Társulat és még élő volt munkatársai nevében.

Vermes Miklós

(Búcsúbeszéd a Farkasréti temetőben)

A FIZIKA TANÍTÁSA

A HŐTAN ALAPFOGALMAINAK TANÍTÁSÁRÓL

Csákány Antalné
ELTE Radnóti Miklós Gyakorló Iskola

A hőtan tanításának céljai

Tanügyi reformok korát éljük, az alapdiszciplínák tanításának problémáit azonban ezek nem oldhatják meg. Nemcsak az a probléma, hogy mit kellene még belevenni a tananyagba, hogy tanítványaink a tudományok korszerű eredményeit is megismerjék, hanem legalább ilyen nagy feladat annak megoldása, hogy a klasszikus fizika „jól" ismert fejezeteit hogyan lehetne még jobban, pontosabban és a tudományok korszerű eredményeit figyelembevéve oktatni.

A hőtan tanításának központi problémája a benne használt speciális kifejezések magyarázata. A jelenlegi gyakorlat szerint ezek magyarázatát, értelmezését álta-

lában mellőzni szokták, azokat, mint külön magyarázatra nem szorulókat a mindennapi szóhasználatból veszszük át. Melyek ezek? Ilyen a hőmérséklet, a hő és természetesen a belső energia fogalma. A hőmérséklet és hő kifejezéseket minden óvodás gyerek is használja, ezért természetesen a gimnazisták nagy részének fel sem tűnik, hogy nem tudja ezek pontos jelentését.

Sok szava van a mindennapi életnek, amelyeket nyelvtanilag helyesen használunk, a mondatokban értelmes, logikailag helytálló állításokat fogalmazunk velük. Ha azonban hirtelen meg kellene mondani, hogy pontosan mit is értünk azon, hogy fény, szag, szépség, vagy pl. tér, vagy idő, bizonyára többen gondolkodóba esnének. Valami hasonló dolog van a hőmérséklet szóval is. Ilyen különbség van bizonyos eszközök használata és szerkezetük ismerete között is. Sokan, akik nem ismerik az autómotor, a rádió, a kávédaráló vagy a telefon szerkezetét teljesen szakszerűen tudják használni azokat a hőmérővel együtt.

Ez azonban nem jelentheti azt, hogy a gimnáziumban nem kell feladatunknak tekintenünk e szavak jelentésének, ill. egyes eszközök működésének magyarázatát.

Véleményem szerint nem tekinthetünk el a hő, a hőmérséklet értelmezésétől: ismertetnünk kell, mit és hogyan mér a hőmérő. Ha ezeket nem tesszük meg, akkor a hőtant csak a fizika egy teljesen különálló fejezeteként tudjuk tárgyalni. Akkor biztosan nem lehet bemutatni, de még csak érzékeltetni sem, hogy miért vált a termodinamika minden természettudomány, a kémia, a biológia, a csillagászat, stb. egyik legfontosabb fejezetévé.

Tudott dolog, hogy minden kémiai folyamat energiaváltozással járó folyamat, amelyekben a kiindulási rendszer hőmérséklete ritkán azonos a végső rendszer hőmérsékletével. Az exoterm és endoterm folyamatok leírásakor feltétlenül szükség van a hőmérséklet és a „melegebb", „hidegebb" szavak pontos, mindenki által azonosan értett jelentésére. Ugyanigy a felszabaduló, a környezetnek átadott, vagy attól felvett energia fogalmára is. Közismert tény pl. az is, hogy a kémiai reakciók csak meghatározott hőmérsékletnél magasabb hőmérsékletű környezetben mennek végbe. Ennek magyarázata nem a hőtan keretébe tartozik és nem a termodinamika módszereivel történhet?

A biológiában is lépten-nyomon termodinamikai feladatok megoldásával találja szemben magát a kutató. Ilyenek sorozatából áll pl. az anyagcsere folyamatok leírása és értelmezése, vagy annak megértése, hogy hogyan, mi módon oldja meg a természet egy élő szervezet hőmérsékleti stabilitását annak ellenére, hogy az termodinamikai szempontból nyitott, nem egyensúlyi rendszer.

A Föld légkörének kis hőmérsékleti (kb. −50 °C—+50 °C) intervallumban való ingadozásának magyarázata a geológusok feladata. Az ebből származó következményekkel a biológia foglalkozik. A Nap energiájának felhasználásával alakult ki az élet a Földön, ezzel is a biológusok foglalkoznak, de hogy miből származik ez az energia, mi az oka a néhány milliárd éve nagyjából változatlan erősségű sugárzásnak — ezt, mi sem természetesebb — a csillagászok vizsgálják.

Hosszan lehetne még sorolni példákat, amelyekben hőmérséklet, ill. energiaváltozással járó folyamatok mennek végbe, amelyek lényegének magyarázatához termodinamikai ismeretek szükségesek. Tehát feltétlenül olyan módon kell a fizikának (?) ezt a fejezetét tanítani, hogy az ott szerzett ismeretek a hőtantól látszólag távoleső területeken is alkalmazhatóak legyenek. Talán ennyi is elég annak érzékeltetésére, hogy a hőtan nem a fizika egyik fejezete, hanem a természeti folyamatok leírásának egyik legfontosabb, legáltalánosabb módszere.

Ha a megértésnek, ill. a megértetésnek ezt a nagy feladatát vállaljuk magunkra a hőtan tanításakor, akkor teljesen világossá válik, hogy elégtelen a hő, a hőmérséklet fogalmainak óvodából magunkkal hozott körülbelüli ismerete.

A hőtan tanításának egyik célja tehát az kellene, hogy legyen, *hogy ezek a fogalmak* oly mértékben tisztázódjanak, hogy *más tudományokban is használhatóakká váljanak.*

A hőtan tanítása során annak is ki kell derülnie, hogy a hőtan módszerei és vizsgálati tárgyai mennyiben azonosak, ill. mennyiben különböznek a mechanikáéitól. Elgondolkodtathatjuk tanítványainkat azon a csodálatos tényen, hogy egy tartályban levő gáz molekuláival sem történik semmi más melegítéskor vagy hűtéskor, mint egy billiárdasztal golyóival játék közben. Mégis — és ezen okkal lehet csodálkozni —, a sok (10^{23}) részecskéből álló ilyen rendszerben ez minőségileg új eredményre vezet.

Elvileg teljesen pontosan meg tudnánk mondani bármely molekula sebességének, impulzusának, energiájának időbeli változását az ütközések során. A 10^{23} nagyságrendű hely és impulzus adat mérése és a köztük levő összefüggések keresése azonban reménytelenül nehéz feladat. Szerencsére ez nem is baj, mert vannak a rendszernek olyan makroszkopikusan mérhető adatai, amelyek önmagukban is joblan jellemzik a rendszer, mint a 10^{23} adat együtt. Ilyen például a hőmérséklet is.

A fentiekből érezhető, hogy a hő, a hőmérséklet fogalmak megértését a mikroszkopikus szerkezet megértésétől várhatjuk, a mikroszkopikus és makroszkopikus adatok és tulajdonságok közötti kapcsolatok feltárásával.

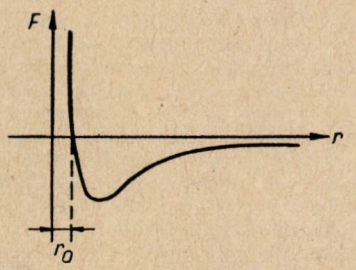
Természetesen a mikroszkopikus sokaságra vonatkozó adathalmazt a statisztika, a valószínűségszámítás módszereivel kell kezelnünk. Ugyanis nem sok gyakorlati értelme lenne egyetlen molekula sebességéből, impulzusából a makroszkopikus sokaság bármilyen tulajdonságára következtetni. A rendszert tehát csak az alkotórészei adatainak valamilyen átlagával lehet jellemezni.

A hőtan tanításának tehát másik feladata annak bemutatása lehet, *hogy a molekulák (atomok, ionok) mely adataiból és hogyan értelmezhetőek a makroszkopikus állapothatározók.*

Ezek nem új felfedezések. Maxwell (1831—1879), Boltzmann (1844—1906), Clausius (1822—1888) és Thomson (1824—1907) munkássága óta tudjuk, hogy a felsorolt mennyiségek között milyen kapcsolatok vannak. Csak a középfokú oktatás, ismeretlen okból kifolyólag, nem akar ezekről tudomást venni.

A belső energia

Talán a legfontosabb és a legegyszerűbben megérthető fogalom az előzőek közül. Megközelítése azért sem nehéz, mert a kémia órákon már megtanulták a gyerekek, hogy az anyag mozgó részecskékből áll. Ennek bizonyítékául a már szintén tanult diffúzió és ozmózis jelenségeit említhetik. A kémiai reakciók mechanizmusának értelmezésekor pedig a molekulák mozgásától egyáltalán nem lehet eltekinteni. Így a Brown-mozgás bemutatása biztosan élményszerű lesz ugyan, de maga a molekulák mozgásának ténye nem fog a meglepetés erejével hatni a gyerekekre.



1. ábra

A molekulák állandó mozgásából következik az a tény, hogy minden molekulának van mozgási energiája. A hőtan egyik legelső megállapítása lehet az, hogy az ideális gázok molekulái mozgási energiájának összegét a gáz belső energiájának nevezzük. Ez az energia természetesen különbözik a test más testekhez viszonyított mozgásából származó mozgási energiájától. Egy kiterjedt test haladó mozgásakor részecskéi azonos irányú és nagyságú sebességgel mozognak. A belső energia a részecskék rendezetlen mozgásából származik és az előzőre — amennyiben ilyen van — szuperponálódik.

A valódi rendszerek (reális gázok, folyadékok, szilárd testek) részecskéi egymással el nem hanyagolható kölcsönhatásban vannak. Ebből következően van egymáshoz viszonyított helyzeti energiájuk is. Ezt a belső energiához hozzá kell érteni.

Itt említhetjük meg azt is, hogy egy erőtérben levő részecske stabilan olyan helyen található, ahol a környezetéhez viszonyított helyzeti energiája minimális (r_0). Ebből a grafikonból sok fontos anyagi tulajdonság leolvasható. Pl. az, hogy összenyomáskor, térfogatcsökkenéskor igen ellenállóak az anyagok, nagy külső erő szükséges az alakváltoztatáshoz. (Ennek kvantummechanikai okai vannak.) Látható továbbá az is, hogy a nyújtáshoz szükséges erő kis távolságban arányos a távolsággal, nagy távolságban rendkívül gyenge, stb.

Visszatérve a belső energia fogalmához: *egy test belső energiája termodinamikai szempontból az őt felépítő részecskék egymáshoz viszonyított helyzeti és mozgási energiájának összegéből áll.* Az anyagban levő egyéb energia fajták a hőtani folyamatoknál nem játszanak szerepet. a hozzájuk tartozó szabadsági fokok be vannak fagyva, Felszabadításukhoz nagyságrendekkel nagyobb energia szükséges, mint ami a hőtani folyamatoknál előfordul. Az összenyomás után tágúló gáz, a kinyújtott vagy összenyomott rugó makroszkopikusan belső energiájának rovására végez munkát a környezetén. De . . ., egy melegebb testtel való érintkezéssel vagy szén, világítógáz, stb. elégetése közben a melegítés okozta tágulás is belső energia változást eredményez!

Az első három példa tárgyalható a mechanika keretei között, a negyedik azonban — noha a végeredmény ugyanaz, mint az első három esetben — tipikusan hőtani probléma. Az utolsó kettő pedig — a történelmileg kialakult felosztás szerint — a kémia tárgykörébe tartozik. Közös bennük a belső energia megváltozása. Az első három esetben ezt mechanikai úton, a többiben nem mechanikai úton hoztuk létre.

Ehhez hasonló jelenségek elemzése után könnyen megfogalmazható a hőtan I. főtétele, mely az ilyen típusú tapasztalatokat az alaptörvény erejével foglalja össze.

A hőmérséklet fogalma

A jelenlegi közép- és alsófokú oktatásban az egyik legelnagyoltabb, legpontatlanabb fogalom. Értelmezését a legtöbb középiskolai tankönyv meg sem kísérli. S bár alig van a hőtan tanítása közben olyan mondat, amelyben a hőmérséklet szó ne szerepelne, értelmét, jelentését mégsem kutatjuk. Úgy teszünk, mintha magától értetődő volna. Pedig még annyira sem szemléletes, mint a hosszúság.

Ennek az alapvetően fontos fogalomnak tartalommal való megtöltésében segíthet pl. a következő kísérlet elemzése.

Egy levegővel telt lombik hosszú csőben folytatódik. A csőben egy csepp Hg választja el a lombikban levő levegőt a külső levegőtől. (A szobahőmérsékletű levegőben a molekulák elég távol vannak egymástól ahhoz, hogy a levegőt ideális gáznak tekinthessük.) Amikor a Hg csepp egyensúlyban van, akkor a rá ható erők eredője nulla. A Hg csepp egyensúlyát pedig úgy értelmezhetjük, hogy a csepp mindkét oldalára egyenlő idők alatt átlagosan egyenlő nagyságú lökés érkezik a bezárt és a külső gáz molekuláitól egyaránt.

A lombiknak, valamint a benne levő levegőnek a környezetével való ilyen kölcsönhatását egyensúlyi állapotnak minősíthetjük. Ha a külső levegőt valamilyen alkalmasan választott más környezettel cseréljük fel (pl. pohár víz, vagy a kezünk), akkor létrehozhatunk olyan állapotokat, amelyekben a Hg csepp a lombik felé *(2a. ábra)*, ill. attól távolodva *(2b. ábra)* mozdul el egy újabb egyensúlyi helyzetbe.

A Hg csepp egyensúlyi helyzetének felborulása úgy értelmezhető, hogy a külső és belső levegő molekulák által okozott lökések ($m\Delta\vec{v}$) egyenlő idők alatt nem egyenlítik ki egymást. Az *a)* esetben a belső lökések erőssége csökkent, *b)* esetben növekedett. A jelenség okát ugyanis csakis a bezárt gáz állapotának megváltozásában érdemes keresni, hiszen a külső levegővel nem történt semmi.

Ha viszont a belső lökések nagysága csökkent, akkor ez csak a bezárt levegő molekulák sebességének csökkenésével magyarázható.

Ennek megértetésére felhasználtuk a centrális, rugalmas ütközésekről és a mechanika alapjairól tanultakat. Eszerint az egyenlő tömegű testek ütközéskor sebességet cserélnek, ha pedig az egyik test tömege sokkal nagyobb a másikénál, akkor a kis tömegű test sebességének merőleges komponense ellenkező irányúvá válik. Mivel $\vec{F}\Delta t = \Delta(m \cdot \vec{v})$, ill. mivel az ütközés közben a molekula tömege nem változik, $\vec{F} \cdot \Delta t = m\Delta\vec{v}$. $\Delta\vec{v} = \vec{v} - \vec{v}_0$, a feltétel miatt $\vec{v}_0 = -\vec{v}$, és így $\Delta\vec{v} = 2\vec{v}$. Tehát $\vec{F}\Delta t = 2m\vec{v}$. Ezért, ha F csökken, az csak a molekula sebességének, ill. a molekulák átlagsebességének csökkenésével magyarázható. Ha pedig F nő, akkor természetesen v lett nagyobb. Mitől is? Mint már említettük, a lombik környezetének változása miatt.

A makroszkopikus egyensúlyt tehát a bezárt és a külső molekulák átlagsebességének azonosságával, a tágulást a bezárt gáz molekulái átlagsebességének növekedésével, az összehúzódást pedig a bezárt gáz molekulái átlagsebességének csökkenésével tudjuk magyarázni. Ha pedig egy ideális gáz molekuláinak átlagsebessége nő, akkor a belső energiája nő, ill. ha a molekulák átlagsebessége csökken, akkor csökken a gáz belső energiája is. Vagyis az előbbi folyamatban *a)* esetben a gáz belső energiája csökkent, *b)* esetben pedig növekedett.

Hová lett a hiányzó energia, ill. honnan nyert energiát a gáz? Ennek — mint többször is említettük — a környezet változásában kereshetjük az okát.

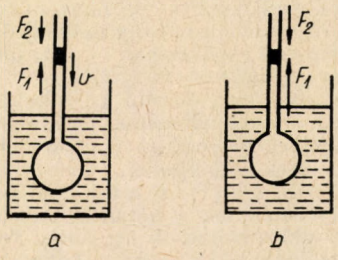
Összegezve tehát az eddigi tapasztalatokat: vannak testek, amelyek, ha egymással érintkeznek energiát adnak át egymásnak. A mi *a)* esetünkben a lombik adott energiát a víznek, *b)* esetben pedig a víz adott energiát a lombikban levő levegőnek.

Sorba rendezzük a testeket!

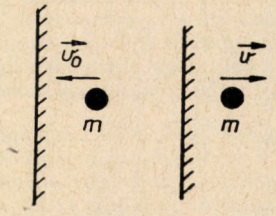
Az előbb ismertetett módon — elvileg — valamennyi testet kölcsönhatásba lehet hozni egymással. Meg lehet állapítani — ezzel, vagy egyéb módszerrel —, hogy az érintkező testek közül melyik ad át energiát a másiknak. Így a testeknek egy olyan rendezett halmaza jön létre, amelyben minden test a tőle jobbra levőtől energiát kap, a tőle balra levőnek pedig energiát ad át. Megállapodás szerint azok a testek, amelyek között eredő energiacsere nincs, a sorozat azonos helyére kerülnek.

Heuréka!

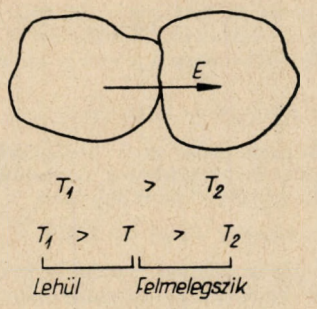
Ha megérintjük pl. az *a)* kísérletben szereplő lombikot és vizespoharat, azt mondjuk — gyermekkorban szerzett ismereteink alapján —, hogy a víz hidegebb, mint a lombik. A *b)* kísérletben szereplő víz érintése



2. ábra



3. ábra



4. ábra

után pedig azt melegebbnek nevezzük a lombiknál. Így tehát találtunk egy olyan makroszkopikusan észlelhető tulajdonságot, mely változásához a hőmérséklet fogalmát hozzákapcsolhatjuk. Azt találtuk, hogy *a hőmérséklet a testek állapotának az a jellemzője, melynek különbözősége az érintkező testek között energia átadással járó folyamatot indít meg.*

Az előző megállapítás tulajdonképpen a 0. főtétel, mert az is benne van, hogy *ha két érintkező test között energia átadás nincs*, azaz termikus egyensúlyban vannak, *akkor* azt mondjuk, hogy *azonos a hőmérsékletük*. Ezt a tételt először Caratheodory fogalmazta meg 1909-ben. Mindez magában foglalja azt a köznapi tapasztalatot is, hogy ha két érintkező test hőmérséklete különböző, akkor a közöttük lezajló folyamatok következtében végülis azonos hőmérsékletűekké válnak. *(A folyamat* meghatározott irányú, *irreverzibilis:* mindig a kiegyenlítődés irányában megy végbe.) A végső hőmérséklet a kezdetiekkel pedig a — szintén jól ismert — következő kapcsolatban van: *4. ábra* Vagyis az energia áramlás a két test között egyirányú és a termikus egyensúly létrejöttéig tart.

Mivel mérjük?

Miután elvileg tisztázódott a belső energia, a hőmérséklet fogalma, a belső energia változás és hőmérsékletváltozás folyamata, el lehet kezdeni gondolkodni azon, hogy mivel és hogyan lehetne mérni a hőmérsékletet. Hőmérő ugyanis nincs készen a természetben, mint pl. a méterrúd. A hőmérő elkészítésénél tudni kell, mit és milyen kölcsönhatásokra alapozva akarunk mérni.

Ezek után legkézenfekvőbb volna a hőmérsékletet úgy definiálni, hogy az legyen arányos az egy molekula átlagos mozgási energiájával. Ez azonban, sajnos, bármennyire egyértelmű kapcsolatban is van a hőmérséklet nevű makroszkopikus tulajdonsággal, mérésre mégsem alkalmas.

A probléma megoldásában további tapasztalatok segítenek. Régi megfigyelés, hogy hőmérsékletváltozás esetén az anyagok sok makroszkopikus tulajdonsága változik meg. Pl. a színük, sűrűségük, a gázok nyomása stb. Ezek közül bármelyik felhasználható a hőmérséklet mérésére. Bármely anyag, bármely hőmérsékletváltozással változó tulajdonságát felhasználhatjuk a hőmérséklet mérésére. Így tetszésszerinti számú empirikus hőmérsékleti skálát készíthetünk.

A mindennapi gyakorlatban — mint ismeretes — az alkohol, ill. a higany térfogatváltozását használjuk hőmérsékletmérésre leggyakrabban. A tudományos élet azonban a sok lehetőség közül természetesen olyan anyag olyan tulajdonságát kereste, amely tulajdonság változása legkevésbé függ a konkrét anyagi minőségtől. Ezért a legegyszerűbb szerkezetű anyagot, az ideális gáz állapotú anyagot választotta hőmérője anyagául. A hőmérséklet mérésére az ideális gáz térfogatváltozását választotta, mert — mint ismeretes —, a különböző anyagi minőségű ideális gázok azonos külső körülmények közötti térfogatváltozása azonos. A megfelelő tulajdonság kiválasztásában ugyanis lényeges szempont az, hogy olyan hőmérséklettől függő tulajdonsággal mérjük a hőmérsékletet, amely a hőmérséklet változások közben folyamatosan változik, és a változás nem irreverzibilis. Pl. nem égethetnénk el a hőmérő anyagát, mert egy ilyen hőmérőt csak egyetlen egyszer lehetne használni.

Megállapodás szerint tehát a hőmérsékletváltozást ideális gáz térfogatváltozásával regisztráljuk. (Ismeretes, hogy minden anyag eljuttatható ideális gáz állapotba, ha jóval magasabb a hőmérséklete, mint az adott nyomáson mért forráspontja.) Az első levegővel működő hőmérőt Galilei készítette 1592-ben.

A mérés alapelve

A már idézett 0. főtétel, mely szerint az érintkező testek hőmérséklete azonos.

A mérőeszköz mértének megválasztásakor ezért ügyelni kell arra, hogy mérés közben a hőmérő ne vonjon el, vagy ne adjon át túl sok energiát a mérendő testnek a hőmérsékleti egyensúly beálltáig, mert akkor a mért közös hőmérséklet és a mérendő hőmérséklet lényegesen eltér egymástól. A mérendő és a végső egyensúlyi hőmérséklet nem nagyon különbözhet egymástól. A következő feladat annak kitalálása, *hogyan mérjünk?* (Skálatörvény, egységválasztás, zéruspont meghatározás.)

A természetből ugyanis nem olvasható ki, hogy mekkora térfogatú gáznak, milyen állapotában kell azt mondanunk, hogy a hőmérséklet éppen most pl. 15°. Csak annyi biztos, hogy adott tömegű gáz esetén, ha növekszik a hőmérséklet, akkor a térfogat is növekszik. Vagyis ha $T_1 > T_2$, akkor $V_1(T_1) > V_2(T_2)$. Szerencsére $V(T)$ egy szigorúan monoton függvény. Tehát minden T-hez tartozik V. De ez még nagyon sokfajta $T(V)$ hozzárendelést tesz lehetővé. Megállapodhatnánk pl. abban, hogy a $T(V)$ legyen $T = V^2$, vagy akár $T = 5{,}3^V$ alakú függvény. A kölcsönös egyértelműség mindkét esetben biztosítva volna.

Szerencsésnek bizonyult, hogy a legegyszerűbb összefüggést fogadták el: V és T kapcsolatát lineárisnak választották.

$$V_1/V_2 = T_1/T_2.$$

Ez azt jelenti, hogy akkor mondjuk, hogy a hőmérséklet $2\times$, $3\times$ nagyobb lett, ha az adott tömegű gáz térfogata $2\times$-esre, ill. $3\times$-osra növekedett állandó nyomáson.

További megállapodás tárgyát képezi az is, hogy mekkora hőmérsékletváltozást nevezzünk 1°-nak, vagyis, hogy mikor mondjuk, hogy 1°-kal nőtt, vagy csökkent a hőmérséklet.

Még mielőtt ezt eldöntötték volna, felhasználták azt a régebbi tapasztalatot, hogy halmazállapotváltozás közben minden anyag termodinamikailag mindig adott és reprodukálható állapotban van. A bármilyen anyagú hőmérőt ilyen állapotú anyaggal kapcsolatba hozva, azok érintkezéskor mindig azonos értéket mutattak. Ezért választhatták a víz fagyás- és forrásának termodinamikai állapotát a hőmérsékleti skála alappontjaiként. Figyelembevéve a már kialakult gyakorlatot, a két állapot közti hőmérsékletkülönbséget 100°-nak választották.

Végül, a *hőmérsékleti skála zéruspontjának* ésszerű megválasztása érdekében végezzük el a következő kísérletet. Vegyünk egy kis átmérőjű üvegcsövet. A benne levő levegő oszlopot egy higany csepp zárja be. Erősítsük rá ezt a csövet egy átlátszó, pl. plexi milliméter beosztású vonalzóra. Ha ezt a csövet olvadó jégbe tesszük, megfigyelhetjük, hogy az egyensúly beállta után a térfogat minden méréskor ugyanaz, és mindaddig amíg a cső az olvadó jég—víz keverékben van, változatlan. (Összhangban a fent említett megfigyeléssel.) Ezt a térfogat értéket leolvassuk. Tegyük ezután a csövet forrásban levő vízzel telt küvettába, és mérjük meg abban is a bezárt levegő térfogatának nagyságát. Az előző megállapodásunk miatt a térfogat és a hőmérséklet kapcsolata:

$$\frac{V_{forr}}{V_{olv}} = \frac{T_{forr}}{T_{olv}}.$$

Átalakítva a kifejezést:

$$\frac{V_{forr} - V_{olv}}{V_{olv}} = \frac{T_{forr} - T_{olv}}{T_{olv}}.$$

Mérési adatainkat behelyettesítve a baloldalra — bármilyen kezdeti levegő térfogattal dolgozunk is —:

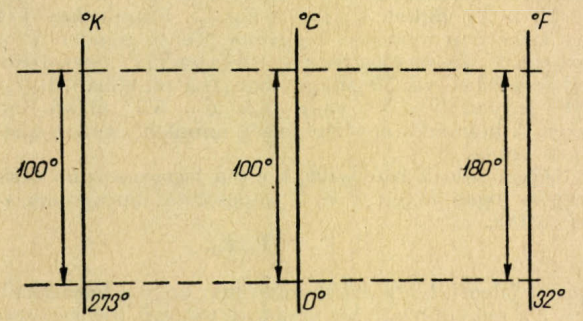
$$0{,}3663 = \frac{100°}{T_{olv}}.$$

Innen pedig

$$T_{olv} = \frac{100°}{0{,}3663} \sim 273°.$$

Hőmérsékleti skálák

Ha ezt az értéket fogadjuk el az olvadó jég hőmérsékleteként, akkor az abszolút hőmérsékleti skálához jutunk. Ha pedig az olvadó jég hőmérsékletét 0°-kal jelöljük, és a víz fagyásának és forrásának hőmérsékletkülönbségét továbbra is 100°-nak választjuk, akkor a Celsius-féle hőmérsékleti skálához jutunk. A termodinamika törvényei az abszolút hőmérsékleti skálán kifejezve a legegyszerűbbek, így a tudományos élet azt használja. A mindennapi életben Európában a Celsius-féle hőmérsékleti skála terjedt el, Észak-Amerikában és Angliában pedig — mint ismeretes —, a Fahrenheit-féle hőmérsékleti skálát használják. Ez utóbbi szerint a jég olvadáspontja 32°, és a víz fagyáspontjának és forráspontjának hőmérsékletkülönbségét 180°-ra osztották be. Az említett hőmérsékleti skálák egymás mellett:



5. ábra

Az itt leírtak megtanítása általános tantervű III. gimnáziumi osztályokban mindössze 6 tanítási órát vett igénybe. Ezek után a tankönyvi anyag feldolgozása lényegesen könnyebben, jobb hatásfokkal történt, mint máskor. Természetesen ebben a felépítésben a V/T = áll. a p = áll. feltétel mellett, ilyen előzmények után nem törvény, hanem definíció. Egyébként a tananyag további sorrendje és tartalma a jelenlegi tantervi anyag volt.

A hőmérséklet statisztikus értelmezése

Ezek után már nem okoz különösebb problémát. Azért sem, mert részletes leírása megtalálható a jelenlegi tagozatos III. osztályos tankönyvben, a kinetikai gázegyenlet levezetésekor. A $pV = 2/3\, N \frac{m^*\bar{v}^2}{2}$ összefüggésnek az ideális gázok állapotegyenletével való összehasonlítás után ($pV = NkT$) a tagozatos tankönyvben megtalálható a $2/3\, N \frac{m^*\bar{v}^2}{2} = NkT$ egyenlőség. Ebből pedig minden nehézség nélkül kiolvasható, hogy egy molekula átlagos mozgási energiája: $3/2\, kT$. Ez pedig végre módot ad a hőmérséklet statisztikus értelmezéséhez, méghozzá teljes összhangban a fejtegetéseink elején óhajtottakkal! Látható, hogy a hőmérséklet lényegében energia, méghozzá a belső energiához szorosan kapcsolódó állapothatározó. Sőt, mivel az idézett utolsó kifejezést ideális gázokra kaptuk, ott pedig minden részecskének, atomnak 3 szabadsági foka van, a hőmérséklet úgy is értelmezhető, mint az egy szabadsági fokra jutó átlagos mozgási energia. (Ezért volt szerencsés a lineáris kapcsolat választása.) A k Boltzmann-állandó csak azért lép fel, mert T egységét önkényesen választottuk, nem a Joule-egységet fogadtuk el.

Úgy gondolom, az új tantervek kidolgozása közben, azok előkészítésének, csiszolgatásának idején is gondolkodnunk kell, hogyan lehet már most, az új tantervek végleges kidolgozása előtt végző tanulóinkat is jobb szemléletmódra tanítani. Nem volna szép tőlünk, ha nekik nem próbálnánk megmutatni a természet anyagi egységét, az újabb tudományos eredményeket.

IRODALOM

Papelekszi: Fizika.
Károlyházy—Marx—Nagy: Statisztikus mechanika.
Fényes Imre: Fizika és világnézet.
Fényes Imre: Termosztatika és termodinamika.
Novobátzky Károly: Statisztikus mechanika.
Feynman: Mai fizika I—IV.
Erdey-Grúz Tibor: A fizikai-kémia alapjai.
Budó—Pócza: Kísérleti fizika I.
Novobátzky Károly: Termodinamika.

ESEMÉNYEK

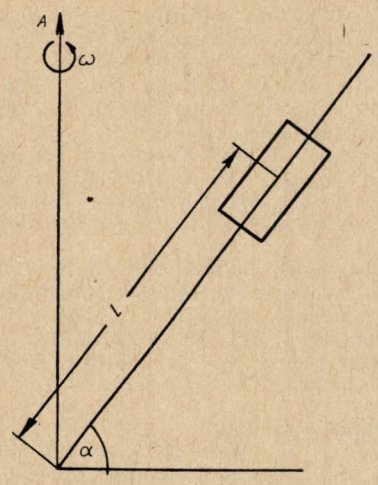
NEMZETKÖZI OLIMPIA AZ NDK-BAN

A VIII. Nemzetközi Fizikai Diákolimpiát a Német Demokratikus Köztársaság rendezte 1975. júl. 7—17. között Güstrowban. A barátságos kis iskolaváros — Berlintől északra 240 km-re különösen alkalmas volt egy ilyen rendezvény lebonyolítására. Nemrég kiépített tanárképző főiskolájában egyetlen helyen meg lehetett oldani az elszállásolás, étkezés és a verseny összes problémáit, a mecklenburgi táj műemlékeivel, erdőivel, tavaival kellemes hátteret biztosított a pihenő napokon. A kisváros nyugalma és csendje — ellentétben a fővárosok ideges mozgalmasságával — lehetővé tette, hogy a résztvevők erejüket a versenyre koncentrálják. Ugyanekkor tanulságos kultúrtörténeti és szakmai kirándulások Schwerinbe, Rostockba és befejezésül Berlinbe, jól egészítették ki a programot.

Az Olimpián ezúttal 9 ország képviseltette magát 5—5 tagból álló versenycsapattal és 2—2 vezetővel: Bulgária, Csehszlovákia, Franciaország, Lengyelország, Magyarország, a Német Demokratikus Köztársaság, a Német Szövetségi Köztársaság, Románia és a Szovjetunió. A magyar csapatot Kunfalvi Rezső és Tichy Géza vezette.

A már korábban kidolgozott és elfogadott Statutum szerint a verseny két napon zajlott le (júl. 9. és 11.). Az első napon 3 elméleti, a második napon egy gyakorlati feladatot kellett megoldani. A feladatok szövegét a vezetők előtte való nap este megkapták angol, francia, német és orosz nyelven, és szükség szerint lefordították a saját nemzeti nyelvre. A feladatoknak fel kell ölelniük a fizika főbb diszciplínáit olyan szinten, ahogy azt a középiskolákban általában világszerte tanítják. A feladatkitűző bizottság mindig a rendező ország szakembereiből (fizikusokból, egyetemi és középiskolai oktatókból) áll. A feladatok ezúttal a következők voltak:

1. A függőleges A tengelyen $\pi/2 - \alpha$ szögben egy kart rögzítünk úgy, hogy a rendszer az A tengely körül ω szögsebességgel forogjon *(1. ábra)*. A karra G = mg súlyú testet helyezünk, amely a karon μ tapadási súrlódási



1. ábra

együtthatóval mozoghat ($\mu = \operatorname{tg} \beta$, β a súrlódási szög).

a) Tegyük fel, hogy $\omega = 0$. Milyen α szögre lesz a test nyugalomban, és milyen α szögnél mozdul el?

b) Tegyük fel, hogy a test állandó ω szögsebességgel forog. A forgás közben az α szög nem változik. Milyen helyzetekre van a test a karhoz képest nyugalomban?

Használjuk fel a következő összefüggéseket:

$$\sin(\alpha \pm \beta) = \sin\alpha \cos\beta \pm \cos\alpha \sin\beta,$$

$$\cos(\alpha \pm \beta) = \cos\alpha \cos\beta \mp \sin\alpha \sin\beta.$$

2. Egy vastag lencse fókusztávolságát a levegőben a következő képlet adja meg:

$$f = \frac{nr_1r_2}{(n-1)\,[n(r_2 - r_1) + d(n-1)]},$$

ahol n a törésmutató, r_1 és r_2 a görbületi sugarak, d a lencse vastagsága.

Vegyük észre *(2. ábra)*, hogy $r_i > 0$ azt jelenti, hogy a görbületi középpont M_i az S_i-től jobbra fekszik, $r_i < 0$ azt jelenti, hogy a görbületi középpont M_i az S_i-től balra fekszik ($i = 1,2$).

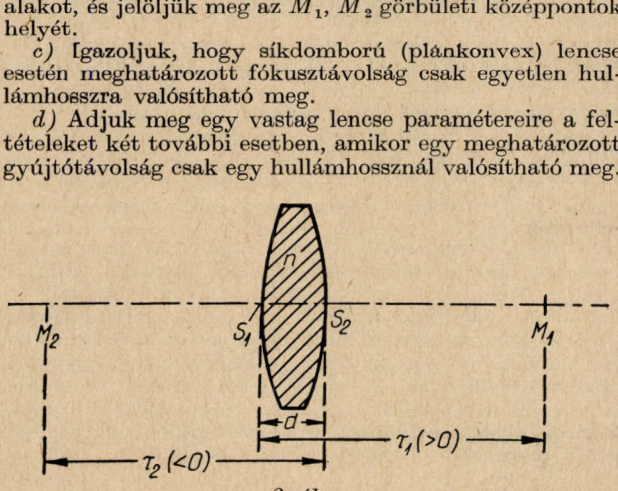
Egyes alkalmazások esetén szükséges, hogy a fókusztávolság ne függjön a hullámhossztól λ-tól.

a) Hány különböző hullámhosszra lehet a fókusztávolság ugyanakkora?

b) Állapítsunk meg olyan összefüggést r_i, d és a törésmutató között, melyre a fókusztávolság megkívánt függetlensége a hullámhossztól teljesíthető. Diszkutáljuk az összefüggést. Rajzoljunk meg egy lehetséges lencsealakot, és jelöljük meg az M_1, M_2 görbületi középpontok helyét.

c) Igazoljuk, hogy síkdomború (plánkonvex) lencse esetén meghatározott fókusztávolság csak egyetlen hullámhosszra valósítható meg.

d) Adjuk meg egy vastag lencse paramétereire a feltételeket két további esetben, amikor egy meghatározott gyújtótávolság csak egy hullámhossznál valósítható meg.



2. ábra

Vegyük figyelembe a fizikai és geometriai adottságokat!

3. Oldjuk meg a következő ionoptikai problémát (síkprobléma)!

A Q pontból kiinduló egyenlő (állandó) m tömegű pozitív, $+e$ töltésű, egyszeresen ionizált ionok divergens sugárnyalábot alkotnak. Az ionokat U feszültség gyorsította fel, s homogén B mágneses tér téríti el, amely a sík mögül mutat merőlegesen kifelé.

A mágneses tér határvonala legyen olyan, hogy az eredetileg divergens ionok konvergens sugárnyalábként A pontban metszik egymást ($QA = 2a$). Az ionok pályája szimmetrikus a QA felező merőlegesére. A mágneses teret határoló lehetséges vonalak közül azt vizsgáljuk, amely összefüggő mágneses teret ad a felezőmerőleges környezetében, a Q és az A pontok pedig a mágneses téren kívül fekszenek.

a) Adjuk meg az ionpályák görbületi sugarát R-et, mint U és B függvényét!

b) Adjuk meg az ionpályák jellemző tulajdonságait a fenti elrendezésben!

c) Határozzuk meg geometriai szerkesztéssel a mágneses tér határvonalát az $R \gtreqless a$ esetekben!

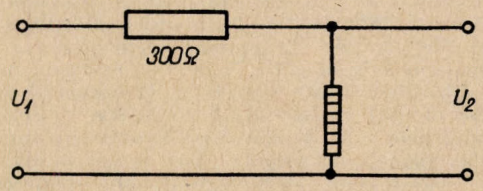
d) Írjunk fel általános egyenletet a mágneses tér határára!

4. (Gyakorlati feladat). Oldjuk meg az alábbi feladatokat a munkahelyen található alábbi eszközökkel:

Félvezető (vörös színű), tolóellenállás (140 ohm), állandó ellenállás (300 ohm), feszültségforrás, 2 db univerzális műszer, vezetékek.

a) Mérjük meg a félvezető áram-feszültség karakterisztikáját oly módon, hogy a legnagyobb megadott teljesítményveszteség 250 mW legyen. Készítsünk táblázatot és rajzoljuk fel a görbét. A mérés előtt jól gondoljuk meg, hogy hogyan kerülhetjük el biztosan a félvezető túlterhelését, és rögzítsük indokainkat a jegyzőkönyvben. Adjuk meg a kiválasztott elrendezés kapcsolását, és diszkutáljuk a kapcsolásnál előforduló szisztematikus hibákat!

b) Számítsuk ki a félvezető differenciális (dinamikus) ellenállásainak értékeit 25 mA-nél!



3. ábra

c) Mérjük meg a *3. ábrán* feltüntetett kapcsolás felhasználásával U_2 kimenőfeszültség függését az U_1 bemenőfeszültségtől, és tüntessük fel a mérési eredményeket táblázatban és grafikonon! U_1 bemenőfeszültség értékét 0 – 9 V között változtassuk. A félvezetőt úgy kell beiktatni az áramkörbe, hogy U_2 minél nagyobb legyen. Tüntessük fel a jegyzőkönyvben a teljes áramkör vázlatát, és magyarázzuk meg a mérések eredményét!

d) Mennyivel változik az U_2 kimenőfeszültség, amikor az U_1 bemenőfeszültséget 7 V-ról 9 V-ra emeljük? Fűzzünk kvalitatív indokolást is a $\Delta U_1/\Delta U_2$ viszonyhoz!

e) Milyen típusú a félvezetőnk? Mire lehet felhasználni a gyakorlatban a vázolt kapcsolást?

Figyelem! A műszereket csak voltmérőként és ampermérőként használjuk! Pontosságuk 2,5%. Adataikat táblázat tünteti fel. *Az eszközöket a legnagyobb óvatossággal kezeljük!*

Mint látjuk, a feladatok igényesek, modernek és érdekesek. Annak a rendszernek, hogy minden évben más nemzeti bizottság dolgozza és tűzi ki azokat, vannak határozott előnyei. Változatosság, eltérő nézőpont megismerése tapasztalatcseréhez vezet. Az elmúlt években akadt néhány nem szerencsés, ellentmondásos, „hibás" feladat is. (Egyesek ugyan azt tartják, hogy hibás, megoldhatatlan feladat nincs: ilyen esetben az a helyes meg-

oldás, ha kimutatják, hogy a feladat megoldhatatlan, vagy ellentmondó. Ezt azonban nem tartjuk ideális esetnek egy nemzetközi versenyen!) Az NDK-ban kitűzött példák kifogástalanok voltak. Legfeljebb azt lehetne felróni, hogy a szövegük hosszadalmas. A feladatokat nálunk inkább szokásos tömörebb fogalmazásban és a megoldás diszkusszióját közli a Középiskolai Matematikai Lapok Fizika Rovata az 1975. évi 8—9. számban Vermes Miklós tollából. A delegációk vezetőiből álló Nemzetközi Bizottság a kitűzést a verseny előtt megvitatja és verseny eredményét eldönti. Irányításul szolgál egy közösen összeállított tematika, mely lényegében az érdekelt országok középiskoláiban tanított anyagot foglalja össze röviden. Az egységesítés problémáját nyilván az ilyen tematika sem oldja meg teljesen, mert a fejezetek felsorolása nem ad felvilágosítást a tárgyalás mélységére vonatkozólag. Ahol azonban a fiatalok legjobbjai mérik össze erejüket, ott többet lehet kívánni, mint az átlagos tankönyvek anyagát. Az NDK feladatok esetében is kérdezni lehet, hogy kell-e ismerni a vastag lencséket, vagy a Zener-diódát, vagy mágneses lencsét, de a szöveg elegendő adatot tartalmazott ahhoz, hogy a versenyzők logikus gondolkodással a megoldás lényegét megtalálják. A verseny külső körülményei, terem, elkülönítés, objektív feltételek, lebonyolítás kifogástalan volt. Megjegyezzük, hogy az elektromos műszereket az NDK tanszervállalata kölcsönként bocsátotta rendelkezésre (száznál több univerzális műszer!). Kifogástalanul működtek. Tudna-e ilyen teljesítményt a mi tanszergyártó vállalatunk produkálni?

Az egyes feladatok elbírálását külön bizottságok végezték, eredményeiket a csúcsbizottság összegezte a delegációvezetők ellenőrzése mellett. Egy-egy feladat teljes megoldásával 10—10 pontot lehetett nyerni. A gyakorlati feladat két egységnek számított: 10 pont járt a megoldás tervezéséért és diszkusszijáért, 10 pont pedig a technikai végrehajtásért. Így a teljes pontszám 50 lett volna. Ezt egyetlen versenyző sem érte el, ami érthető, hiszen az 5, ill. 4 és fél óra munkaidő az aránylag hosszú feladatok teljes megoldásához aligha volt elegendő. A ténylegesen elért legmagasabb pontszám 43 volt. A statutum szerint I. díjat azok a versenyzők kaptak, akik *ennek* legalább 90%-át (39—43 pontot), második díjat, akik legalább 78%-ot (34—38 pontot), III. díjat, akik legalább 65%-ot (28—33 pontot), végül dícséretet azok, akik legalább 50%-ot (22—27 pontot) értek el. A Nemzetközi Bizottság 7 első, 9 második, 12 harmadik díjat és 8 dícsérő oklevelet adott ki. A 45 résztvevő között ezúttal lány nem volt. Külön díjat kapott egy tanuló az I. feladat kiemelkedő megoldásáért és egy tanuló az elméleti feladatokban elért legmagasabb pontszámért.

A magyar csapat minden tagja díjat nyert: I. díjat Schmidt József (Esztergom, Dobó Katalin Gimn.), II. díjat Faragó Béla (Csongrád, Batsányi János Gimn.) és Szép Jenő (Budapest Veres Pálné Gimn.), III. díjat Györgyi Géza (Budapest, Fazekas Mihály Gimn.) és Virosztek Attila (Szolnok, Verseghy Ferenc Gimn.).

Bár hivatalos csapatverseny nincs, szokásos az elért eredményeket országonként feltüntetni, akár a sportolimpián. Eszerint: Bulgária 109 pont (1 dícséret), Csehszlovákia 146 (1 első, 1 második, 1 harmadik díj és 1 dícséret), Franciaország 144 pont (1 második, 2 harmadik díj és 1 dícséret), Lengyelország 164 pont (1 második és 4 harmadik díj), Magyarország 171 pont (1 első, 2 második és 2 harmadik díj), NDK 186 pont (3 első, 1 második és 1 harmadik díj), NSZK 97 pont (1 dícséret), Románia 13 pont (1 első, 1 második díj és 1 dícséret), SzU 176 pont (1 első, 2 második és 2 harmadik díj).

Érdemes összefoglalnunk a magyar versenyzők által az eddigi nyolc fizika olimpián elért eredményeket és a legnagyobb pontszámot elért csapatok sorrendjét:

1967. Varsó: I. Szalay Sándor, IV. Mihály László, VI. Marossy Ferenc. Magyarország 107, Lengyelország 104, Csehszlovákia 103 pont.

1968. Budapest: II. Takács László, III. Mihály László, IX. Marossy Ferenc. Magyarország 93, Csehszlovákia 85, Lengyelország 84 pont.

Ezután lépett életbe a statutum, mely a díjak elnyerését előre megszabott pontszámhoz köti, és így több első, második stb. díj kiadását teszi lehetővé.

1969. Brünn: I. díj: Kálmán Péter, Maróti Péter, Spitzer József; II. díj: Andor László, Horváthy Péter. Csehszlovákia 222, Magyarország 214, SzU 207 pont.

1970. Moszkva: II. díj: Keresztury András, Ormos Pál; III. díj: Nagy András, dícséret: Sailer Kornél; emléklap: Gyimesy Ferenc, Horváthy Péter. Szovjetunió 301, Csehszlovákia 238, Lengyelország 236, Magyarország 224.

1971. Szófia: I. díj: Tichy-Rács Ádám; II. díj: Mosó Tamás; III. díj: Gács Lajos, Iglói Ferenc; dícséret: Szabó Zoltán. Magyarország 197, SzU 192, Románia 184 pont.

1972. Bukarest: I. díj: Szabó Zoltán; III. díj: Eber Nándor, Imhof Gyula, Kövér András; dícséret: Gács Lajos. Románia 223,8, Magyarország 218, 4, SzU 216,6 pont.

1973. Olimpia nem volt.

1974. Varsó: I. díj: Meszéna Géza; III. díj: Pálfalvi György, Vladár Károly. Szovjetunió 150, Lengyelország 138, Magyarország 137 pont.

1975. Güstrow (NDK): I. díj: Schmidt József; II. díj: Faragó Béla, Szép Jenő; III. díj: Györgyi Géza, Virosztek Attila. NDK 186, SzU 176, Magyarország 171 pont.

A magyar versenyző diákok a nyolc olimpián 8 első, 8 második és 11 harmadik díjat nyertek. Az összpontszám szerint a magyar csapat 3 alkalommal volt első, 2 alkalommal második és 2 alkalommal harmadik. A Szovjetunió 2 ízben volt első, 2 ízben második és 2 ízben harmadik, Csehszlovákia 1 alkalommal első, két alkalommal második és 1 alkalommal harmadik. Az első három helyezett egyike volt Magyarország hétszer, a Szovjetunió hatszor, Csehszlovákia és Lengyelország négyszer, Románia kétszer, az NDK egyszer.

E rövid összehasonlítás után térjünk vissza a güstrowi olimpia eseményeire. A programot több kirándulás és társadalmi esemény egészítette ki. A vezetők részére a Népművelési Minisztérium és Güstrow városa adott fogadást, a tanulók résztvettek egy tánccal egybekötött úttörő tábortűzön és a Tanárképző Főiskola estélyén. A rendezés mindvégig kifogástalan volt. A minisztérium matematikai olimpiák rendezésében gyakorlatot szerzett, tökéletesen egybehangoltan dolgozó szervezőket bocsátott rendelkezésre, a főiskola tolmács, kísérő és kiszolgáló gárdát adott. A szállítást, étkezést, versenyt, kirándulásokat, szórakozásokat lebonyolító gépezet pontosan és hibátlanul, óraműszerűen működött. Kisebb eltolódásokat legfeljebb egy-két pontatlanságáról ismert versenyző okozott.

A díjakat ünnepélyes keretek között Dr. Postler miniszterhelyettes osztotta ki. A résztvevők nevében Györgyi Géza mondott német nyelven köszönetet. Az ünnepélyt színvonalas, rövid kultúrműsor egészítette ki.

A Nemzetközi Fizikai Olimpiai Bizottság a legközelebbi, 1976. évi, sorrendben IX. Nemzetközi Fizikai Diákolimpia rendezésére Magyarországot kérte fel. Megtisztelő, de nehéz feladat. Minden erőnket össze kell szednünk, ha a várakozásnak meg akarunk felelni. Nekünk sikerült 1968-ban első ízben 8 szocialista ország részvételét elérnünk, egyúttal a versenynek azt a formáját kialakítanunk, mely azóta mintául szolgált. Szervezés tekintetében a güstrowi olimpia kétségkívül újabb fejlődést jelentett. Az 1976. évi olimpia hivatott arra, hogy a résztvevők körét jelentősen bővítse. Mintául szolgálhat a Nemzetközi Matematikai Diákolimpia, melyen már évek óta 17—18 ország vesz részt. A verseny demonstrálni fogja fizikatanításunk színvonalát, és alkalmat ad összehasonlításra különböző országok legjobb fiataljainak, a tudomány jövő képviselőinek tudása között. Az olimpia találkozó egyrészt a tanulók, másrészt fizika pedagógusok részére. A résztvevők szélesebb köre hozzá fog járulni a verseny színvonalának növekedéséhez, egyúttal pedagógiai, kulturális értéke is növekedni fog. A magyar versenyzők kiképzése, előkészítése a szokott keretek között megindult és várjuk fizikusaink segítségét a nemzetközi esemény lebonyolításához. *K. R.*

GENETIKAI ISKOLA

Szeged, 1976. január 26-31.

Világjelenség — és bizonyára mélyebb okai vannak —, hogy az egyetemet fizikusi képesítéssel elhagyó fiatalok és a komoly eredményeket elért kutatók egyaránt intenzíven érdeklődnek a fizika és más tudományok határterületeinek megoldatlan problémái iránt. Talán a legtöbb fizikust napjaink sztár tudománya, a biológia vonzza.

Az MTA Szegedi Biológiai Központja és a József Attila Tudományegyetem Genetikai Tanszéki Csoportja az Eötvös Loránd Fizikai Társulattal közösen olyan témáról rendezett iskolát, amely a biológián belül is kitüntetett. A tudományos bulvársajtóban a genetikusok átvették a magfizikusok helyét; az atombomba fenyegetése helyett rákos sejtek génjeivel fertőzött baktériumok elszaporodásával rémítik az olvasót. Ugyanakkor a pszichózis kihasználásával szerzett anyagi támogatás valóban fontos célokra fordítódik: csak a genetika segítségével ismerhetjük meg az életjelenségek alapjait.

Az iskola szervezői nem akarták alábecsülni a hallgatóság teherbírását, rövid ebéd és vacsoraszünet közbeiktatásával napi 10 órában hallhattunk előadásokat. (A kiváló előadóknak köszönhető, hogy a fáradtság ellenére sem csökkent az érdeklődés). A genetikai gondolkodásmódot (és a genetikusok kiterjedt tudományos tolvajnyelvének alapszavait) a legegyszerűbb példán: a fágok és a baktériumok genetikai szabályzó rendszerén ismerhettük meg. Ezekben az esetekben látszott a közvetlen kapcsolat a molekuláris biológia és a genetika között. A bonyolultabb szervezetek működésének mikroszkopikus alapjairól a mai biológia kevesebbet tud mondani; úgy tűnik, hogy a kísérleti módszerek (kromoszómafestési eljárások, egyszerűbb és bonyolultabb mutációk valószínűségének mérése) egy magasabb absztrakciós szinten teszik lehetővé az egzakt kapcsolat megtalálását a genetikai információ és a megfigyelő számára látható jelenségek között. A „genetic engeneering"-ről, a vírusgenetikáról és az immungenetikáról hallott előadások bebizonyították, hogy a genetika alapjait már csak azért is érdemes elsajátítani, hogy az alkalmazások során felmerülő rendkívül érdekes kérdések lényegét megértsük.

A fizikus némi irígységgel állapíthatta meg, hogy a genetikában kitartó és figyelmes munkával még akkor is lehet komoly eredményeket elérni, ha hiányoznak a fizikában már lassan megszokott drága berendezések. Nagy meglepetéssel hallhattunk arról az általános szokásról, hogy egy új baktérium mutánst, vagy a speciális tulajdonságokkal rendelkező muslicát előállítójuk az eredmények publikálása után az érdeklődők rendelkezésére bocsátja. A magyarázat nyilvánvaló (egy fizikus hiába várna arra, hogy pl. értékes $SrTiO_3$ egykristálya magától elszaporodik, hogy az érdeklődőknek szétküldhesse), és ez a szokás nagyon segíti az egész tudomány fejlődését.

Végeredményben megállapíthattuk, hogy a genetika életünkben legalább olyan fontos szerepet fog játszani, mint a fizika bármely ága; a természettudományok egyik területén működő kutató vagy oktató sem mehet el csukott szemmel a genetika eredményei mellett. Ma, amikor az új biológus generáció számára a biológia egyre kevésbé azonos a botanikával vagy az állatrendszertannal, az egzakt gondolkodásmód már nem olyan előny, mint a biológia forradalmi korszakában. A fizikus elsősorban új mérési eljárások, kísérleti berendezések kidolgozásával segítheti a tudományág fejlődését. Vannak elméleti kérdések, amelyeket a biológus saját axiómarendszeréből kiindulva megválaszolatlanul hagy; ezeknek a problémáknak a megoldása a fizikus számára érdekes lehet, és szerencsés esetben a biológiát is előre viheti. Az egységes természettudományos világkép alakításában, a határterületek fehér foltjainak kutatásában a fizikusoknak alapvető szerepük van.

Köszönet illeti Orosz Lászlót, Fodor Andrást és az Iskola valamennyi előadóját a magas színvonalú előadásokért, az előadások alatti és utáni jó hangulat megteremtéséért.

M. L.

AZ IFJÚSÁGI FIZIKAI KÖR TÉLI ANKÉTJA

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat és a Középiskolai Matematikai Lapok Fizika Rovata az 1975—76. tanévi első, téli ankétot 1975 december 28—30. napokon tartotta. Résztvett 50 helység 80 iskolájából 200 tanuló, az olimpiai keret és a Kör tagjai, továbbá olyan iskolák küldöttei, melyekből a KML Fizika Rovatának feladatmegoldó pontversenyére az előző tanévben megoldást keveset, vagy egyáltalában nem küldtek. Az előadások ezúttal a fizika határterületeivel foglalkoztak. Vermes Miklós az elektrolitekről beszélt és mutatott be kísérleteket. Keszthelyi Lajos „Az élet eredete", Károlyházy Frigyes „Atomfizikai törvények szerepe az életjelenségekben" címmel tartott előadást. Major János surlódásról tartott előadása a kezdőknek nyújtott segítséget a mechanikai feladatok megoldásához. Az előre szétküldött feladatok diszkussziójával több csoport foglalkozott Ábrahám Tibor, Harmat Péter, Kele András, Mihály László, Sasvári László és Szőkefalvi-Nagy Ágnes vezetésével. A résztvevők együtt tekintették meg a TV ernyőjén az 1975 évi fizika, kémia és matematika olimpiák magyar díjazottjainak vetélkedőjét. A hangulat mindvégig lelkes, a részvétel aktív volt.

Az ifjúsági ankétok évenként két alkalommal — a téli és a tavaszi iskolai szünetben — kerülnek megrendezésre, és 200—200 meghívott résztvevővel a Társulat legnépesebb rendezvényei közé tartoznak. Az első szerény találkozó mindössze egy napig (1962. ápr. 11.), a második (1963. jan. 4—5.) már két napig tartott. A résztvevők száma eleinte kb. 45, ebből 17—20 vidéki. Az ankét tartalma és külső formája igen hamar kialakult. Meghívott előadók és az IFK tagjainak előadásai, előre kiküldött feladatok megoldásának vitája szemináriumszerű kisebb csoportokban, kísérletek, filmek bemutatása, kötetlen beszélgetés. Ehhez járult eleinte — míg a Középiskolai Tanári Ankét Budapesten volt — a tanszerkiállítás és a bemutatott oktató filmek megtekintése, részvétel egyes előadásokon és kísérleti bemutatókon. Mindig voltak olyanok, akik az Ifjúsági Matematikai Kör ankétján is részt vettek. A két hasznos rendezvényt általában sikerült összehangolni, sőt egy ízben közös program is volt. 1971 tavasza óta az ankét már háromnapos, kétszer évente, a résztvevők száma fokozatosan növekszik. A vidékieknek a Művelődésügyi ill. az Oktatási Minisztérium ingyenes kollégiumi szállást biztosít, a kiemelkedő eredményt felmutató tanulók vasúti költségét fedezi. A Társulat az utóbbiakat ebéden látja vendégül. Mind többen jönnek azonban vidékről saját költségen, ill. iskolájuk vagy a KISZ támogatásával. 1973 tavasza

óta a keretek újabb bővülése következik. Sor kerül alkalmanként 100 tanuló behívására olyan 50 középiskolából, ahol a Középiskolai Matematikai Lapok statisztikai adatai szerint a Lapot nem vagy alig ismerik. A kiküldött felhívásra az iskolák igazgatósága kijelöl 2—2 tanulót a tehetséges, fizika iránt érdeklődő növendékek közül. A Minisztérium ezek részére is szállást ad és legtöbb esetben a részvételt a helyi társadalmi szervek teszik lehetővé. A vidéki iskolák igen jól reagálnak a felhívásra, majdnem kivétel nélkül felelnek, ugyanekkor sajnálatos módon a budapesti iskolák nagy része válasz nélkül hagyja levelünket. A létszám fokozatosan elérte a 200-at, betöltve az ELTE nagy fizikai előadótermét. A TTK tanulmányi osztálya ill. a fizikai tanszékek készségesen bocsátják rendelkezésre a szükséges tantermeket és a demonstrációs eszközöket. Lehetőség nyílt az egyetemi ill. műegyetemi intézetek, továbbá a KFKI, a TÁKI és az MTA Csillagvizsgáló Intézetének megtekintésére is. Hosszú volna felsorolni az előadókat, akik 14 év alatt 27 ankét alkalmával szívesen áldozták idejüket arra, hogy az ifjúságnak beszéljenek. Csak néhány kiemelkedő adatot említünk: Vermes Miklós 9 alkalommal szerepelt a programon (hozzátehetjük, hogy ezen kívül ugyanezen idő alatt 32 további előadásban ismertette az Eötvös Verseny és a Középiskolai Fizikai Tanulmányi Verseny feladatait lényegileg ugyanezen közönség előtt!), Károlyházi Frigyes 5, Marx György, Holics László, Gaál István 3—3, Kuti Gyula, Geszti Tamás, Gnädig Péter 2—2 előadással szerepelt. A szűkebb rendező gárda tagjai — Mezei Ferenc, Nagy Dénes Lajos, Major János, Mihály László — számos alkalommal egészítették ki a programot szükség szerint rövidebb—hosszabb előadással. A szemináriumi csoportok szervezésében főként Gnädig Péter és Mihály György segítettek a már említetteken kívül. A csoportok vezetésében nagyszámú egyetemi oktató és hallgató vett részt évről-évre.

Az ankét alkalom egyúttal arra is, hogy a Nemzetközi Fizikai Olimpiára készülő keretnek kiképzést tartsunk és új jelölteket megismerjünk. A kiképzés vezetője 9 éve Tichy Géza adjunktus. A Fizikai Szemlében évente megjelenő rövid beszámolóban mindazok neve szerepel, akik az ankétok sikeréhez munkájukkal hozzájárultak. A korábbi években szereplő ifjúsági előadók később mint kutató fizikusok vagy egyetemi oktatók kerülnek be a beszámolókba. Az utóbbi években az egyes ankétok tematikáját úgy választottuk meg, hogy minden alkalommal a fizika valamilyen fejezetét világította meg. Így sor került a következőkre: atomfizika, szilárdtestfizika, az elektromágneses tér, a fény, fizika és biológia.

Az ifjúsági ankétok hatását objektív módszerrel éppen úgy nem lehet leméri, mint bármilyen más pedagógiai tevékenységét. Kereshetjük két síkon. Módot nyújtanak arra, hogy az ország legkülönbözőbb tájain többedmagukkal, vagy elszigetelten egyedül dolgozó, tehetséges, fizika iránt érdeklődő tanulók találkozzanak, egymást megismerjék, gondolataikat kicseréljék, problémáikra hozzáértőktől választ kapjanak. A fejlődés szempontjából az oktatónál szinte fontosabb a környezet, a hasonló érdeklődésűek kapcsolata, a rokon lelkek találkozása, az ösztönző hatás, a versengés. Így kialakul az az elit gárda, mely a jövő tudományos generációját készíti elő. Az ankétok másik fontos eredménye az, hogy szélesebb körben felkelti az érdeklődést a fizika iránt, segítséget nyújt olyanoknak, akik egyébként nem tudnának kapcsolatot találni. Ennek bizonyos mértékben ismerhető, látható jele a Lapok fizika pontversenyén való részvételben meg is mutatkozik. A résztvevők száma az utolsó 10 évben alig 300-ról közel másfél ezerre növekedett. Az ankét főként a vidékiek számára jelentős esemény, a Lap mellett a legfontosabb kapcsolat a fizikával. A díjazottak statisztikája évről-évre bizonyítja, hogy a vidék színvonala fokozatosan emelkedik. A Lap pontversenyén a vidékiek már régen többségben vannak a nyertesek között. A vidékiek szereplésének javulását látjuk az országos versenyeken is. Igen érdekes, hogy míg a nemzetközi versenyeken résztvevő magyar csapatban matematika esetében a résztvevők kevés kivétellel néhány budapesti speciális iskolából kerülnek ki, addig fizikából kb. fele arányban vidékről. A fizika válogatottak budapest különféle iskoláit és az ország legkülönbözőbb tájait képviselik (Debrecen, Eger, Esztergom, Csongrád, Győr, Ózd, Sopron, Szekszárd, Szolnok, Szeged). Az így kialakuló elit nyilván hatással van a fizika ismeretek színvonalának emelésére az egész országban. Az a támogatás, melyben az Oktatási Minisztérium és az Eötvös Loránd Fizikai Társulat az ankétok rendezését részesíti, valamint a közreműködők áldozatos munkája meghozza gyümölcsét.

K. R.

EREDMÉNYEK

FREON-VESZÉLY?

Az utóbbi időben egyre több hang szólal meg a klór-fluor-szén vegyületek használata ellen. Ezen vegyületek legelterjedtebb képviselője a FREON 12, kémiai nevén di-klór-di-fluor-metán (F_2Cl_2C) már a harmincas évek óta széltében használatos, mint hűtőkészülékek párolgó folyadék töltete. A háború után használata tovább terjedt a légkondicionált lakások és járművek (vasútikocsik) klímaberendezéseiben. Legveszélyesebb elterjedését azonban az okozta, hogy kiváló oldószere számos rovarirtónak (priétrum, DDT, HCH) és így rovarirtó-permetként (spray) nagymennyiségben kerül a légkörbe. Ezenkívül ezt az indifferens hajtógázt (nem mérgező, nem gyúlékony, nem robbanó forrpont: — 30 C°) számos spray berendezésben használják, pl.: mosószerek stb. kipermetezésére.

A környezetvédelmi hatóságok rámutattak arra, hogy kémiai közömbössége miatt a légkörben nem bomlik el, hanem állandóan dúsul. A magaslégkörbe kerülve fennáll a veszély, hogy fotodisszociáció révén szabad gyököket termel, melyek gyorsan bontják a légköri ozont (O_3). Az ozon védőburok pusztulása pedig utat engedne a Nap ártalmas ultraibolya-sugárzásának, ami alapjaiban változtatná meg a földi bioszféra egyensúlyát.

Legújabban a NASA Langley Kutató Központjában (Virginia) V. Ramanathan a freonok további környezetkárosító veszélyére hívta fel a figyelmet. A klór-fluorokarbon és klórkarbon vegyületek igen erős elnyelési sávokat mutatnak, a közeli infravörösben 0,8 és 1,3 mikron között. A földi légkör épp ebben a tartományban meglehetősen átlátszó. Ez a szerencsés körülmény biztosítja, hogy a Földön nem lép fel a Vénuszhoz hasonló üvegház hatás, mert a látható sugárzástól felmelegedett földi felszín főként ebbe a tartományban sugározza vissza az elnyelt hőenergiát. Minden változás ebben az elnyelési tartományban érzékenyen befolyásolná a Föld hőháztartását. Ramanathan számításai szerint ha a freonok koncentrációja eléri a két billiomod részt a Föld átlagos felületi hőmérséklete 0,9 K-el növekednék. A freonok jelenlegi felhasználási ütemét alapulvéve ez kb. 2000-ben történik meg.

Már régebben kimutatták, hogy az átlagos felszíni hőmérséklet 0,5 K-el való növekedése már mélyreható klímatológiai változásokkal járna: csökkenne a gleccsertakaró, megváltozna az esőzés mértéke stb.

Szimán Oszkár

HÍREK A MÉRTÉKEGYSÉGEK TERÜLETÉRŐL

1975 május—júniusában ülésezett a 15. Általános Súly- és Mértékügyi Értekezlet. Többek között határozatot hoztak az SI* mértékegységekhez kapcsolható nagyságrend jelölő szócskák („prefixum"-ok) sorának bővítésére. A 10^{15} nagyságrendet „peta" szócskával jelölik, jele P, a 10^{18} nagyságrend jelölésére pedig az „exa" szócskát ajánlják, aminek a jele E. Így pl. 1000000 Gohm = 1 Pohm vagy 1 parsec = 0,03085678 Em (examéter).

Az ICRU (International Comission on Radiation Units and Measurements), azaz a Nemzetközi Sugárzásmértékegység és Sugárzásmérési Bizottság javaslatára, hosszú előkészítő munka után [1, 2, 3] új elnevezéseket fogadott el a fenti értekezlet két, az ionizáló sugárzások területén alkalmazott SI mértékegységre. A H1 határozat az aktivitás SI egységeként a *becquerel*-t fogadja el, jele: Bq, dimenziója: s^{-1}. A *H*2 határozat az ionizáló sugárzások elnyelt dózisa SI egységeként a *gray*-t fogadja el, jele: Gy, dimenziója: J/kg. Tehát meglevő SI egységek kaptak új nevet arra az esetre, ha az ionizáló sugárzásokra vonatkoztatjuk őket. A joule per kilogram így vonatkozhat pl. abszorbeált dózisra. Az új és régi egységek átszámítása a következő:

1 gray = 1 Gy = 100 rad = 1 J/kg,

1 becquerel = 1 Bq = 1 $s^{-1} \approx 2{,}703.10^{-11}$ Ci.

Az új elnevezések is nagy fizikusokat tisztelnek. Antoine Henri Becquerel (1852—1908) fedezte fel 1896-ban a radioaktivitást („Becquerel sugarak") és 1903-ban fizikai Nobel-díjat kapott Marie és Pierre Curie-vel együtt. Louis Harold Gray (1905—1965) a sugárzás-dozimetria területén alkotott alapvetőt, felismerte azt az elvet, amit ma Bragg-Gray-elv néven ismerünk. (Az 1971-ben kiadott Mértékegység Kislexikon még az aktivitás javasolt SI egységeként a rutherfordot — jele rd — ismerteti. 1 rd = 10^6 s^{-1}. Nem ezt fogadták el!)

A besugárzási dózis SI egysége a C/kg (coulomb per kilogram). Ez nem kapott új nevet. Régi egysége, a röntgen, ma még használatos.

*SI: A „Système International d'Unités" vagyis a „Nemzetközi Mértékegység-rendszer" nemzetközi rövidítése.

Az ICRU azt ajánlja, hogy a rad, röntgen és curie egységeket fokozatosan, egy 10 évnél nem rövidebb időszak alatt hagyjuk el, s váltsuk fel őket rendre a gray, coulomb/kilogram és becquerel egységekkel. A sima, biztonságos (gyógyászati tévedések!) és hatásos átmenet érdekében minél hamarabb kell intézkedjenek az egyes nemzeti és nemzetközi testületek. Egyik-első lépésként K. Lidén svéd professzor 17 különböző országokban megjelenő folyóiratnak beküldött egy kis ismertetőt (pl. [4, 5]).

Az egyik angol nyelvű folyóirat [6] a következő kis versikével búcsúztatja a régi egységeket:

Past Units now have had their day,
In place of rad, we now say *gray*,
The *becquerel* takes, despite your fury,
The active place instead of curie.

Ami magyar fordításban így hangzana:

Eljár az idő egységek felett,
gray-t mondunk majd a rad helyett,
S a *becquerel*, bizony, akárhogy dühít,
Felváltja lassan a régi curie-t.

Összeállította és fordította:

Török István
ATOMKI

IRODALOM

1. K. Lidén, At. Energy Rev. *11* (1973) 1, 167.
2. K. Lidén, At. Energy Rev. *11* (1973) 4, 891.
3. K. Lidén, „SI Units in Biomedical Dosimetry", Advances in Biomedical Dosimetry (Proc. Symp. Vienna, 1975), IAEA Vienna (1975) 451.
4. K. Lidén, At. Energy Rev. *13* (1975) 3, 583.
5. H. O. Wyckoff, A. Allisy, K. Lidén, Radiochimica Acta *22* (1975) 1/2, 95.
6. J. Inst. Nucl. Eng. *16* (1975) 3, 89.

ÚJABB ADATOK MARÓTHI GYÖRGY FIZIKAI SZERTÁRÁHOZ

Tóth Béla
Debrecen

A Fizikai Szemle 1972/11. számában rövid tanulmányban ismertettem Maróthi Györgynek a kísérleti fizika oktatására irányuló törekvéseit, az általa létesített Physicum Auditorium és szertár felszerelését. Azóta újabb idevonatkozó adatok kerültek a kezembe, amelyek hiányosan ugyan, de így is jelentős mértékben gazdagítják Maróthi fizikai szertáráról, a magyarországi kísérleti fizika első eszközeiről alkotott képünket.

Ezek az adatok a debreceni Ref. Kollégium könyvtárában őrzött R.71.8 jelű könyvtári feljegyzéseket tartalmazó fólió alakú album 211. lapján olvashatók. Itt egy jegyzőkönyvet találunk, melyet Hatvani István állított össze 1755. július 10-én azokról a tárgyakról, melyek Szilágyi István togátus diáknak könyvtárossá tételekor átadattak. (Ebből az is kiderül, hogy a fizikai felszerelés a könyvtár leltárában szerepelt.) Ennek a jegyzőkönyvnek 9. pontjában azoknak a könyveknek és fizikai eszközöknek (Librorum et Instrumentorum Physicorum) külön papírokon (I és K. jelzet alatt) szereplő jegyzékéről van szó, melyeket „e bibliotheca Cl. Georgi Marothi occasione auctione (!) Publicae", vagyis Maróthi könyvtárának nyilvános árverésekor vásároltak. A két jegyzék közül azonban csak a könyveké van meg, a fizikai eszközöké nem található. Van azonban a fenti jegyzőkönyvben néhány sor, mely azokat a Maróthi hagyatékából származó eszközöket sorolja fel, amelyek az átadáskor hiányoztak. Ezek:

1. Cista cum telescopiis et lentibus vitreis.
2. Clepsidra magica.
3. Speculum compositum cum Pupulis
4. Speculum Cylindricum.
5. Sclopetum pneumaticum,

vagyis egy láda távcsövekkel és üveglencsékkel, egy „bűvös" (kísérleti célokat szolgáló) vízóra, egy tükörszerkezet bábokkal, egy gömbtükör, egy légsűrítőhöz való szelence.

Íme így, a hiányok felsorolásából értesülünk néhány eszköznek a Maróthi idejében való meglétéről. Mily jó volna, ha a jegyzőkönyv mellékletét alkotó teljes leltár is előkerülne!

ELŐSZÓ EGY DIPLOMAMUNKÁHOZ

Zámori Zoltán
Központi Fizikai Kutató Intézet

Csaknem ötven éve az ELTE egyetem épületeinek egyikében doktorált Neumann János Fejér Lipótnál matematikából. Húsz évvel később az ő gondolatával született meg a tárolt programozású szekvenciális számítógép.

Az elmúlt negyedszázad alatt ezekből a gépekből néhány százezer példány készült el és dolgozik — főleg a gazdasági-üzleti élet, a haditechnika és a tudomány szolgálatában. S egészen elenyésző százalék az iparban, vagyis a szó szoros értelmében vett termelésben. A termelés ugyanis nem tűri a luxust, mivel a piaci szabályozók a feltétlen gazdaságosságra szorítanak. A mai számítógép pedig még luxus. Aki legszerényebb mértékkel mérve is tízezer dollárokkal vagy millió forintokkal nem rendelkezik, annak az igényeknek ebben a szférájában — durván hangzik, de: coki. Hacsak valami jótékonysági intézmény vagy alapítvány nem segít rajta.

Ez az 1975-ös év az, amely a félvezető technika már kielégítően magas szintre történt fejlődése jóvoltából egyszerre, hozzávetőleg egy millió ilyen számítógéppel fogja — még nem ellepni, de már meglepni a világot. Még nem olcsón, de már bizottságok nélkül, akár kétkezi munkával is elérhető áron.

Ez a szám nagy, de még nem korszak-meghatározó. Az elektronikus kalkulátorokból, ezen elemi aritmetikára vagy legfeljebb elemi függvények kiszámítására korlátozott, de belső működésüket tekintve ugyancsak tárolt programozású szekvenciális kis számítógépekből az első kibocsátásuk óta eltelt három év alatt 90 millió került a piacra, — a legegyszerűbbek ma 15 dolláros dömping áron. A hatásuk társadalmi skálán mégse érezhető, mindössze az látszik, hogy a matematikai oktatásra előbb-utóbb majd elkerülhetetlenül valahogy kihatnak.

Az előbb említett nagyteljesítményű mikrokomputerek milliós megjelenése a kalkulátorok példáján ítélve ugyancsak nem okoz majd még semmi közvetlen megrázkódtatást. Százmilliós, milliárdos elterjedésük viszont már olyan minőségi változást sejtet, melyre a történelem a második ipari forradalom elnevezést használhatja majd csak.

Ha csak a technikai és technológiai premisszákat tekintjük, úgy százmillió mikroprocesszor előállítására egyedül Kalifornia állam néhány közép szaküzemének is mindössze csak öt évre lenne szüksége. Minden ekológiai veszélyeztetés nélkül, nagyságrendben mindössze száz tonna körüli bőségben található anyag felhasználásával. [Ez súlyszerint zömében tokozó műanyag vagy kerámia, kontaktusfém, és persze magas technológiai értékű félvezető, valamint nagytisztaságú, a fotolitográfiai és maratási folyamatokban használatos vegyszer.] A processzor, memória és interface chipek ugyanis fotolitográfiai úton készülnek, mintha nyomnák, stancolnák őket. Itt szilícium lemezke a papír, foszfor és bór a festék, és a maszkokon keresztüli diffúzió vagy ionimplantáció felel meg a nyomásnak. Gyártásukhoz a milliós szériáktól esetleg visszahőkölő és ármeghatározó emberi kézre szinte nincs is szükség. Áruk pusztán csak presztízs-tartás, kis profitszerzés és copyright okokból marad. Mint ma a könyveknek.

Az egész földkerekség technikai-technológiai kapacitásával számolva még a milliárdos nagyságrendű példányszám előállításához sem kellene több 10—20 évnél. Használatukhoz viszont a közoktatás — s ezért beszélünk itt erről — némi kiegészítésére lenne szükség. A számítógép ugyanis termelési eszköz, szerszám, s a szerszámokat nemcsak a magasképesítésű műszaki, tudományos és gazdasági káderek, hanem elsősorban a termelő, dolgozó tömegek használják. Ezért az, hogy a technika-technológia megengedte 10—20 év meddig nyúlik ki, az egyedül a közoktatáson fog csak múlni. Nálunk legfőképp ezen az egyetemen, amely a hazai tanárképzés leginkább szemelőtt levő műhelye.

Hogy ez a rengeteg olcsó és mégis elképesztően nagyteljesítményű számítógép mit is fog csinálni, azt nem tudjuk megmondani pontosan. Ha erre jogos értetlenséggel s ingerült várakozással bámulnak vissza ránk, akkor is csak azt válaszolhatjuk feltűnő és hiányos intellektusra valló blöfföléssel, hogy mindent. Ezek a processzorok ugyanis beleegyezésünktől, jóváhagyásunktól, biztatásunktól függetlenül lesznek, sokasodnak és előbb-utóbb mindenhová szétáradnak.

Már most minden jobb tervezőintézetben feltűntek, minden még előbb elvállalt feladatot már velük gondolnak megoldani, olyat például hogy nagy termelési egységek — erőművek, olajfinomítók, kohók, vegyipari aggregátorok üzemellenőrzése, kisebb gépegységek — a legkülönbözőbb szerszámgépek, rajzasztalok, szabászati vágó- és varrógépek, elektronikus huzalozók, nyomdaipari szedők — vezérlése, aztán még apróbb dolgok, mint például üzleti mérlegelők és árazók, tápszer keverők, csirke-etető adagolók működtetése és így tovább. Az intézetek és tervezőirodák nyilván nem fogják bírni kielégíteni az ehhez hasonló, egyre sokasodó és egyre reálisabb igényeket. Megcsinálják hát a néhány elsőt, aztán a soronkövetkező néhány, legbonyolultabbakat, s a módosítás, másra adaptálás, új alkalmazás maradhat az üzemek dolgozóira Ha értenek hozzá. Legalább is az alapokhoz. Például annyira, hogy ha egy programszalagon (valójában PROM chip-en) más bitkonfigurációt visznek be, akkor a gép mást csinál. Kikövetkeztethetően, megtervezhetően mást csinál. S tudják azt, hogy hogyan. Ennyi elég, hogy a nem egészen tompát és nem egészen humánt a majdani probléma garantáltan magával ragadja. Ennyit kellene tehát az iskolában biztosítani mindenkinek.

Más nem fog hiányozni, computerek azok lesznek. Ez a diplomamunka még tízmillió forint árú kis

számítógéprendszeren készült, mely egyébként hazánk és szoros kollégáink külországban működő büszke terméke. A feladat nem különös, mindössze egy sok tonnás bonyolult nagy berendezés üzemi paramétereinek a tetszőlegesen majdan felmerülő óhajok szerinti ellenőrzése és szabályozása. Az aláhúzás aláhúzást, hangsúlyozást jelent. Ez a diplomamunka lényege. Ehhez a programozás magasiskolája lett bevetve.

A bemutatott program egy kis miniatűr, de teljes értékű változata annak a behemót multiprogramozású és multiprocesszoros operációs rendszernek, amelynek a legnagyobb CDC gépeken való első megalkotásához épp tíz éve még a szakma Neumann utáni zsenijére, Seymour Cray-re volt szükség. Kis gépen való implementálásához tavaly már csak egy bizonyos Richard Lary feltűnő intelligenciája, míg az idén itt mindössze e két elődre támaszkodó Horváth Andrásnak ragyogó felfogó- és bravúros programozási készsége szükségeltetett csupán.

E diplomamunkának eredeti funkciójától függetlenül — amely itt is leginkább egy diploma elnyerésére való érdemesítés — még az is feladata lehet, hogy demonstrálja egy olyan szakterület mai csúcsait, mely egy kicsit ebből az egyetemből nőtt ki, más földön fejlődött, s most épp burjánozni kezd, s melyet kultúrvegetációként — mindenki számára elérhetően — nálunk is honosítani kell.

S amit talán el lehetne megint példamutatóan kezdeni. Hisz Neumann János ugyan sok nagy egyetemnek volt díszdoktora, de igazi doktora csak ennek.

AZ ERŐK EGYESÍTÉSE VAGY SZÉTFORGÁCSOLÁSA?

Berényi Dénes
ATOMKI, Debrecen

A Göteborgi Egyetemnek és a Göteborgi Műegyetemnek (Chalmers Institute of Technology) közös fizikai intézete van. Az Uppsalai Egyetem Fizikai Intézete, Technikai Fizikai Intézete és az Uppsalában létesített Nemzeti Tandem Laboratórium épületeiket, berendezéseiket és szervezetüket tekintve szinte elválaszthatatlanul össze van forrva egymással és ezekben az intézetekben tanárokat, kutatókat és mérnököket egyaránt képeznek. A stockholmi Atomfizikai Kutató Intézet valamennyi svéd egyetem közös intézete.

Lehetne folytatni egy svéd tanulmányút ezirányú tapasztalatainak felsorolását, vagy hasonlókat felsorakoztatni a világ más tájairól. A lényeg mindenképpen az, hogy a fizika merev széttagolása kutatóintézetek, különböző egyetemek között nem emeli sem az oktatás, sem a kutatás sem az eszközkihasználás hatékonyságát. Ma már luxusnak tekinthető egy olyan gyakorlat, amelyik teljesen külön világnak tekinti a kutatást és az egyetemi, meg a műegyetemi oktatást.

Kétségtelen, hogy — legalábbis a távlati terveket illetően — vannak olyan kezdeményezések (lágymányosi telep), amelyek a probléma pozitív megoldására törekednek itthon is, de ezzel nem elégedhetünk meg.

Különösen nem a jelenlegi helyzetben, amikor erőink, energiaforrásaink hatékony és hatékonyabb kihasználását tűzzük ki célul az élet minden területén.

Keresnünk kell az együttműködési lehetőségeket, a szoros kapcsolatokat a fizikai kutatóintézetek és az egyetemi fizikai intézetek és különböző egyetemek fizikai intézetei között. Közös kutatások, közös kutatócsoportok (főleg az elmélet terén, erre vannak már jó kezdeményezések, de a kísérleti kutatásokban ez talán még szükségesebb és hasznosabb lenne), esetleg közös intézetek létesítése mind a fizikai kutatásra és felsőfokú oktatásra rendelkezésre álló erők egyesítését, hatékonyabb kihasználását jelentené, szemben az elzárkózással, elkülönüléssel, ami ma pazarlást, az erők szétforgácsolását jelenti.

A Fizikai Szemle szerkesztőbizottsága az 1972. évben meghirdetett Vélemények sorozatát az olvasók kérésére továbbfolytatja ez évben is, az akkor kialakított szerkesztőbizottsági állásfoglalás alapján. E szerint „a Fizikai Szemle feladatául vállalja el, hogy teret nyit a fizikai kutatás és a fizika oktatására vonatkozó egyéni véleményeknek, ha azok értékes gondolatokat tartalmaznak és építő szándékuak, függetlenül attól, hogy egyeznek-e a lap szerkesztőinek nézetével, vagy sem". Ennek szellemében várjuk továbbra is olvasóinknak, várjuk a magyar fizikusoknak leveleit.

A szerkesztőbizottság

PÁLYÁZAT

1976. évi kutatási jutalmakra

A Magyar Tudományos Akadémia pályázatot ír ki a távlati tudományos kutatások terén elért jelentős eredmények jutalmazására

A pályázaton részt vehetnek tudományos kutatók és egyetemi oktatók, ill. kollektíváik, továbbá kutatással foglalkozó más szakemberek függetlenül attól, hogy milyen munkahelyen dolgoznak.

A pályázatban — két évnél általában nem régebbi — nyomtatásban megjelent tanulmánnyal vagy közlésre alkalmas kézirattal (kivételesen kutatási zárójelentéssel) lehet részt venni.

A kutatási jutalom az eredmény jelentőségétől függően egyéni pályázó esetében 5000—15 000 Ft, kutatói kollektívák esetében 6000—35 000 Ft.

Nem részesíthetők a fenti jutalomban:

— az Akadémia tagjai, a kutatóintézetek és egyéb kutatóhelyek igazgatói, a tanszéki akadémiai kutatócsoportok vezetői;

— akik az adott kutatási tevékenységért a munkabéren és járulékain, illetve a már megjelent tanulmány szerzői díján kívül más ellenértékben (kutatási szerződési, szakértői, újítási, szabadalmi díjban, kutatási eredményért kapott külön jutalomban stb.) részesültek;

— kutatási jutalomban már részesített, vagy ezzel kapcsolatban már érdemben elbírált pályamunkák, kivéve ha az elbírálás óta elért számottevő új tudományos eredményt tartalmaznak.

A pályázatnak tartalmaznia kell:

1. A pontosan kitöltött pályázati űrlapot (beszerezhető: az MTA Tudományos Testületi Titkárságán Bp. V., Münnich F. u. 7. sz. alatt, az egyetemek rektori hivatalaiban, továbbá akadémiai és ipari kutatóintézetekben).

2. A kutatási eredményt tartalmazó tanulmányt (közlésre alkalmas kéziratot). Szükség esetén a kutatások gondozásáért felelős tárcák koordináló bizottságai adnak felvilágosítást arra nézve, hogy az adott pályamunka, tematikája alapján melyik főirányhoz, illetőleg kutatási területhez tartozik.

A pályázatot (tanulmányt és pályázati űrlapot) *1976. május 30-ig* kell a kutatóhely vezetőjéhez benyújtani, aki a pályázati űrlapra felvezeti szakvéleményét, és a pályázatot június 15-ig továbbítja az Akadémia Tudományos Testületi Titkárságának.

Az előírt határidő után, vagy hiányosan, továbbá nem kellően rendezett alakban benyújtott pályázatok nem vehetők figyelembe. A már benyújtott pályázati anyagot kiegészíteni vagy módosítani nem lehet.

A kutatási jutalmak kiosztására december hó második felében kerül sor.

A kutatási jutalomban részesített pályamunkákat az MTA — főirányért felelős tárcavélemények figyelembevételével — szabadon hasznosíthatja.

Budapest, 1976. március hó 1.

A Magyar Tudományos Akadémia
Elnöksége

A pályázatra kiírt kutatási területek:

Országos szintű kutatások terén

A MAGYAR TUDOMÁNYOS AKADÉMIA

gondozásában

1. Szilárdtestek kutatása
2. Az életfolyamatok szabályozásának mechanizmusa
3. A közigazgatás fejlesztésének komplex tudományos vizsgálata
4. A szocialista vállalat

A NEHÉZIPARI MINISZTÉRIUM

gondozásában

5. Biológiailag aktív vegyületek kutatása

AZ OKTATÁSI MINISZTÉRIUM

gondozásában

6. A köznevelés fejlesztését szolgáló pedagógiai kutatások

Tárcaszintű kutatások terén

(amelyek nem azonosak az országos főiránnyal)

A BELKERESKEDELMI MINISZTÉRIUM

gondozásában

1. Lakossági fogyasztási, keresleti tendenciák
2. A kereskedelem fejlesztésének hosszútávú koncepciója
3. Vállalatok, szövetkezetek szervezetének és tevékenységének racionalizálása

AZ EGÉSZSÉGÜGYI MINISZTÉRIUM

gondozásában

1. Számítástechnika alkalmazása az orvostudományban és az egészségügyben
2. A lakosság védelme a természetes és mesterséges környezet (bioszféra) káros hatásaitól (főleg orvosi vonatkozásban)
3. Perinatalis mortalitás csökkentésére irányuló kutatás
4. Transzplantációs munkálatok kutatása
5. Társadalom-orvostudományi kutatások
6. Daganatok ethiopathogenesise és therápiája
7. Sérülések pathológiája és ellátása
8. Radioizotópok orvosi alkalmazása
9. Genetikai kutatások

A KÖZPONTI FÖLDTANI HIVATAL

gondozásában

1. Az ország természeti erőforrásainak kutatása és feltárása

A KÖZPONTI STATISZTIKAI HIVATAL

gondozásában

1. Társadalmunk rétegződésének alakulása és az életmód változása
2. Az ország népesedési helyzetének vizsgálata, a népesedéspolitika demográfiai alapjainak kidolgozása

ORSZÁGOS TESTNEVELÉSI ÉS SPORTHIVATAL

gondozásában

1. A népesség fizikai erőnlétének fejlesztése és fenntartása a testkultúra eszközeivel

A MAGYAR TUDOMÁNYOS AKADÉMIA

gondozásában

1. A számítástechnika alkalmazásai (kivéve az orvostudományi alkalmazások)
2. Az ember természeti környezetének védelme (főleg a bioszféra megváltozása szempontjából)
3. Gazdaságpolitikánk tapasztalatainak elemzése; javaslatok a továbbfejlesztésre
4. A világgazdaság fejlődési tendenciái, különös tekintettel a népgazdasági tervezés szempontjaira
5. A tudományos-technikai forradalom mint világtörténelmi folyamat a kapitalizmus és szocializmus viszonyai között. (A tudományos-technikai forradalomra való felkészülésünk tudományos megalapozása.)
6. A társadalmi tudat fejlődése Magyarországon a felszabadulás óta
7. A fejlett szocialista társadalom főbb jellemző vonásai
8. Gazdasági fejlődésünk üteme, összefüggésben a népgazdasági szerkezet alakításával és a munkaerőhelyzettel
9. A világgazdaságban végbemenő folyamatok és hatásuk a magyar népgazdaságra
10. A mai magyar társadalom osztály- és rétegszerkezete
11. A szocialista életmód alapvető ismérvei, feltételei és fejlődési tendenciái
12. A szocialista demokrácia (pártdemokrácia, választási rendszerünk, üzemi és munkahelyi demokrácia, közéletiség)
13. A szocialista tudat fejlődése
14. A pártosság, népiség, realizmus időszerű kérdései a hazai és a nemzetközi irodalom, valamint a szocialista művészet fejlődésének hazai tapasztalatai alapján

A MEZŐGAZDASÁGI
ÉS ÉLELMEZÉSÜGYI MINISZTÉRIUM

gondozásában

1. A növénytermesztés ökológiai alapjainak, a kemizálás és biológiai alapösszefüggéseinek kutatása
2. A vízgazdálkodás alapösszefüggéseinek kutatása
3. A kertészeti termesztés és tartósítás biológiai, kémiai, műszaki, valamint ökonómiai tényezők vizsgálata
4. Az állati eredetű élelmiszertermelés fejlesztésének közés állategészségügyi feltételeit megalapozó kutatások
5. A mezőgazdasági vállalatok ökonómiai szervezési kérdéseinek kutatása
6. Állami gazdaságok és termelőszövetkezetek vezetésfejlesztése
7. A mezőgazdaság tervezésének, közgazdasági szabályozó rendszerének, termelési, forgalmazási, fejlesztési, szervezési törvényszerűségeinek komplex kutatása
8. Az élelmiszeripar tervezési, termelési, forgalmazási, fejlesztési szervezési kérdései közgazdasági vonatkozásainak kutatása
9. Az állattenyésztés távlati fejlesztését megalapozó kutatások
10. A MÉM környezetvédelmi kutatásai
11. A növényvédelem alapkérdéseinek kutatása

A MUNKAÜGYI MINISZTÉRIUM

gondozásában

1. A munka társadalmi, gazdasági összefüggései

KÜLFÖLDÖN MEGRENDELHETŐ AZ ALÁBBI CÍMEKEN A FOLYÓIRAT:

ANGLIA:

THE DANUBIA BOOK COMPANY,
58, Chatsworth Road *LONDON NW2 4DD*

AUSZTRÁLIA:

COSMOS BOOK AND RECORD SHOP,
145 Acland St. *St. KILDA, Vic. 3182*
GLOBE AND CO.,
694—696 George St., *SYDNEY NSW 2000*

AUSZTRIA:

RUDOLF NOVÁK GmbH.,
Köllnerhofgasse 4., *A-1011 WIEN I.,*

BELGIUM:

„DU MONDE ENTIER" S. A.,
Rue du Midi 162 *B-1000 BRUXELLES*

BRAZILIA:

LIVRARIA D. LANDY LTDA.,
Rua 7 de Abril, Caixa Postal 7943.
01000 SAO PAULO

KANADA:

DÉLIBÁB FILM AND RECORD STUDIO
19, Prince Arthur Street West,
MONTREAL 130. Que.
PANNONIA BOOKS,
P.O. Box 1017 Postal Station „B"
TORONTO, Ontartio M5T 2T8
HUNGARIAN IKKA AND TRAVEL SERVICE,
1234 Granville Street, *VANCOUVER 2, B.C.*

DÁNIA:

HUNNIA BOOKS AND MUSIC,
Norrebrogade 182 I tv. *KOBENHAVN*

FINNORSZÁG:

AKATEEMINEN KIRJAKAUPPA,
Keskuskatu 2. *SF 00100 HELSINKI 10.*

FRANCIAORSZÁG:

SOCIÉTÉ BALATON,
12, Rue de la Grange Bateliere *75 PARIS IXe*

HOLLANDIA:

CLUB QUALITON,
Prinsenstraat 26. *AMSTERDAM*

JUGOSZLÁVIA:

FORUM,
Vojvode Misica broj 1. *NOVI SAD*

NORVÉGIA:

A/S NARVESENS LITTERATUR TJENESTE,
P.O. Box 6140 Etterstad *OSLO 6.*

NÉMET SZÖVETSÉGI KÖZTÁSASÁG:

UJVÁRY — GRIFF,
8000 MÜNCHEN 81. Titurelstr. 2.
MUSICA HUNGARICA,
8 MÜNCHEN 40., Agnesstrasse 45

SVÁJC:

METROPOLITAN VERLAG,
Teichweg 16. *CH-4142 MÜNCHENSTEIN*

SVÉDORSZÁG:

A.B. NORDISKA BOKHANDELN,
Alströmergatan 22. *101 10 STOCKHOLM*

AMERIKAI EGYESÜLT ÁLLAMOK

CENTER OF HUNGARIAN LITERATURE
4418 — 16th Avenue *BROOKLYN, N.Y. 11204*
HUNGARIAN BOOKS AND RECORDS,
11802 Buckeye Road *CLEVELAND, Ohio 44120*

VENEZUELA:

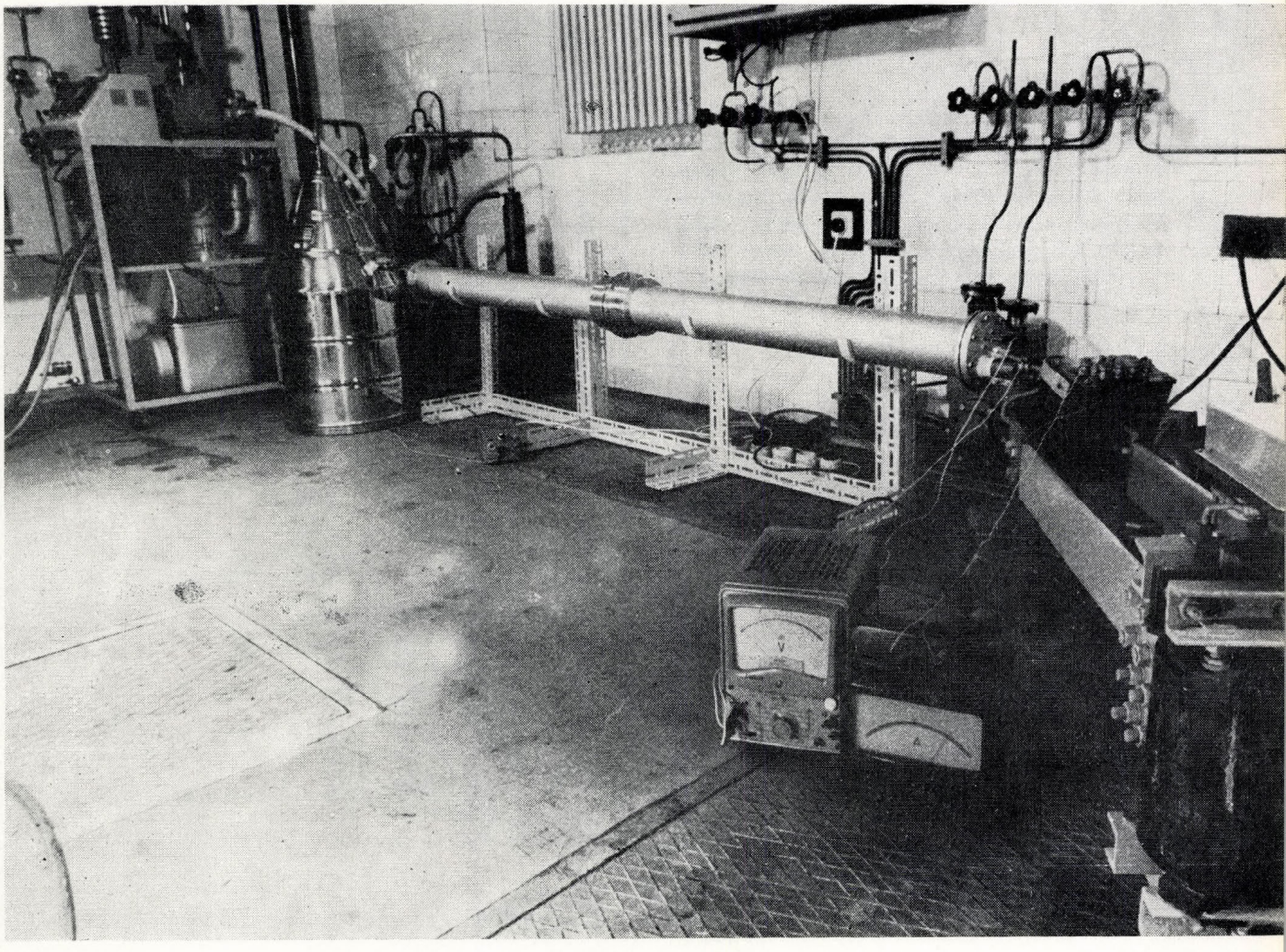
LOUIS TARCSAY,
Calle Iglesia Ed Villoria, Apt. 21-105. C. 24.
CARACAS

A szerkesztésért felel: Turiné Frank Zsuzsa
Szerkesztőség: Budapest V., Anker köz 1, Eötvös Loránd Fizikai Társulat. Távbeszélő: 227-040
A kiadásért felelős: Siklósi Norbert igazgató
Kiadja a Lapkiadó Vállalat, Budapest VII., Lenin körút 9—11. Levélcím: 1906. postafiók 223 Távbeszélő: 221-293
Terjeszti a Magyar Posta. Előfizethető bármely postahivatalnál, a kézbesítőknél, a Posta hírlapüzleteiben és a Posta Központi Hírlap Irodánál (KHI, 1900 Budapest V., József nádor tér 1.) Közvetlenül vagy postautalványon valamint átutalással a KHI 215-96162 pénzforgalmi jelzőszámlára
Előfizetés egy évre 72,—Ft; egyes szám ára 6,—Ft. Megjelenik havonta
76.2664 Akadémiai Nyomda Budapest V., Gerlóczy utca 2. — Felelős vezető: Bernát György

Index: 25.289

fizikai szemle

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat lapja



1976/4

A szerkesztő bizottság elnöke:

Marx György

A szerkesztésért felelős:

Turiné Frank Zsuzsa

A szerkesztő bizottság titkára:

Berényi Dénes

Szerkesztő bizottság:

Balázs Béla, Barlai Katalin, Barta György, Bozóky László, Csekő Árpád, Dede Miklós, Fehér István, Flórián Endre, Gaal István, Groma Géza, Haiman Ottó, Hoffmann Tibor, Holics László, Károlyházy Frigyes, Keszthelyi Lajos, Kovács István, Mihály László, Schanda János, Soós Károly, Szigeti György, Tóth Eszter, Valkó I. Péter, Vermes Miklós

Címképünk:

Az ELTE Alacsony Hőmérséklet Fizikai Laboratóriumában kifejlesztett és felépített, 100 MVA teljesítményű szupravezető váltóáramú kábelrendszer. Megtervezték és elkészítették: Kirschner István, Bánkuti József, Kiss György, Kovács István, Lászlóffy László. A képen vízszintes helyzetben látható a 2,3 m hosszú, 120 mm átmérőjű kábel. (Fényképezte: Kiss György.)

TARTALOMJEGYZÉK

Boros László: Szilárdtestek exoelektron-emissziója 121. oldal
Baky Miklós: Az egymáshoz közel látszó csillagok mozgása 131. oldal
V. Sz. Barasenkov: Tachionok, a fény sebességénél nagyobb sebességgel mozgó részecskék 134. oldal
Wiedemann László: Tértöltési egyenletek közelítő megoldása 143. oldal

A FIZIKA TANÍTÁSA

A. Baez: A természettudományok eredményesebb tanításáról 147. oldal
Szabó József—Sztaricskai Tibor: Egyszerű módszer a Boltzmann-állandó közvetett meghatározására 152. oldal
László Tihamér—Lázár György: Néhány antennamérési laboratóriumi gyakorlat 154. oldal

EREDMÉNYEK 157. oldal

VÉLEMÉNYEK

Groma Géza: A fizikusi munka megbecsülésének néhány kérdése 160. oldal

СОДЕРЖАНИЕ

Л. Борош: Эгзо-электронная эмиссия твердых тел
М. Баки: Движение звезд, кажущихся близкими
В. С. Барашенков: Тахионы — частицы со сверхсветовыми скоростями
Л. Видеман: Приближенное решение уравнений пространственных зарядов

ПРЕПОДАВАНИЕ ФИЗИКИ

А. Баез: О более успешном обучении естественным наукам
Й. Сабо—Т. Старичкаи: Простой способ косвенного определения постоянной Больцмана
Т. Ласло—Дь. Лазар: Несколько лабораторных опытов и измерений по свойствам антенн

ОТЗЫВЫ И ВЫРАЖЕНИЯ МНЕНИЙ

INHALT

L. Boros: Die Exoelektronen—Emission fester Körper
M. Baky: Die Bewegung scheinbar naher Sterne
W. S. Baraschenkow: Tachyone — Teilchen mit Überlichtgeschwindigkeiten
L. Wiedemann: Die angenäherte Lösung von Raumladungsgleichungen

UNTERRICHT DER PHYSIK

A. Baez: Über ein erfolgreicheres Lehren der Naturwissenschaften
J. Szabó—T. Sztaricskai: Eine einfache Methode zur indirekten Bestimmung der Boltzmannschen Konstanten
T. László—Gy. Lázár: Laboratoriumsversuche und Messungen an Antennen

STELLUNGNAHMEN UND MEINUNGSÄUSSERUNGEN

CONTENTS

L. Boros: The exo-electron emission of solid materials
M. Baky: The motion of apparently near stars
V. S. Barashenkov: Tachyons — particles with velocities exceeding light
L. Wiedemann: The approximate solution of space charge equations

THE TEACHING OF PHYSICS

A. Baez: On more effective ways of teaching the natural sciences
J. Szabó—T. Sztaricskai: A simple method of indirectly determining the Boltzmann constant
T. László—Gy. Lázár: Laboratory experiments and measurements on antennas

OPINIONS

fizikai szemle

AZ EÖTVÖS LORÁND FIZIKAI TÁRSULAT LAPJA
Alapította Eötvös Loránd 1891-ben Mathematikai és Physikai Lapok néven

XXVI. évfolyam 4. szám 1976. április

SZILÁRDTESTEK EXOELEKTRON EMISSZIÓJA

Boros László
MTA Orvos-Radiológiai Tanszéki Kutatócsoport

Bizonyos szilárdtestek (főként ionos kristályok, oxidált fémfelületek) vékony felületi rétegéből különböző fizikai és kémiai folyamatokat (pl. mechanikai deformációt, a kristályszerkezet megváltozását, olvadékok megszilárdulását, ionizáló sugárzásokkal való besugárzást, stb.) követően spontán, illetve termikus- vagy foto-stimulálás hatására kis energiájú elektronok lépnek ki.

A jelenséget kezdetben exoterm folyamatnak tekintették, ezért első intenzív kutatója, Kramer braunschweigi professzor exoelektron emissziónak nevezte el. Ez az elnevezés terjedt el általánosan, bár időnként „Kramer-effektus"-ként is említik. A szakirodalomban a spontán exoelektron emisszióra az EE, vagy EEE, a fotostimulált emisszióra az OSEE, a termikusan stimulált exoelektron emisszióra pedig a TSEE rövidítést használják az angol kifejezés kezdőbetűire utalva (exoelectron emission, optically stimulated exoelectron emission, thermally stimulated exoelectron emission). A mechanikai megmunkálást követő exoelektron emissziót tribo-exoelektron emissziónak nevezik.

Az exoelektron emisszió átfogó elméletét még nem dolgozták ki. A jelenség gyakorlati alkalmazására irányuló kutatások azonban jelentős eredményeket hoztak. Az exoelektron emissziós dózismérő bizonyos területeken máris komoly versenytársa a konvencionális szilárdtest dozimétereknek, a termo- és fotolumineszcens dózismérőknek. Reménytkeltő kísérleteket végeztek az exoelektron emissziónak a geológiában, a Hold kőzeteinek a vizsgálatában, a kémiai analízisben, a szilárdtestek felületi kutatásában való alkalmazásával. Szerves félvezetők, biológiailag aktív vegyületek exoelektron emissziójának a tanulmányozása meglepő eredményekkel járhat.

1. Történeti áttekintés

Exoelektronok emisszióját már a századforduló idején többen észlelték, csak a jelenséget tévesen értelmezték. Pl. M. Curie 1899-ben a rádium közelébe helyezett anyagoknál „radioaktív bomlást" figyelt meg [1]. Rutherford hasonló megfigyelést tett tórium vegyületek esetében [2]. Villard katódsugár hatásának kitett bizmuttal feketedést hozott létre filmen [3]. McLennan a katódsugarakkal besugarazott szulfátok és kloridok által emittált részecskék töltését és energiáját meg is mérte [4]. Azóta többen is igazolták, hogy a kilépő részecskék elektronok [pl. 5].

A harmincas években megfigyelték, hogy az újonnan előállított GM-csöveknek rendkívül nagy a háttere, mely azonban idővel lecsökken [6]. Gázkisülés vagy az elektródák mechanikai megmunkálása után is a GM-cső hátterének a növekedését tapasztalták [7, 8].

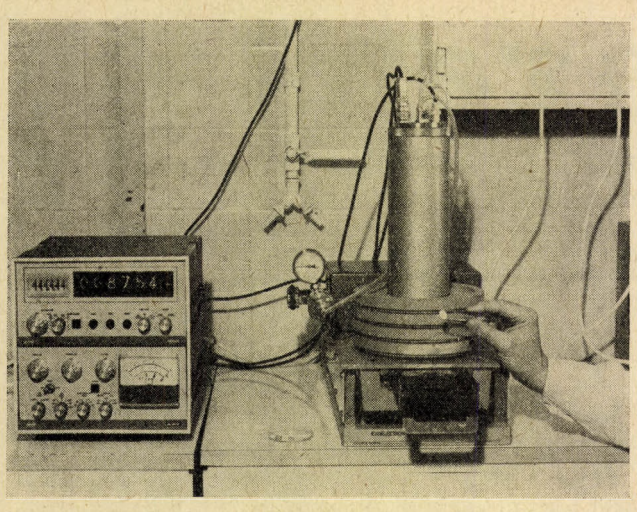
Bár a jelenséget gyakran észlelték csak Kramer kezdte részletesen vizsgálni a negyvenes évek végén [9, 10, 11]. Megfigyelte, hogy nagyszámú ionos kristály (pl. gipsz, CaF_2), valamint fémfelületek mechanikai megmunkálás vagy sugárexpozíció után szobahőmérsékleten spontán, vagy fénnyel való megvilágítás, illetve melegítés hatására elektronokat emittálnak [12, 13]. Kramer mutatott rá elsőként a lumineszcencia és az exoelektron emisszió közti analógiára [14]. Ezt kísérletileg elsőként Lepper [15], illetve Bohun [16] igazolta.

Az utóbbi években a szilárdtestek exoelektron emissziójával és gyakorlati alkalmazásával foglalkozó kutatócsoportok száma ugrásszerűen megnőtt és számos részletkérdést sikerült tisztázni. Egy 1970-ben megjelent bibliográfia 170 exoelektron emisszió témájú közleményt sorol fel [17]. Azóta ez a szám megháromszorozódott.

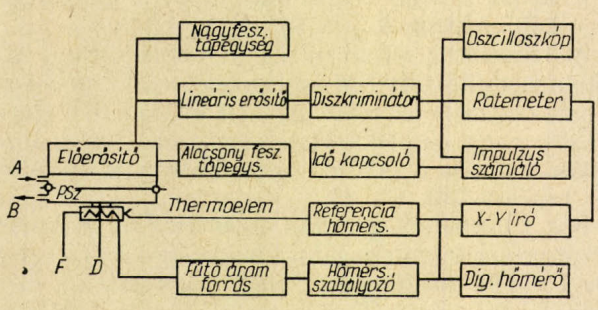
2. A mérési módszer

Az exoelektronok energiája a későbbiekben ismertetendő mérések szerint a 0,1—100 eV intervallumba esik. Ilyen alacsony energiájú elektronok detektálása végablak nélküli GM-csövekkel, illetve gázátáramoltatású proporcionális számlálócsövekkel, ionizációs kamrával, vákuumban pedig nyitott fotoelektronsokszorozóval történhet.

A gyakorlati alkalmazásoknál és az alapkutatások egy részénél is a lágy bétasugárzás mérésére szolgáló gázátáramoltatásos proporcionális számlálócsövek használhatók a legelőnyösebben. Az



1. ábra. Exoelektron dózismérő behelyezése az exoelektron számlálóba (MTA Orvos-Radiológiai Tanszéki Kutatócsoport)



2. ábra. Exoelektron mérőhely tömbvázlata

exoelektronok ugyanis termikus stimulálás esetén egy szűk hőmérséklet-tartományon, illetve rövid időintervallumon belül emittálódnak, így a kis holt idejű (0,1—1 μsec) proporcionális számlálócsövek nagy számlálási sebessége kihasználható. A mérőberendezések zaja a diszkriminálás lehetősége miatt, kicsivé tehető.

Az *1. ábrán* az MTA Orvos-Radiológiai Tanszéki Kutatócsoportjában épült exoelektron mérőhelyet, a *2. ábrán* pedig az elrendezés tömb vázlatát mutatjuk be.

A mérés elve a következő. A mintaváltóba beépített fűtőtestre helyezett mintát egy hőmérsékletszabályozó rendszer segítségével lineárisan 10—320 C°/min határok közt beállítható sebességgel kb. 500 C° hőmérsékletre felfűtjük. A termikus stimulálás hatására kilépő elektronok által a számlálócsőben keltett impulzusok erősítés és diszkriminálás után egy impulzusszámlálóba és egy rateméterbe jutnak. Az utóbbival és a termoelemmel egy X—Y vagy vonalírót vezérelve mód van az ún. TSEE görbék felvételére.

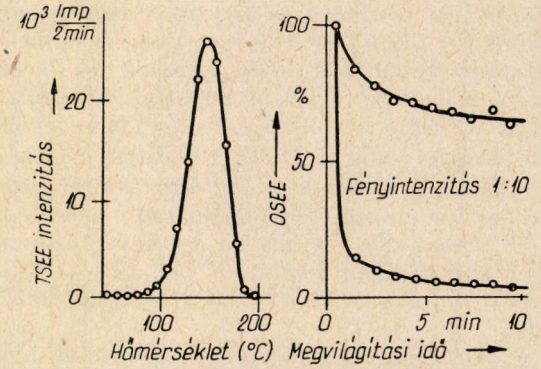
Fotostimulálás esetén a mérés elve az előbbitől csak abban különbözik, hogy a mintát nem fűteni, hanem ultraibolya vagy látható fénnyel kell megvilágítani.

3. Az exoelektron emisszió mechanizmusára vonatkozó kísérleti megfigyelések

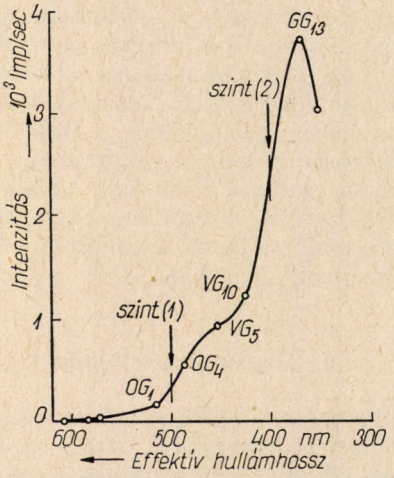
3.1. TSEE- és OSEE-görbék

Termikus stimulálás esetén az exoelektron emisszió intenzitását konstans felfűtési sebesség mellett a hőmérséklet vagy a felfűtési idő függvényében ábrázolva a TSEE, vagy hevítési (glow) görbét kapjuk *(3. ábra)*. A TSEE görbék analízise, az abszolút TSEE intenzitás, a csúcsok magasságának és lokalizációjának és ezek felfűtési sebességfüggésének a meghatározása az exoelektron emisszió mechanizmusának, az emittáló szilárdtest szerkezetének a megértéséhez szolgáltat adatokat.

Fotostimulálás esetén, ha konstans hullámhosszú és intenzitású fénnyel világítjuk meg a mintát és a megvilágítási idő függvényében ábrázoljuk az exoelektron emisszió intenzitását, akkor az OSEE-lebomlási görbét kapjuk *(3. ábra)*. A stimuláló fény hullámhosszát változtatva és az OSEE intenzitását mérve a TSEE görbékhez hasonló, egy vagy több maximummal rendelkező OSEE-görbét kapunk *(4. ábra)*. Az OSEE-görbék analízisével az optikai aktivációs energiák meghatározhatók.

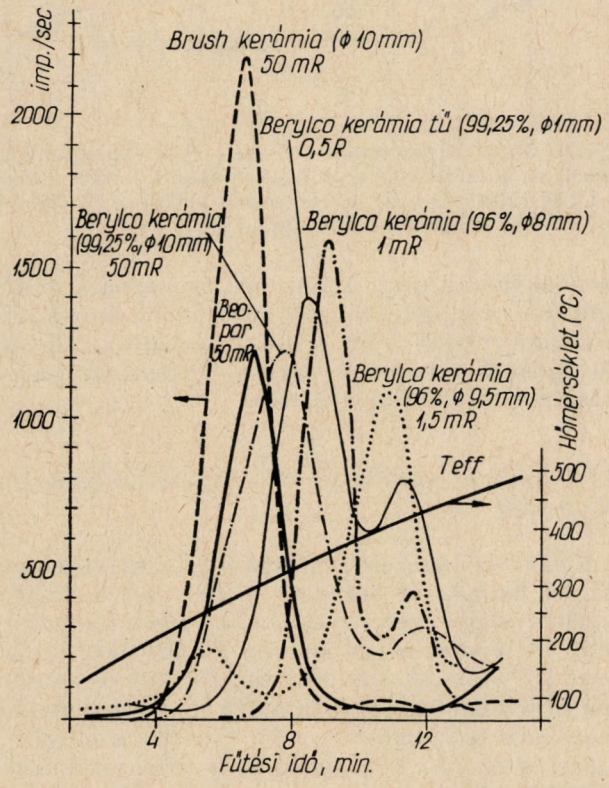


3. ábra. Baloldalt TSEE-görbe, jobboldalt OSEE-lebomlási görbék



4. ábra. A BeO fotostimulált exoelektron emissziójának spektrális érzékenysége (OSEE-görbe). A színszűrők effektív hullámhossza az abszcisszán olvasható le [56]

Ionos kristályoknál kimutatták, hogy a TSEE görbék kifejezetten függnek a kémiai szerkezettől és a rácstípustól, sőt az azonos kémiai összetételű, de különböző eredetű és tisztaságú, eltérő előzetes hőkezelésnek kitett, különböző szemcseméretű minták abszolút TSEE intenzitása, a TSEE-görbék csúcsainak száma, lokalizációja és relatív magassága eltér *(5. ábra)*.



5. ábra. Lítiummal aktivált különböző BeO minták TSEE-görbéi [40]

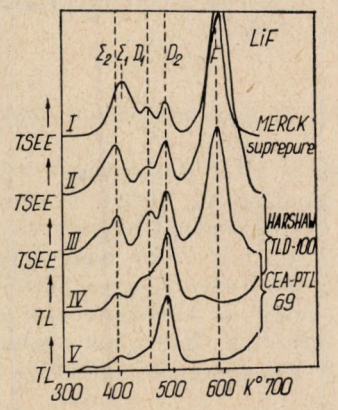
A tiszta, savval maratott fémfelületek vizsgálatánál ezzel szemben azt találták, hogy a különböző fémek TSEE maximumai azonos hőmérsékleten vannak [18]. Ezért a szilárdtest szerkezetétől független emisszióért a felületen adszorbeált gázok a felelősek. Ezt alátámasztja az is, hogy vákuumban frissen előállított fémfelületnél exoelektron emisszió nem lép fel.

Ionizáló sugárzásokkal való gerjesztésnél egyes anyagoknál (pl. LiF, BeO, MgO) a hevítési görbe jellege a sugárzás lineáris energiaátadási tényezőjétől (LET) is függ [19].

A felfűtési sebesség növelésével — azonos gerjesztésnél — a hevítési görbék maximumának megfelelő hőmérséklet és a csúcs magassága növekszik. A jelenség a termolumineszcenciánál észlelt Randall—Wilkins eltolódáshoz hasonló.

3.2 Összefüggés a szilárdtestek exoelektron emissziója, lumineszcenciája és a termikusan stimulált vezetése között

A termolumineszcencia (TL) és az exoelektron emisszió hasonló hiperbolikus törvényt követő időbeli lecsengése és hasonló hőmérsékletfüggése *(6. ábra)* arra enged következtetni, hogy az exoelektron emisszió és a lumineszcencia nemcsak külső megjelenési formájukban hasonlóak, hanem valószínűleg hasonló eredetűek is. Az exoelektron emisszióért és a lumineszcenciáért a kristályrácsban levő ugyanazon „elektron csapdák" (színcentrumok, vakanciák, Frenkel-rácshibák stb.) a felelősek. Ez a megállapítás csak részben igaz, mivel több anyagnál megfigyeltek termolumineszcens csúcsot megfelelő TSEE csúcs nélkül is. Más esetekben TSEE maximumokat észleltek megfelelő TL csúcsok hiányában. Ennek egyrészt a mérőberendezések nem megfelelő érzékenysége, másrészt pedig az lehet az oka, hogy míg a termolumineszcencia térfogati effektus, addig az exoelektron emisszió csak az anyag vékony felületi rétegére korlátozódik.



6. ábra. Különböző LiF minták szimultán felvett TL- és TSEE-spektruma [57]

Párhuzamosan végzett TSEE és TL méréseket a szimultán TL és termikusan stimulált vezetés (TSC) mérésekkel összehasonlítva Kanturek [20], illetve Pipinis és Grigas [21] hasonlóságot találtak a hevítési görbék maximumai közt. A vezetési és a TSEE maximumok a TL maximumokhoz képest kissé eltolódnak a magasabb hőmérséklet felé. A TSC és TSEE maximumok helyzete közti kis különbséget a kilépési munkának a TSEE csúcs lokalizációjára gyakorolt hatása indokolja.

A lumineszcencia csak azoknál az anyagoknál lép fel, ahol aktivációs termek vannak jelen. Az exoelektron emisszió és a termikusan stimulált vezetés aktiválatlan anyagoknál is fellép. Nincs különbség a $CaSO_4$: Mn és a $CaSO_4$ exoelektron emissziója közt, míg a tiszta $CaSO_4$ nem lumineszkál. A nagytisztaságú LiF-nél sem tudtak termolumineszcenciát kimutatni *(6. ábra)*. A lumineszcencia és az exoelektron emisszió egymástól függetlenül zajlanak le.

3.3 Az exoelektronok energiaeloszlása

Az exoelektronok energiaeloszlását nagy vákuumban ellentér módszerrel több laboratóriumban is meghatározták, és az anyagok többségénél 0,1—1,0 eV nagyságrendűnek találták. Kriegseis és Scharmann pl. a $BaSO_4$-nél röntgensugárzással

való gerjesztés és termikus stimulálás után a következő energiaeloszlást mérte. Az elektronok 10%-ának az energiája nagyobb 2,7 eV-nál, 1%-a 5,3 eV-nál, 0,1%-a 8 eV-nál, míg az átlagenergia 1,1 eV [22]. Egyes BeO kerámiáknál extrém (>100 eV) energiaértékeket mértek [23].

A termikus emissziótól eltérően az exoelektronok átlagenergiájára az $\bar{E} > kT$ összefüggés érvényes. Az elektronok maximális energiája is lényegesen nagyobb, mint a termikus emissziónál. Feltételezik, hogy a termikusan kiváltott elektronok a kristály felületi rétegében levő töltésektől eredő tértől nyerik a többlet energiát.

Fotostimulálás esetén azt találták, hogy az exoelektronok maximális energiájának és a kilépési munkának az összege nagyobb, mint a stimuláló sugárzás kvantumenergiájáé, így az OSEE nem írható le a fotoeffektusra vonatkozó Einstein egyenlettel.

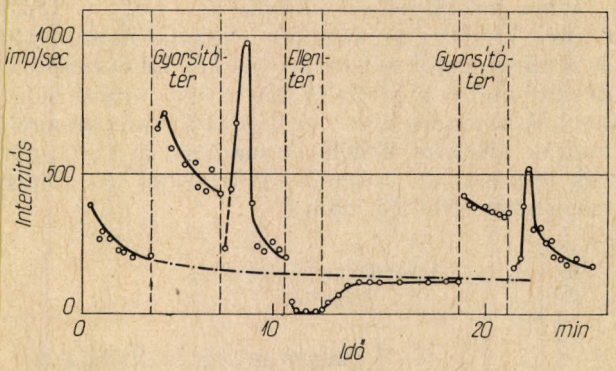
3.4 Az emissziós rétegvastagság

Az emissziós réteg vastagságát a réteg vegyi úton való leoldásával, illetve vákuumpárologtatással való vastagításával határozták meg. Bár a publikált adatok közt több nagyságrendnyi eltérés van (5×10^{-3}—10^{-6} cm) egyértelműen megállapítható, hogy az exoelektronok egy nagyon vékony, a termikus elektronok szabad úthosszával (<100 Å) összemérhető méretű felületi rétegből lépnek ki.

3.5 Az exoelektron emissziót befolyásoló tényezők

3.5.1 A külső elektromos tér hatása

Scharmann és munkatársai 10^{-5} Hgmm vákuumban a minta és a fotoelektronsokszorozó katódja közé egy rácsot helyeztek, amelyre 10^4 V/cm nagyságrendű elektromos teret kapcsoltak. Az elektromos tér be- és kikapcsolásakor, előjelének változtatásakor lejátszódó jelenségekből arra következtettek, hogy a külső tér hatására a felületen egy elektromos kettősréteg alakul ki, amely gyorsító tér esetén növeli, ellentér esetén pedig csökkenti az emissziót *(7. ábra)*. Az emisszióban időkéséssel bekövetkező változások a kettős réteg felépülésével és lebomlásával függnek össze.



7. ábra. Külső elektromos tér hatása a CaF_2 fotostimulált exoelektron emissziójára. A szaggatottan kihúzott görbe a külső elektromos tér bekapcsolása nélkül mért emissziónak felel meg [58]

3.5.2 A felületen adszorbeált gázok hatása

A felületen adszorbeált gázok és gőzök csökkentik a kilépési munkát. Az adszorpciós rétegben újabb „elektron csapdák" is kialakulhatnak.

3.5.3 A fény hatása

A szobahőmérsékleten exoelektronokat emittáló anyagok fényérzékenyek. Ionos kristályok egész sorá-nál tudtak nagy intenzitású és meghatározott hullámhosszúságú fénnyel exoelektron emissziót kiváltani (OSEE, vagy külső fotoeffektus). Egyes anyagoknál a napfény vagy a mesterséges megvilágítás optikai fadinget okoz.

3.5.4 Ionizáló sugárzással való nagydózisú besugárzás hatása

Különböző ionizáló sugárzásokkal végzett nagydózisú besugárzás komplex módon hat a TSEE érzékenységre, mivel rácshibákat képes megszűntetni, de újakat is tud kelteni. Pl. egy BeO kerámiát 10^{14} részecske/cm² fluxusú, 200 keV-os deuteron nyalábbal besugarazva a 325 °C-on levő maximum erős csökkenését, a 450 °C-os csúcs növekedését és az 535 °C-os maximum teljes eltűnését figyelték meg.

3.5.5 Hőkezelés hatása

A hőkezelésnek a tanulmányozott anyagok nagy részénél hangsúlyozott szerepe van. Általában van egy optimális hőmérséklet és hőkezelési idő, amelynél az érzékenység maximális értéket ér el. Az optimális hőmérsékleti tartományban kémiai átalakulások, kristályszerkezeti változások, vagy fázisátalakulások zajlanak le, és ez kedvez az exoelektron emisszióhoz szükséges elektroncsapdák képződésének.

A kálciumszulfát pl. 940—1000 °C-on hevítve kálciumoxiddá alakul át, és az exoelektron hozama három nagyságrenddel megnő [24]. Az Al_2O_3 γ-módosulata 1200 °C-on α-módosulatba megy át, amelynek az exoelektron emissziós képessége három nagyságrenddel jobb [25].

Hőkezelést követően legtöbbször a TSEE görbe jellege is megváltozik.

3.5.6 Mechanikai nyomás hatása

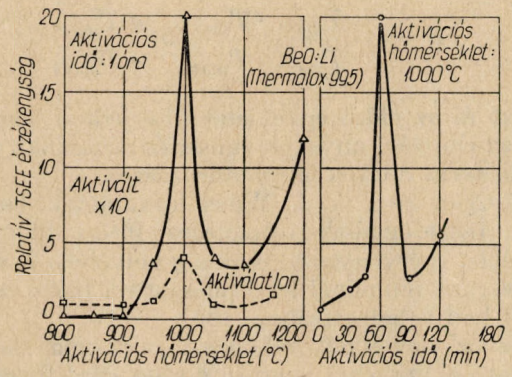
Ionos kristályoknál nyomás impulzusok („tribogerjesztés") hatására szimultán exoelektron emisz-

szió és lumineszcencia lép fel. Fémoxidok mechanikai megmunkálása utáni spontán elektronemissziót Linke [26] a felület feltöltődése miatt fellépő téremissziónak, ionos kristályoknál pedig triboindukált szekunderemissziónak, illetve fotoemissziónak tekinti.

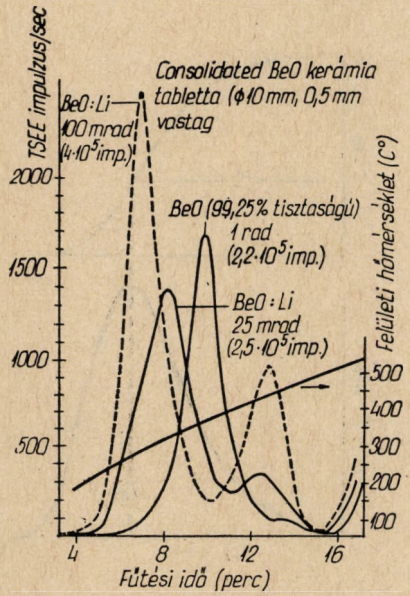
3.5.7 A „szennyező" atomok hatása

A különböző eredetű technikai és analitikai tisztaságú vegyületek eltérő minőségű és mennyiségű szennyeződéseket tartalmaznak. Ennek és az eltérő gyártástechnológiának (különböző hőkezelés, nyomás stb.) tulajdonítható, hogy az exoelektron emissziós tulajdonságaik közt jelentős különbségek vannak. Az *5. ábra* szemlélteti, hogy a különböző BeO minták TSEE görbéinek menete, a maximumok helyzete és relatív intenzitása eltérő. A relatív TSEE érzékenységek közt két nagyságrendbeli különbség van.

Amint azt számos szerző [27] kimutatta a szilárdtestek exoelektron emissziós sajátságait mesterségesen bevitt idegen atomokkal meg lehet



8. ábra. A BeO:Li TSEE érzékenységének változása az aktivációs hőmérséklet és idő függvényében [60]



9. ábra. Tiszta BeO és lítiummal aktivált BeO minták TSEE-görbéi

változtatni. A szennyezések nem tekinthetők olyan értelemben aktivátoroknak, mint a termolumineszcencia esetében. Szerepük sokkal összetettebb. A termolumineszcenciánál hatásos aktivátorok, mint pl. a Mn, Ag, Cu, ritka földfémek, stb. nem alkalmas elektron donorok. A szennyezések új elektroncsapdák keltése mellett az anyag elektromos tulajdonságait (pl. kilépési munkát) is befolyásolhatják.

A legérzékenyebb exoelektron emitter anyag, a BeO emissziós képességét, a szerző által kidolgozott eljárással [28], lítiummal való „aktiválással" tudták eddig a legnagyobb mértékben fokozni. Egy mágikus aktiválási hőmérséklet—idő kombinációnál ugrásszerűen 2—3 nagyságrenddel nő az érzékenység *(8. ábra)*. Aktiválás után a TSEE-görbék helyzete és jellege megváltozik *(9. ábra)*.

4. Szilárdtestek exoelektron emissziójának elmélete

Részben az exoelektron emisszióra vonatkozó nagyszámú, egymásnak sokszor ellentmondó kísérleti eredmény értelmezésében mutatkozó nehézségekre vezethető vissza, hogy a jelenség átfogó elméletét a mai napig sem sikerült kidolgozni. A kutatási eredmények összehasonlítása az eltérő kísérleti körülmények és a jelenség felületérzékenysége miatt ütközik nehézségekbe.

A TSEE, a TL és TSC közti párhuzamok azt sugallják, hogy ezen jelenségeknél az alapvető folyamatok hasonlóak, így az exoelektron emisszió is a szilárdtestek energiasávmodellje alapján magyarázható. A felületi és térfogati csapdákból való emissziónak várhatóan eltérő a kinetikája, így az egységes elmélet kidolgozásának elvi akadályai is vannak. A felületi állapotok ezenkívül ki vannak téve szorpciós hatásoknak, kémiai és fizikai fadingnek.

4.1 Elektronok termikus stimulálása az elektroncsapdákból

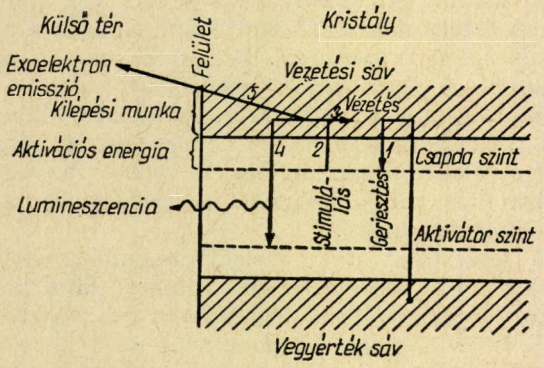
A gerjesztés hatására a szilárdtest környezetéből, vagy a vegyérték-sávjából elektronok kerülnek a tiltott sávban levő elektroncsapdákba. Termikus stimuláláskor a csapdákból kiszabaduló elektronok a vezetési sávba jutva három folyamatban vehetnek részt *(10. ábra)*:

a) az elektronsűrűséggel arányos vezetést hoznak létre (TSC);

b) lumineszcens fény kibocsátása közben rekombinálódnak a mélyen fekvő aktivátorokkal (TL);

c) a hőmérséklettől és a kilépési munkától függő valószínűséggel kilépnek a kristály felszínén (TSEE).

Bohun [29] és mások [30, 31] a TL hevítési görbék analízisére vonatkozó Randall—Wilkins elméletet [32] az alábbi egyszerűsítő feltételek



10. ábra. Termikusan stimulált vezetés, lumineszcencia és exoelektron emisszió értelmezése a szilárdtestek sávmodellje alapján

mellett alkalmazták a termikusan stimulált exoelektron emisszióra:

a) az elektronok csak egy adott energiájú csapdaszintről emittálódnak,

b) az elektronok a Maxwell-féle energia eloszlási törvényt követik,

c) a csapdaszint kiürülési sebessége arányos a csapdákban levő elektronok pillanatnyi számával (elsőfokú kinetika),

d) a csapdákból kiszabadult elektronok csak elhanyagolható mértékben rekombinálódnak a disszociált csapdákkal (monomolekuláris modell).

Annak a valószínűsége, hogy az E energiájú csapdákból az elektronok termikus stimulálás hatására a vezetési sávba menjenek át függ a kristályrács vibrációs spektrumától és a T hőmérséklettől.

Az időegységre vonatkoztatott valószínűség:

$$P = K_0 e^{-E/kT} \tag{1}$$

ahol k a Boltzmann állandó ($8{,}62 \times 10^{-5}$ eV/fok), T az abszolút hőmérséklet °K-ban, E a csapdákban levő elektronok aktivációs energiája eV-ban és K_0 a frekvencia faktor. Ha a csapdát egy potenciálgödörnek tekintjük, akkor K_0 az elektron oszcillációs és reflexiós koefficiensének a szorzata.

Ha a betöltött csapdák számát „c"-vel jelöljük, akkor a csapdák kiürülési sebességére a

$$-\frac{\mathrm{d}c}{\mathrm{d}t} = cK_0 e^{-E/kT} \tag{2}$$

kifejezést kapjuk, amelyet $q = \mathrm{d}T/\mathrm{d}t$ lineáris fűtés esetén

$$-\frac{\mathrm{d}c}{c} = \frac{K_0}{q} e^{-E/kT}\mathrm{d}T \tag{3}$$

alakban írhatunk. Az utóbbi egyenlet integrálja a következő kifejezéssel közelíthető:

$$C \equiv \frac{c(T)}{c_0} = e^{-S(1-\Sigma)} \tag{4}$$

ahol

$$S \equiv \frac{kK_0T^2}{qE} e^{-E/kT} \tag{5}$$

$$\Sigma \equiv k\left(\frac{2T}{E} - \frac{6T^2}{E^2} + \frac{24T^3}{E^3} - \ldots\right) \ll 1 \tag{6}$$

A *11. ábra* a betöltött csapdák „c" koncentrációjának és koncentráció változásának hőmérséklet-függését mutatja.

A $\frac{\mathrm{d}c}{\mathrm{d}T}(T)$ görbe maximuma az elektroncsapdák leggyorsabb kiürülési sebességének felel meg, amire $\frac{\mathrm{d}^2c}{\mathrm{d}^2T} = 0$ vagyis $S(T_{\max}) = 1$ és $C(T_{\max}) = e^{-1}$.

Ebből a q fűtési sebesség és a vezetési hevítési görbe maximumának megfelelő hőmérséklet ($T_{\max}$) között a következő összefüggést lehet kapni:

$$q = \frac{K_0 k T_{\max}^2}{E} \exp\left(-\frac{E}{kT_{\max}}\right) \tag{7}$$

Az egyenlet szerint a q hevítési sebesség növekedésével a $T_{\max}$ a magasabb hőmérséklet felé tolódik el.

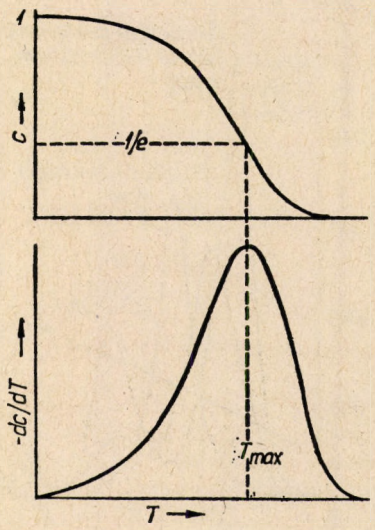
Ha $T_{\max}$ két különböző q értékre ismert, akkor az E aktivációs energiát a következő formulából lehet meghatározni.

$$E = k \cdot \frac{T_{\max 1} \cdot T_{\max 2}}{T_{\max 2} - T_{\max 1}} \ln \frac{q_2 T_{\max 1}^2}{q_1 T_{\max 2}^2} \tag{8}$$

Ezt és az előző egyenletet kiterjedten használják az emittáló anyagok emissziós csúcsának megfelelő term adatok meghatározására.

R. Chen és S. A. A. Winer kimutatták, hogy a fenti összefüggések tetszőleges fűtési függvény esetében is érvényesek, csak a q helyébe a hevítési görbe maximumánál levő pillanatnyi fűtési sebességet kell behelyettesíteni [33].

Ha az elektronok rekombinációja nem hanyagolható el, akkor a hevítési görbét leíró függvény a rekombinációs hatáskeresztmetszetet és a veze-



11. ábra. A betöltött elektroncsapdák koncentrációjának és koncentráció változásának hőmérséklet függése

tési sávban levő elektronok átlagsebességét is tartalmazza.

Ez a modell azon anyagok exoelektron emissziójának az értelmezésére használható, amelyek Fermi-nívója a tiltott sáv közepe körül helyezkedik el (szigetelők, ionos kristályok). Félvezetőknél a maximumok valószínűleg a felületen kemoszorpcióval kötött oxigén különböző szorpciós állapotainak felelnek meg, amelyekből az elektronok nem a vezetési sávon keresztül, hanem közvetlenül lépnek ki [34, 35].

4.2 Elektronok termikus emissziója a vezetési sávból

A vezetési és a TSEE hevítési görbék nem egyeznek meg minden esetben, mivel a stimulált elektronok kis sűrűségük miatt először a vezetési sávban Maxwell-eloszlást követnek, s csak akkor emittálódnak, ha energiájuk meghaladja a kilépési munkát.

Bohun az elektroncsapdák korlátozott száma miatt az exoelektron emissziót a „Boltzmann-faroknak" megfelelő nagysebességű elektronok kvázistacionárius termikus emissziójaként tárgyalja [29]. Holzapfel a diffúziós jelenségektől eltekint, és csak az elektronok kristályrácsbeli szabad úthosszának megfelelő δ emissziós mélységen belül fekvő elektroncsapdákat veszi figyelembe [36].

A vezetési elektronok n_v sűrűségének a változása lineáris fűtésnél a rekombináció elhanyagolásával:

$$\frac{\mathrm{d}n_v}{\mathrm{d}T} = -\frac{\mathrm{d}c}{\mathrm{d}T} - \frac{x}{\delta}\frac{\mathrm{d}n_{\mathrm{exo}}}{\mathrm{d}T} \tag{9}$$

ahol n_{exo} az 1 cm² felületből emittált elektronok száma.

A $\frac{\mathrm{d}n_{\mathrm{exo}}}{\mathrm{d}t}$ pillanatnyi emissziós áramsűrűséget a stacionárius termikus emisszióra vonatkozó Richardson-formulából behelyettesítve, a TSEE hevítési maximum környezetében a fenti kifejezés a következő formulába megy át:

$$\frac{\mathrm{d}c}{\mathrm{d}T} \simeq \left(\frac{1}{\delta} + \frac{1}{l}\right)\frac{\mathrm{d}n_{\mathrm{exo}}}{\mathrm{d}T} \tag{10}$$

ahol

$$\frac{1}{l} = \frac{q}{v}\frac{\frac{\varphi}{kT} + \frac{1}{2}}{T} \tag{11}$$

és v az elektonok átlagsebessége, φ a kilépési munka.

A vezetési és TSEE hevítési görbék a zárójeles szorzótényezővel különböznek egymástól. Ha a hevítési maximumok közel azonos hőmérsékleten vannak, akkor az „l" termikus hatótávolság a $T_{\max}$ környezetében a kilépési munkának az exoelektron emisszió intenzitására gyakorolt hatását jellemzi. Ha a „termikus hatótávolság" nagyobb, mint az emissziós mélység, akkor a kilépési munka nem befolyásolja az emissziós intenzitást, fordított esetben viszont a termikus energia nem elegendő ahhoz, hogy az elektronok többsége a külső térbe emittálódjék.

Az itt nem részletezett számításokból következik, hogy a kilépési munka csak szobahőmérséklet alatt okoz figyelemreméltó eltolódást a TSC és TSEE hevítési görbék maximumai közt. Normális frekvenciafaktor értéknél (10^{11} sec^{-1}) szobahőmérséklet felett kicsi a kilépési munka hatása.

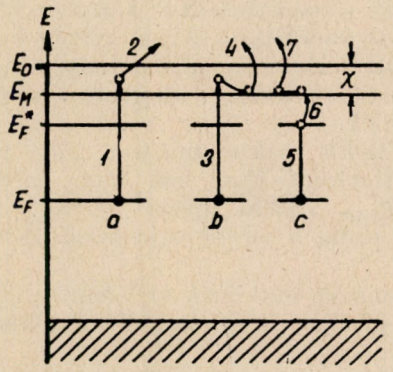
4.3 Elektronok fotostimulálása a csapdákból

A fotostimulált exoelektron emisszióra vonatkozó kísérleti anyag és elméleti eredmény szegényesebb, mint a TSEE esetében.

A színcentrumokkal rendelkező alkálihaloidokról áll rendelkezésre a legtöbb adat [16]. Ezeknél az alábbi három mechanizmust tételezik fel a fotostimulált exoelektron emisszióra *(12. ábra)*.

a) Az *F*-centrumok közvetlen fotoionizációja révén szabaddá váló „forró" elektronok exoelektronként emittálódnak (a *12. ábrán* az 1. és 2. átmenet).

b) Fototermikus ionizáció, amelynél az elektronok a vezetési sávba kerülnek, ütközési folyamatok következtében elvesztik energiájukat és termikus elektronokká válnak (a *12. ábrán* a 3. és 4. átmenet).



12. ábra. A fotostimulált exoelektron emisszió különböző mechanizmusai [61]

c) Fototermikus kétlépcsős ionizáció, amelynél a foton abszorbciója révén az elektron csak az *F* centrum gerjesztett állapotába kerül, innen termikusan a vezetési sávba jut, ahol termikus elektronként viselkedik (a *12. ábrán* az 5., 6. és 7. átmenet).

Az OSEE intenzitás a három folyamat eredője. Tolpygo és munkatársai szerint [37] az Auger-effektusnak is döntő szerepe van a fotostimulált exoelektron emisszióban, ha a tiltott sáv szélessége jóval nagyobb, mint a kilépési munka.

Fotostimulálás esetén az elektronok aktivációs energiája kisebb, mint termikus stimuláláskor.

Az aktivációs energiák hányadosa a Franck—Condon viszony:

$$\chi = \frac{E_{\text{foto}}}{E_{\text{termikus}}} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$$

ahol ε az optikai, ε_0 pedig az elektrosztatikus dielektromos állandó.

5. Az exoelektron emisszió jelenségének gyakorlati alkalmazása

5.1 Exoelektron dozimeterek

Kramer [38] és tőle függetlenül Gourgé és Hanle [39] javasolták elsőként a $CaSO_4$ exoelektron emissziójának az ionizáló sugárzások mérésére való alkalmazását. Azóta számos kutatóintézetben dolgoztak ki a gyakorlatban is jól bevált exoelektron dozimétereket.

Dozimetriai alkalmazásnál általában a termikus stimulálást részesítik előnyben az optikaival szemben, mivel az előbbi esetben nagyobb érzékenység és jobb reprodukálhatóság érhető el. A fotostimulálásnak ennek ellenére vannak bizonyos előnyei a termikus stimulálással szemben. Nagy felületű dozimeter, (pl. EE aktív anyaggal átitatott papír) esetében az egyes felületelemek szeparáltan értékelhetők ki. Így egyrészt az ismeretlen dózis nagyságrendje a kiértékelés előtt az optimális mérési feltételek beállításához meghatározható. Másrészt a dozimeter egyes részeit különböző abszorbensekkel takarva a sugárzás fajtájára és energiájára is információt lehet kapni.

A TSEE dozimetriában alkalmazható detektoranyagoknak a következő alapvető feltételeket kell kielégíteniök.

a) A TSEE maximumnak a 150—500 °C hőmérséklettartományban kell lenni, mivel alacsonyabb T_{max} esetén gyors fading, magasabb T_{max}-nál pedig a termikus emisszió fellépése várható.

b) Kémiailag stabilnak kell lennie, és felületén gázokat, gőzöket minél kisebb mértékben szabad megkötnie.

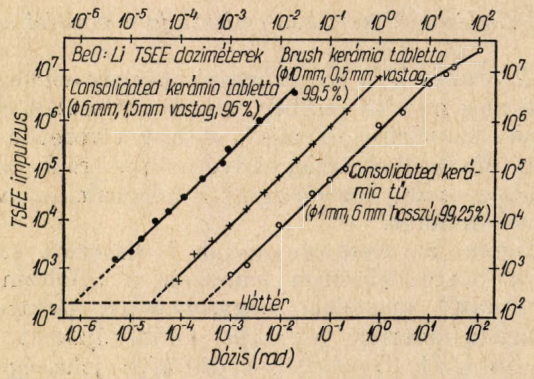
c) Termikusan stabilnak kell lennie, hogy levegőn és számlálógázban sok hőciklus (temperálás, kiértékelés) után se változzanak meg dozimetriai jellemzői.

d) Az anyagnak érzékenynek kell lennie, vagyis kis dózissal való besugárzás után felületegységenként nagyszámú exoelektront kell emittálnia.

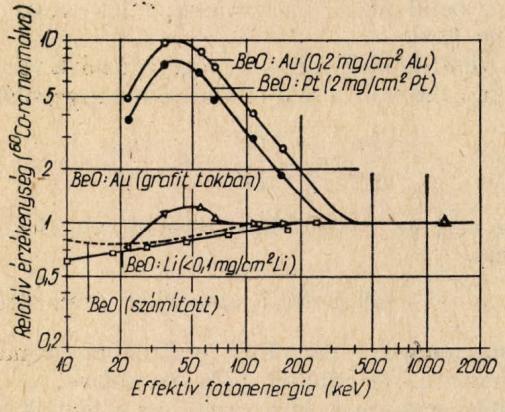
e) Dozimetriai sajátságainak (pl. LET-függés, dózislinearitás, energiafüggés stb.) az adott mérési célra megfelelőnek kell lennie.

A fenti követelményeket többé-kevésbé kielégíti a termolumineszcens dozimetriában alkalmazott anyagok egy része (pl. LiF, CaF_2, $CaSO_4$: Mn, BeO, $Li_2B_4O_7$), valamint a $BaSO_4$, $SrSO_4$, az Al_2O_3 α-módosulata. A felsorolt anyagok közül a legkedvezőbb exoelektron emissziós és dozimetriai tulajdonságokkal a BeO kerámiák rendelkeznek. A félvezető gyártásánál alkalmazott különböző BeO kerámia lapkák 10^4—10^5 TSEE imp/cm²/rad érzékenysége a termolumineszcens és fotolumineszcens dozimeterekkel azonos méréstartományú exoelektron dózismérők készítését teszi lehetővé. A BeO exoelektronhozama hőkezeléssel és aktiválással tovább fokozható. Az Oak Ridge Nemzeti Laboratóriumban előállított BeO:Pt TSEE dozimeterek érzékenysége 4×10^6 TSEE impulzus/cm²/rad.

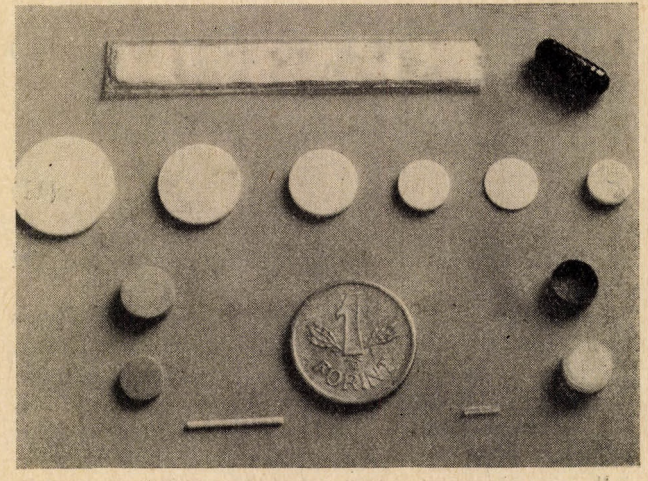
Jelenleg a legérzékenyebb szilárdtest dózismérőnek a szerző által előállított BeO:Li TSEE dozimeter tekinthető, amelynek alsó mérési ha-



13. ábra. BeO:Li exoelektron dozimétertípusok dózisgörbéi



14. ábra. Exoelektron dozimeterek energiafüggése



15. ábra. Az MTA Orvos-Radiológiai Tanszéki Kutatócsoportban kifejlesztett BeO:Li exoelektron dozimeterek

tára gammasugárzásra 1 μrad [40, 41]. A *13. ábra* különböző kerámia alapanyagú BeO:Li exoelektron dozimeterek dózisgörbéit mutatja. A BeO:Li exoelektron dozimeterek energiafüggése 30 keV feletti kvantumenergia esetén 20%-nál kisebb *(14. ábra)*. A TSEE görbe maximuma 300 °C körüli hőmérsékleten van, így szobahőmérsékleten az elektronok spontán emissziójának a valószínűsége kicsi. A dozimeterek reprodukálhatósága ±6%-on belül van. Egy-egy dozimeter több mint százszor felhasználható érrékenységváltozás nélkül. A BeO:Li exoelektron dozimeterek különböző méretű kerámia lapkák és pálcikák, valamint műanyagtasakba zárt por formájában kerülnek *(15. ábra)* alkalmazásra. Sterilizálhatók, így in vivo mérésekre is alkalmasak.

Az exoelektron dozimeterek effektív érzékeny rétege rendkívül vékony (<100 Å), így ideális szilárdtest Bragg—Gray detektorok, vagyis az abszorbeált dózist határozzák meg. Az ionizáló sugárzások mindegyikének detektálására alkalmasak. A térfogati effektusokon alapuló szilárdtest-dózismérőknél lényegesen jobb hatásfokkal mérik a kis áthatolóképességű sugárzásokat (pl. alfa-sugárzást, egyéb nehéz töltött részecskéket, delta-részecskéket, lágy béta- és röntgensugárzást). A neutron-dozimetriában a proton-radiátorral fedett exoelektron dozimeterek alkalmazhatók. Bizonyos alapmérések elvégzésére a konvencionális dozimétereknél alkalmasabbak. Utalnék itt a határfelületek dozimetriájára [42] a szekunder elektronok mérésére [43], a mikro- és in vivo dozimetriára [44]. A TSEE görbék analízisével az ismeretlen sugárzás minőségére is következtethetünk [45].

A nagyérzékenységű BeO:Li exoelektron dozimeterekkel néhány órás expozíció után meghatározható a természetes háttérsugárzás értéke [46]. A *16. ábra* a környezet komplex sugárzási terével exponált BeO:Li exoelektron dozimeterek jelzését tünteti fel az expozíciós idő függvényében.

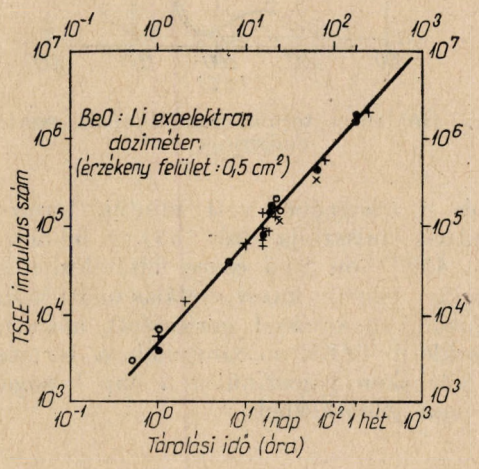
További előrelépést jelent a szilárdtest dozimetriában a TELEX-elv (*t*ermikusan előhívott *l*umineszcencia és *ex*oelektron) alkalmazása. Az eljárás azon alapszik, hogy a BeO:Li detektorok 180 °C-on levő termolumineszcens (TL) csúcsának kiértékelése nincs befolyással a 300 °C-on jelentkező TSEE maximumára. Egy dozimeter TL és TSEE maximumának szeparált mérésével 10^{-6}—5×10^{2} rad dózistartomány fogható át. Egy detektorral a kis és nagy áthatolóképességű sugárzások külön-külön mérhetők.

5.2 Az exoelektron emisszió jelenségének szerepe a kémiában és biológiában

Kémiai átalakulásokat (pl. oxidációt), kristályszerkezetbeli változásokat (pl. kristályvíz leadást) és fázisátalakulásokat, adszorpciós jelenségeket gyakran követi exoelektronok emissziója. Ezen folyamatok általában a sugárzással gerjesztett exoelektronok emissziós spektrumát is befolyásolják. Elsősorban a szilárdtestek felületi állapotának (hibahelykoncentráció, szennyezések, adszorbeált gázok) a meghatározására kínál érzékeny mérési lehetőséget. A sugárzás indukált exoelektron emisszióval igen kis koncentrációban jelenlevő szennyezések mutathatók ki [47]. A szennyezésnek természetesen exoelektron emissziót mutató anyagnak, a hordozónak pedig inaktívnak kell lenni. Ezzel az eljárással 10^{-6}—10^{-13} g mennyiségben jelenlevő anyagok azonosíthatók. Az ivóvíz gipsztartalmának meghatározásához egy csepp víz is elegendő.

Párhuzamot találtak a katalizátorok katalitikus aktivitása és exoelektron emissziója közt [48]. Így a kémiailag stimulált exoelektron emisszió új lehetőséget teremt a katalizátorok tanulmányozására [49].

Biológiai eredetű anyagok (aminosavak, tojásfehérje, hemoglobin) exoelektron emisszióját is megfigyelték [50, 51]. A fehérjék, a DNS, az enzimek, a különböző biológiailag aktív vegyületek exoelektron emissziójának a tanulmányozása egyes biokémiai és sugárbiológiai folyamatok megértéséhez szolgáltathat értékes adatokat.



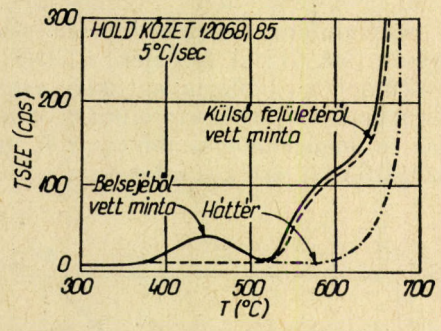
16. ábra. Természetes háttérsugárzással besugarazott BeO:Li exoelektron dozimeterek expozíciós görbéje

Újabb kutatások szerint a SiO_2 toxicitása az exoelektron emissziójával függ össze [52]. A szilikózis előidézésében az első folyamat a szilíciumdioxid szemcsék és a sejtmembrán közt végbemenő elektrontranszfer reakció. A feltételezés mellett szól az is, hogy egyéb szilikózist okozó anyagok (pl. BeO) is jó exoelektron emitterek.

5.3 Az exoelektron emisszió geológiai alkalmazása

A kőzetek nagy része emittál exoelektronokat. A TSEE görbéket a tektonikus aktivitás, a tárolt deformációs energia, az ásvány összetétele, a termikus és sugárzási behatások befolyásolják [53]. A TSEE görbék analízisével, a rácshibák jellegének a meghatározásával a kőzetek geológiai történetére nyerhetünk adatokat.

Az Apollo 11 és az Apollo 12 program keretében gyűjtött holdkőzet és porminták exoelektron emisszióját az Oak Ridge Nemzeti Laboratóriumban tanulmányozták. Közvetlenül a felületről és néhány centiméter mélységből vett „érintetlen" finom por mintáknál nem tudtak előzetes besugárzás nélküli természetes exoelektron emissziót kimutatni. Nagy dózisú besugárzás után sem mértek exoelektronokat, ami az elektroncsapdák hiányára, vagy nagyon kis koncentrációjára utal. A pormintákat különböző előkezelésnek (hevítés vákuumban, illetve oxidáló és redukáló atmoszférában, besugárzás stb.) kitéve a 150—550 °C tartományban több TSEE maximum is fellépett [54]. A holdkőzetek nagy részénél előkezelés nélküli természetes exoelektron emissziót is kimutattak. A *17. ábrából* kitűnik, hogy a kőzet belsejéből és a felszínéből vett minták természetes exoelektron emissziója eltér [55]. A felületi mintánál a 450 °C-on levő csúcs feltételezhetően az erős napfény okozta fotostimulálás miatt hiányzik. Az ionizáló sugárzással gerjesztett alacsonyabb hőmérsékletű TSEE maximumok a természetes TSEE görbéken valószínűleg a nap hősugárzása miatt nem jelentkeznek.



17. ábra. Holdkőzet termikusan stimulált exoelektron emissziója

6. A fejlődés várható irányai

Az exoelektron emisszió mélyebb megértéséhez a párhuzamosan végzett exoelektron emissziós, stimulált vezetés és lumineszcencia méréseknél komplexebb vizsgálatok szükségesek. A felsoroltakat elektronspinrezonancia (ESR), Auger elektron spektroszkópiai és kisenergiájú elektrondiffrakciós (LEED) mérésekkel kiegészítve kerülnénk közelebb az exoelektron emisszió mechanizmusának pontosabb értelmezéséhez. Az ilyen irányú kutatásokat egy jól felszerelt szilárdtestfizikai intézet kutatóinak összehangolt munkájával minél előbb el is kellene végezni. Az elméleti alapok tisztázása tudatosabbá és így gyümölcsözőbbé tenné az alkalmazott kutatásokat is.

Az alkalmazások közül az exoelektron dozimetria területén a legnagyobb a haladás. Ennek ellenére egyetlen gyár sem jelentkezett még a világpiacon exoelektron dózismérővel. Ez részben a kezdeti reprodukciós nehézségekre, a nonlineáris dózisfüggésre és főként arra a tényre vezethető vissza, hogy a konvencionális szilárdtest-dozimeterekkel szembeni előnyei csak az utóbbi néhány évben váltak nyilvánvalóvá. A termo- és fotolumineszcens dózismérők is viszonylag új gyártmányok, és a bennük rejlő lehetőségeket sem használták ki teljes mértékben. Így érthető ezeknek a gyáraknak a tartózkodása és a szabadalmak elfektetése. A feltételek azonban már megértek arra, hogy az exoelektron dózismérők kereskedelmi forgalomba kerüljenek. Alkalmazásuk a dozimetria és a sugárvédelem speciális területein (in vivo és mikrodozimetria, a népesség sugárterhelésének a mérése), valamint a környezetvédelemben (pl. atomerőművek környezetében a külső sugárzási szintek mérése) kecsegtet sok előnnyel.

Az exoelektron emisszió a szilárdtestek felületi szerkezetének és tisztaságának a tanulmányozására kínál új lehetőséget.

A geológiában kiegészítheti, sőt helyettesítheti a termolumineszcencián alapuló méréseket, mivel az exoelektron emisszió gyakoribb és nagyobb hőmérsékleti stabilitást mutató jelenség.

Néhány technikai alkalmazásra (pl. exoelektron fényképezés, exoelektron kamera, optikai felületek vizsgálata) is meg van a reális lehetőség.

A szerves anyagok exoelektron emissziójának a tanulmányozása a közeljövőben előtérbe fog kerülni. Meggyőződésem, hogy ma még egyes misztikusnak tűnő biológiai folyamatokért (pl. sugárhatások késői jelentkezése) bizonyos óriásmolekulák (pl. DNS) exoelektron emissziója a felelős.

IRODALOM

1. Curie, M.: Comptes Rendus *129.* 714. 1899.
2. Rutherford, E.: Phil. Mag. *49.* 161. 1900.
3. Villard, P.: Société de Physique, 1900, július.
4. Mc Lennan, J. C.: Phil. Mag. *3.* 195. 1902.
5. Gordan, P., Scharmann, A., Seibert, J.: Phys. stat. sol. *33.* K 97. 1969.
6. Christoph, W.: Ann. Phys. *23.* 747. 1935.
7. Pätow, H.: Z. Phys. *111.* 770. 1939.
8. Lauterjung, K. H., Neuert, H.: Z. Phys. *122.* 266. 1944.
9. Kramer, J.: Z. Phys. *125.* 739. 1949.
10. Kramer, J.: Der metallische Zustand. Vandenhöck and Rupprecht, Göttingen, 1950.
11. Kramer, J.: Z. Phys. *128.* 538. 1950.
12. Kramer, J.: Z. Phys. *129.* 34. 1951.
13. Kramer, J.: Z. Phys. *133.* 629. 1952.
14. Kramer, J.: Naturwissenschaften *41.* 160. 1954.
15. Lepper, J.: Z. Naturf. *10a.* 47. 1955.
16. Bohun, A.: Czech. J. Phys. *6.* 496. 1956.
17. Becker, K.: IAEA Atomic Energy Review *8.* 173. 1970.
18. Eckey, H.: Z. Phys. *232.* 87. 1970.
19. Robinson, E. M., Oberhofer, M.: Health Physics *18.* 434. 1970.
20. Kanturek, J.: Czech. J. Phys. *6.* 349. 1956.
21. Pipinis, P. A., Grigas, B. P.: Opt. Spektr. *18.* 85. 1965.
22. Kriegeis, W., Scharmann, A.: Phys. stat. sol. *33.* K 41. 1969.
23. Ecker, K. H. és mtsa.-i: Proc. 4th Conf. on Luminescence Dosimetry. Krakow, 1974.
24. Hanle, W. és mtsa-i: Nukleonik. *8.* 129. 1966.
25. Holzapfel, G., Chryssou, E.: Proc. 3rd Int. Conf. on Luminescence Dosimet)y Risö., 1971. 561.
26. Linke, E.: Z. Angew. Phys. *29.* 241. 1970.

27. Spurný, Z. és mtsa-i: Proc. 2nd Int. Conf. on Luminescence Dosimetry. Gatlinburg. 1968. 220.
28. Magyar Szabadalom 165169. 1971.
29. Bohun, A., Dolejsi, J.: Czech. J. Phys. *9*. 578. 1959.
30. Holzapfel, G.: Phys. stat. sol. *33*. 235. 1969.
31. Balarin, M.: Acta Phys. Austriaca *17*. 127. 1963.
32. Randall, J. T., Wilkins, H. F.: Proc. Roy. Soc. *Ser. A* 184, 347, 366, 390, 1945.
33. Chen, R., Wiener, S. A. A.: J. of Appl. Phys. *41*. 5227. 1970.
34. Hieslmayer, H., Müller, H.: Z. Phys. *152*. 642. 1958.
35. Menold, R.: Naturwissenschaften *46*. 138. 1959.
36. Holzapfel, G.: Ph. D. Dissertation. Berlin 1968. D 83.
37. Tolpygo, E. J., Tolpygo, K. B., Sejnkman, M. K.: Izv. AN SzSzSzR *30*. 1901. 1966.
38. Kramer, J.: Acta Phys. Austriaca *10*. 392. 1957.
39. Gourge, G., Hanle, W.: Acta Phys. Austriaca *10*. 427. 1957.
40. Boros, L.: Magyar Radiológia *23*. 257. 1971.
41. Boros, L.: Acta Physica Acad. Sci. Hung. *34*. *(2—3)* 255. 1973.
42. Ennow, K.: IAEA-SM-160/35. 179. 1973.
43. Kramer, J.: PTB-Mitteilungen *80*. 343. 1970.
44. Boros, L., Szy, D., Zsebők, Z.: Magyar Radiológia *26*. 112. 1974.
45. Boros, L., Szy, D.: Izotóptechnika *15*. 319. 1972.
46. Boros, L.: Magyar Radiológia *26*. 305. 1974.
47. Kramer, J.: Z. Angew. Phys. *15*. 20. 1963.
48. Nassenstein, H., Menold, R.: Acta Phys. Austriaca *10*. 402. 1957.
49. Sato, N., Seo, M.: Nature *216*. 361. 1967.
50. Balabanov, N. P.: PTB-Mitteilungen *80*. 353. 1970.
51. Vladimirov, V. G., Vladimirov, G. G.: Radiobiologija *8*. 610. 1968.
52. Robock, U., Teichert, U.: PTB-Mitteilungen *80*. 353. 1970.
53. Lewis, D. R.: Geol. Soc. Am. Bull. *77*. 761. 1966.
54. Gammage, R. B., Becker, K.: ORNL-TM-3131, 1970.
55. Gammage, R. B., Becker, K.: Proc. 2nd. Lunar Sci. Conf. M. I. T. Press 1971. 2057.
56. Ford, L. H. és mtsa-i: Z. Angew. Phys. *30*. 259. 1970.
57. Petel, M., Holzapfel, G.: Proc. 4th Int. Symp. Exoelectrons Liblice. 1973.
58. Scharmann, A., Kriegseis, W., Seibert, J.: PTB-Mitteilungen *80*. 332. 1970.
59. Crase, K. W., Becker, K., Gammage, R. B.: ORNL-TM-3572 1971.
60. Regulla, D. F., Drexler, G., Boros, L.: Proc. 3rd Int. Conf. on Luminescence Dosimetry. Risö. 1971. 601.
61. Bohun, A.: PTB-Mitteilungen *80*. 323. 1970.

AZ EGYMÁSHOZ KÖZEL LÁTSZÓ CSILLAGOK MOZGÁSA

Baky Miklós
Nagykőrös

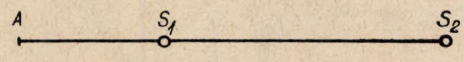
A csillagfény pályája elhajlik a Nap közelében. A relativitás elméletéből adódó jelenség első kísérleti kimutatása 1919-ben történt meg. A mérést azóta többször megismételték. Például 1952-ben $(8{,}2 \pm 0{,}5) \cdot 10^{-6}$ radián értéket kaptak, ami kb. 1,75″ szögnek felel meg. A mérés lényegében a relativitás elmélet egyik kísérleti igazolásának is tekinthető.

Az előbbi jelenséget alapul véve megvizsgálom mi történik akkor, ha két csillag közül az egyik éppen eltakarja előlünk a másikat mozgásuk közben. (1. ábra.) Mivel a csillagok pontszerűknek látszanak, ez elég ritka jelenség lehet. Ha azonban csillagrendszerünkben a csillagok óriási számát vesszük, elvileg mégse zárható ki a fedés lehetősége.

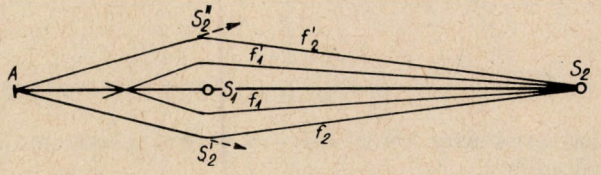
E jelenség megvalósulásához az kell, hogy S_1 éppen akkor érjen a vizsgált helyre, amikor az S_2-ből (korábban) elindult fotonok éppen az S_1S_2 sugarú gömbfelületre érnek (2. ábra).

S_1 gravitációs tere azt eredményezi, hogy az S_1-hez közelebb haladó f_1 és f_1' sugarak erősebben, a távolabb haladók kisebb mértékben eltérülnek. Közöttük kell lenni olyanoknak is, amelyek éppen szemünk távolságában találkoznak: f_2 és f_2'. Persze nemcsak két sugár van, hanem S_1 körül számtalan. Így S_2 helyett az $S_2'S_2''$ átmérőjű gyűrűt kell látnunk! A gyűrű átmérője függ a tőlünk való távolságoktól, valamint S_1 gravitációs terének erősségétől is. Másrészt a gyűrű minden pontjának látszólagos fényessége meg kell egyezzen S_2 fényességével. Hiszen pl. f_2 az S_2-ről ebben az irányban haladó teljes fénynyalábot tartalmazza.

A fentiek alapján S_2 látszólagos mozgása különleges. A találkozási helyhez közeledve sebessége



1. ábra

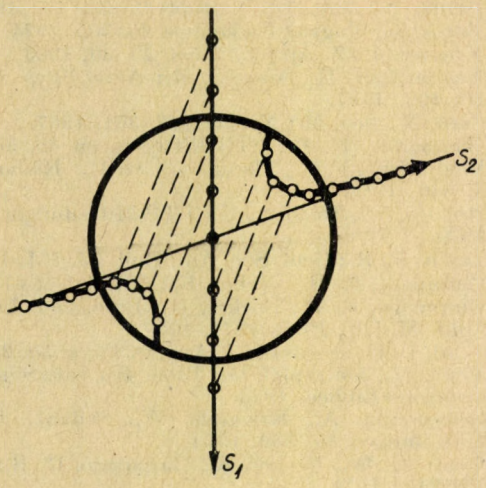


2. ábra

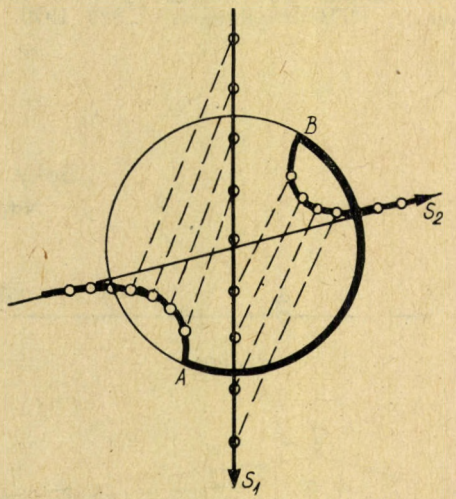
lassulni látszik, és iránya is késsé eltolódik. (3. ábra.) Egy bizonyos pontban (a későbbiekben kiszámított r távolság elérésekor) képe hirtelen gyűrűvé válik, majd annak eltűntével gyorsulni fog, míg tényleges sebességét és irányát el nem éri.

Jóval gyakrabban előfordulhat — bár kevésbé észlelhető — az az eset, amikor a két csillag nem fedi, hanem igen közel halad el egymás mellett. S_2 mozgása most sem egyenletes. Pályája az előzőhöz kissé hasonló lesz: Kezdetben itt is lassul és kitér tényleges mozgásirányából. (4. ábra.) Majd jóval gyorsabban egy ívet ír le $(A—B)$, azután látszólagos pályája fokozatosan visszatér valódi mozgásvonalába.

Az alábbiakban megpróbálom közelítőlegesen megbecsülni a gyűrű sugarát, illetve átmérőjének látószögét. Ettől valamivel kisebb lehet a 4. ábra által leírt jelenség $A—B$ ívének sugara, ha első közelítésben körívnek tekintjük. Mivel a gyűrű látószögére nagyon kicsi érték adódik, kb. a má-



3. ábra



4. ábra

sodperc század része, ezért ez utóbbi esetet nem is vizsgálom.

A számítás pontos elvégzéséhez az S_2-ből induló fénysugár pályáját elnyújtott hiperbola ívnek kellene tekinteni, amelynek fókuszpontja S_1. Nem ezt az utat követem, hanem egy kisebb távolságon a maximális eltérülést veszem. Az így kapott eredmény hibája még nem lesz olyan nagy, hogy a végső következtetéseket lényegesen módosítaná.

A felhasznált adatok: a hozzánk közelebbi csillag (S_1) távolsága legyen d_1, a két csillag távolsága egymástól pedig d_2. Az S_1 adatai egyezzenek meg a mi Napunk körülbelüli adataival: $R = 7 \cdot 10^8$m és $g = 2{,}73 \cdot 10^2$ m/s^2. Legyen továbbá a vizsgált fénysugaraknak S_1 középpontjától való távolsága r.

A közelítést arra alapozom, hogy a fénysugár S_1 közelébe érve „esik" S_1 felé és ez $2r$ hosszúságú úton következik be. Ezért az esés ideje:

$$t = \frac{2r}{c}$$

A fénysugár eltérülésének mértéke S_1 felé:

$$s = \frac{a}{2} \cdot t^2$$

vagyis az esés alatt megtett út lesz (5. ábra). r távolságban a gyorsulás:

$$a = \frac{g}{\left(\frac{r}{R}\right)^2}$$

hiszen a gravitáció mértéke a távolság négyzetének arányában csökken.

Helyettesítsük t és a értékét az útképletbe:

$$s = \frac{g}{2\left(\frac{r}{R}\right)^2} \cdot \frac{4r^2}{c^2} = 2g \cdot \frac{R^2}{c^2}$$

Másrészt az 5. ábra hasonló háromszögei alapján:

$$x : r = (d_1 + d_2) : d_2$$

tehát

$$x = \frac{r(d_1 + d_2)}{d_2}$$

Mivel a fényt az aszimptota vonalának irányából látjuk, vegyük a 6. ábra hasonló háromszögeit:

$$x : s = d_1 : r$$

vagy

$$x = \frac{sd_1}{r}$$

A két utóbbi egyenletet összehasonlítva:

$$\frac{r(d_1 + d_2)}{d_2} = \frac{sd_1}{r}$$

Ebből r-et kifejezem:

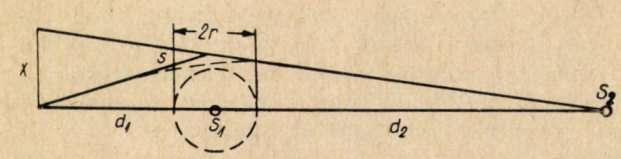
$$r = \sqrt{\frac{sd_1d_2}{d_1 + d_2}}$$

s helyére a gyorsulásból kiszámított értéket írva:

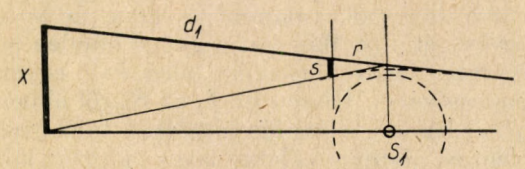
$$r = \sqrt{\frac{2gR^2}{c^2} \frac{d_1d_2}{d_1 + d_2}}$$

Ezzel megkaptuk az S_1 körül látható gyűrű sugarát:

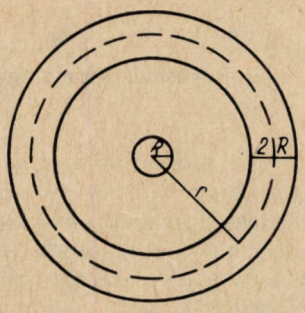
$$r = \frac{R}{c} \sqrt{2g \frac{d_1d_2}{d_1 + d_2}}$$



5. ábra



6. ábra



7. ábra

Egy elképzelt konkrét esetet nézve, legyen $d_1 = 50$ fényév $\approx 5 \cdot 10^{17}$ m, $d_2 = 150$ fényév $\approx 15 \cdot 10^{17}$ m, ekkor:

$$r = \frac{7 \cdot 10^8 m/s}{3 \cdot 10^8 m} \sqrt{2 \cdot 2{,}73 \cdot 10^2 m/s^2 \frac{5 \cdot 10^{17}\, 15 \cdot 10^{17} m^2}{20 \cdot 10^{17} m}}$$

Innen r számszerű értéke:

$$r = 3{,}34 \cdot 10^{10} \text{ m}$$

Ennek látószöge:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{3{,}34 \cdot 10^{10}}{5 \cdot 10^{17}} = 6{,}67 \cdot 10^{-8}$$

Mivel nagyon kis szögek esetén $\alpha = tg\alpha$, ezért

$$\alpha = 6{,}67 \cdot 10^{-8} \text{ rad},$$

másodpercre átszámítva, a gyűrű látószöge:

$$2\alpha = \frac{13{,}34}{485} = 0{,}027''$$

Mivel ez a szög az észlelhetőség határán van, inkább a magnitúdó látszólagos növekedését becsülöm meg. Ehhez az eddig használt adatok mellé további feltételezést teszek: S_2 látszólagos magnitúdója egyezzen meg S_1-ével. Eszerint, mivel S_2-t négyszer távolabbra vettem, $4^2 = 16$ szor több fényenergiát kell kibocsásson, hogy egyforma fényességűnek látsszanak.

Ekkor a gyűrű területegységre eső fényintenzitása látszólag azonos lesz S_1-ével (7. ábra). Ezt kihasználva:

$$T_{gy} = 2r\pi \cdot 2R \approx I_1$$
$$T_{S_1} = R^2\pi \approx I_2$$

Ezeket az ismert összefüggésbe helyettesítve:

$$m_1 - m_2 = -2{,}5 \lg \frac{I_1}{I_2} = -2{,}5 \lg \frac{2r\pi \cdot 2R}{R^2\pi}$$

Egyszerűsítve és az adatokat behelyettesítve:

$$m_1 - m_2 = -2{,}5 \lg \frac{4 \cdot 3{,}34 \cdot 10^{10}}{7 \cdot 10^8}$$

Ebből

$$m_1 - m_2 = -6^m, 7$$

A kapott magnitúdó növekedés azt mutatja, hogy ezt a jelenséget a nováknak nevezett csillagok között kell keresni. Amennyiben a nova a felvillanás befejeződése után két csillagnak mutatkozik, és látszólagos fényesség növekedése is az ily módon számítottakkal egyezik, valószínű, hogy az általam leírt jelenségről van szó. A nova ilyen jellegű „viselkedésére" van ugyanis megfigyelési példa. (Kulin: A távcső világa, Gondolat kiadó, 1975. 318. oldal.)

Végül meghatározható az a legkisebb távolság, ahonnan a gyűrű még észlelhető. Ehhez az S_2 peremétől induló és az S_1 felszínét „súroló" fénysugarakat kell venni. Ezek térülnek el a legjobban. Mivel S_1 adatai a Nap adataival egyeznek, a maximális eltérülés szöge itt is $8{,}2 \cdot 10^{-6}$ rad lesz. Ekkor:

$$\operatorname{tg}\alpha_{max} = \frac{R}{d_{1,min}}$$

Ebből behelyettesítve:

$$d_{1,min} = 8{,}5 \cdot 10^{13} \text{ m}$$

A nova-jelenségnél a magnitúdó növekedés az itt számított értéknél általában lényegesen nagyobb. Elképzelhető azonban olyan eset, amikor S_2 az S_1-hez képest igen nagy átmérőjű, nagy luminozitású csillag. Ekkor a gyűrű szélességének is nagyobbnak kell lennie, esetleg az egész körlap fénylik, ami további fényességnövekedést eredményez.

A látószög meghatározásában követett közelítési módszer alkalmazásához felhasználtam Taylor —Wheeler: Téridő-fizika (Gondolat Kiadó, 1974.) című könyvének 154. és 350. oldalán közölteket.

TACHIONOK, A FÉNY SEBESSÉGÉNÉL NAGYOBB SEBESSÉGGEL MOZGÓ RÉSZECSKÉK

V.Sz. Barasenkov
Egyesített Atommagkutató Intézet,
Dubna

A képzetes tömeg

Létezhetnek-e a természetben olyan részecskék, amelyek a vákuumbeli fénysebességnél nagyobb sebességgel mozognak? A relativitáselmélet alapjainak az ismerője erre a kérdésre többnyire tagadólag válaszol, minthogy az ilyen részecskék létezése első pillanatra ellentmondani látszik a relativitáselmélet kísérletileg sokoldalúan igazolt alapjainak. (Az ilyen nagy sebességű részecskéket a ταχύς = gyors görög szóból tachionoknak nevezik.)

A speciális relativitáselméletből nyert egyik legfontosabb következtetés ugyanis az, hogy az m nyugalmi tömegű, v sebességű részecske teljes energiája

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1-(v/c)^2}},$$

ahol $c \approx 3 \cdot 10^{10}$ cmsec^{-1} a fény sebessége vákuumban. Ennek az összefüggésnek az alapján látható, hogy ha a részecske sebessége a fénysebességhez tart, az energiája végtelenné válik, ha pedig a sebessége túllépi a fénysebességet, a nevező képzetessé lesz. Hasonlóan viselkedik a részecske $p = mv/\sqrt{1-(v/c)^2}$ impulzusa és $t = \tau/\sqrt{1-(v/c)^2}$ élettartama is (τ a részecske nyugalmi élettartama), és minden, a részecskét jellemző olyan mennyiség, amelynek kifejezésében az

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}}$$

relativisztikus tényező szerepel.

A fénysebességnél nagyobb sebességű mozgás lehetetlenségét már Poincaré is említi, majd határozottan Einstein mondja ki híres munkájában, amelyben először fogalmazta meg a speciális relativitáselmélet alapjait.

Ezeket a következtetéseket azonban nem szabad olyan komolyan venni, mint első pillanatban gondolnánk; arról van ugyanis szó, hogy a fénysebességnél kisebb sebességű részecske sebességének *folytonos* növekedése révén nem válhat tachionná és megfordítva: a tachionok, ha egyáltalán léteznek, sebességük folytonos csökkenésével nem alakulhatnak át közönséges, fénysebességnél kisebb sebességű részecskékké: bradionokká. A fény sebességénél kisebb sebességű részecskékre a szerző a досветовые частицы elnevezést használja. (A magyar elnevezés hiányában — és a tachion elnevezés mintájára — bradionoknak nevezhetjük ezeket a részecskéket. (Βραδύς = lassú). Újabban inkább a tardionok elnevezés használatos. (A ford.).) Más szavakkal: a tachionok és a bradionok *lényegesen különböző* típusú részecskék. A tachionok nem léphetik át a fényküszöböt; hasonlóan ahhoz, hogy a foton és a neutrino eleve $v = c$ sebességgel keletkezik, a tachion *mindig* $v > c$ sebességgel mozog, ilyen sebességgel keletkezik és nyelődik el.

Megjegyezzük, hogy a részecske m tömege és τ élettartama a nyugvó részecske jellemzői és így kísérletileg *közvetlenül* csak $v \to o$ határesetben mérhetők, vagyis olyan esetben, amely a tachionok számára, mint láttuk, elvileg elérhetetlen; minden más esetben, vagyis $v > c$ esetén a tachionokra és a közbülső $v = c$ esetben ezek a mennyiségek nem mérhetőek, de *meg lehet* őket *határozni* különböző elméleti megfontolások segítségével. A fontos csak az, hogy azok a megfontolások, amelyeknek segítségével az m és τ értékét meghatározzuk, ne tartalmazzanak logikai ellentmondást és összhangban legyenek a tapasztalattal. Az m nyugalmi tömeg mértékét például — mint a foton és neutrino esetében — zérusnak vehetjük, vagy választhatjuk képzetesnek: $m = im_0$, $\tau = i\tau_0$. Ez az utóbbi választás megfelelőnek mutatkozik a tachionok esetében, minthogy így a laboratóriumi rendszerben az energiájuk, impulzusuk, élettartamuk és minden más mérhető fizikai jellemzőjük valós mennyiség.*

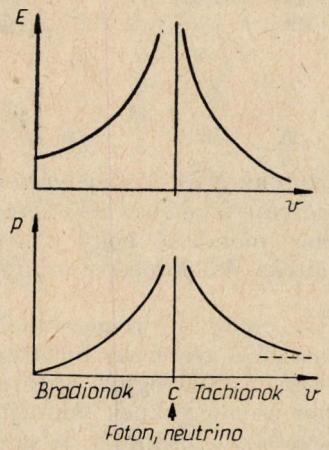
Fékezés helyett gyorsítás

A tachionoknak sok szokatlan, teljesen váratlan tulajdonságuk van. Így pl. egészen természetesnek tartjuk, hogy az atomos közegben mozgó részecske energiája — pl. az ütközések következtében — csökken, s ezáltal a részecske lefékeződik. A tachion azonban egészen másként viselkedik: ha energiát veszít, felgyorsul. Ez a következtetés egyszerűen kiolvasható az E energiára felírt formulából. Ha ugyanis a tachion sebessége jóval nagyobb a fénysebességnél, akkor

$$E \simeq m_0c^2\frac{c}{v} \ll m_0c^2,$$

és E értéke tetszőlegesen kicsivé válhat az m_0 (véges) értékétől függetlenül. A tachion sebessége ekkor minden határon túl nő ($v \to \infty$), impulzusa azonban zérustól különböző véges értékhez tart: $p \to m_0c$ (1. ábra).

* Terleckij mutatott rá először arra, hogy a tachionokat képzetes nyugalmi tömegű relativisztikus részecskéknek tekinthetjük. [1], [2], [3]. A külföldi szakirodalomban először Bilaniuk, Deshpande és Sudarshan dolgozatában [4] találkozunk a képzetes tömeg lehetőségének a gondolatával; munkájuk egyébként lényeges impulzust adott a tachionokra vonatkozó kutatásoknak. Az utóbbi évtizedben jónéhány „tachionos" dolgozat jelent meg. A klasszikus (nem-relativisztikus) fizikában Sommerfeldnél [5], [6] és más fizikusoknál már megtalálható a fénysebességnél nagyobb sebességű részecskék létezésének a gondolata.



1. ábra. A részecske energiájának és impulzusának függése a sebességtől

Azt mondhatjuk, hogy a végtelen nagy sebességű tachion pályájának bármelyik pontjában megtalálható; ez a következtetés párhuzamba állítható azzal, hogy a kvantummechanikában a zérus sebességű részecske a tér bármelyik pontjában egyenlő valószínűséggel megtalálható. A $v \to \infty$ határesetben a tachion élettartama és energiája zérushoz tart: $\tau \approx \tau_0 (c/v) \to 0$; kivételt képez az az eset, ha a $\tau_0 = \infty$, azaz ha a tacion stabil részecske.

A tachionok tulajdonságainak szokatlansága — mondhatnánk: paradox volta — még nem ad okot arra, hogy az ilyen részecskék létezését tagadjuk; az utóbbi évek kísérleti eredményei jónéhány meglepetést okoztak és gyökeresen módosították a természetről alkotott elképzelésünket, még azokat is, amelyeket nagyon szilárdaknak tartottunk. A fontos az, hogy a tachionoknak az előbbiekben felsorolt tulajdonságai nincsenek ellentmondásban a modern fizika alaptörvényeivel.

Negatív energiák

A tachionok létezésével kapcsolatban az egyik legkomolyabban veendő ellenvetés abból adódik, hogy — a közönséges részecskék viselkedésétől eltérően — a tachion energiája előjelet válthat, ha olyan koordinátarendszerre térünk át, amelyik az eredetihez képest a fénysebességnél *kisebb* u sebességgel mozog. Jelölje E a részecske energiáját a K-rendszerben; a K-hoz képest u sebességgel mozgó K'-rendszerben a részecske E' energiája a Lorentz-transzformáció alapján:

$$E' = \left(E - \frac{pu}{c}\right)\gamma = E\left(1 - \frac{pu}{Ec}\right)\gamma = E\left(1 - \frac{uv}{c^2}\right)\gamma,$$

ahol $\gamma = 1/\sqrt{1 - (u/c)^2}$ a már említett relativisztikus faktor, p a részecske impulzusa, $v = .pc/E$ pedig a sebessége a K-rendszerben. Ha tehát $uv > c^2$, akkor a tachion E ill. E' energiája a két vonatkoztatási rendszerben különböző előjelű.

Az energia előjelével kapcsolatos nehézség nemcsak abból adódik, hogy a teljes energiának, hanem a mozgási energiának is értelmezésénél fogva pozitívnak kell lennie. Ha a tachion energiája negatívvá lehet, ez azt jelenti, hogy bármelyik fizikai rendszer tetszőleges nagy számú tachion emissziójára nézve instabil, vagyis energiájának tetszőleges mértékű növekedése közben tetszőleges számú tachiont emittálhat. Ez pedig végső soron az örökmozgó. Továbbá: a vákuum spontánul $-E$ és $+E$ energiájú tachion-párokat emittálna; ilyen részecskepárok keletkezése nincs ellentmondásban az energia- és az impulzusmegmaradás tételével. Tetszőleges számú ilyen tachion-pár emissziója a vákuum (zérus) energiáját sem változtatná meg.

És az okság elve?

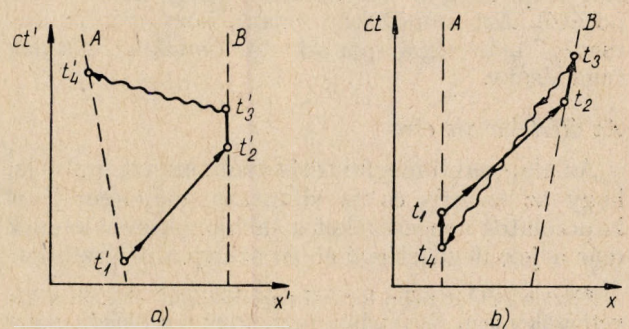
A $v > c$ sebességű részecskékre az új koordinátarendszerre való áttéréskor felcserélődhet az események időbeli sorrendje is, vagyis megfordulhat az idő múlásának az iránya. Játszódjék le ugyanis két pillanatnyi esemény a K rendszerben az x_1 és x_2 helyen t_1 ill. t_2 pillanatban és legyen $\Delta t = t_2 - t_1 > 0$. A K-rendszerhez képest u sebességgel mozgó K' rendszerben a két esemény között eltelt $\Delta t'$ időtartam:

$$\Delta t' = \left(\Delta t - \frac{\Delta x u}{c^2}\right)\gamma = \Delta t\left(1 - \frac{uv}{c^2}\right)\gamma < 0,$$

hacsak $uv > c^2$. Ha tehát a K-rendszerben az x_1 helyen az E_1 esemény *korábban* játszódik le, mint az x_2 helyen bekövetkező E_2 esemény, akkor a K'-rendszerben az E_1 a *későbbi* esemény.

Az a körülmény, hogy események időbeli sorrendje függ a koordinátarendszer megválasztásától, különböző akauzális effektusokat eredményez: lehetővé válik, hogy későbbi esemény visszahasson a múltbelire, egymás után lejátszódó események sorrendje időben ciklikusan cserélődhet, stb.

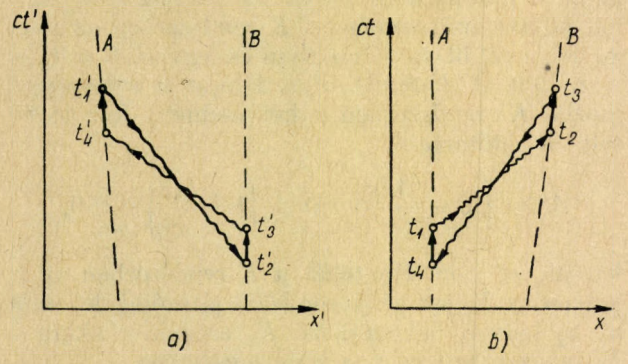
Tegyük fel, hogy egy rádióadó a t_1 pillanatban elektromágneses jelet bocsát ki a tachion-forrás



2. ábra. Akauzális eseményláncolat egy tachion cseréjével. Egy rádióadó az A trajektórián mozog, a tachion-forrás pedig a B trajektórián. A hullámos görbe a tachion trajektóriája. A tachion-forráshoz kötött koordinátarendszerben (a) az események időbeli sorrendje: $t'_1 < t'_2 < t'_3 < t'_4$. A rádióadóhoz rögzített koordinátarendszerben (b) a tachion emissziójának és abszorpciójának időbeli sorrendje felcserélődik: $t_4 < t_3$, és ha a tachion sebessége elég nagy, a rádióhullám emissziója előtt eléri a rádióadót: $t_4 < t_1$

felé, amelyet az elektromágneses hullám $t_2 > t_1$ pillanatban ér el (2. ábra). A rádiójel hatására a tachion-forrás $t_3 > t_2$ pillanatban tachionnyalábot emittál. A tachion-forráshoz rögzített koordinátarendszerben ez a tachionnyaláb az emissziónál későbbi pillanatban éri el a rádióadót. Más a helyzet azonban a rádióadóhoz rögzített koordinátarendszerben, amelyben a tachion-forrás mozog. Ebben a koordinátarendszerben a tachion-jelhez tartozó események sorrendje megcserélődik és a tachion az elektromágneses jel kibocsátása előtt éri el a rádióadót: $t_4 < t_1$; az eseményciklus végtelen sokszor ismétlődik.*

Az előbbi példában a zárt időbeli eseményciklus csak abban a koordinátarendszerben alakul ki, amelyik a tachion-forráshoz képest mozog; a másik koordinátarendszerben közönséges periódikus folyamat játszódik le. Tekintsük most két tachion cseréjét (3. ábra); az események időbeli egymásutánja bármelyik koordinátarendszerben, mozgásállapotától függetlenül, zárt hurkot képez.



3. ábra. Az A és a B két tachion-forrás trajektóriája. A K′-rendszerben nyugvó tachion-forrás által emittált tachion emissziójának és abszorpciójának időbeli sorrendje a másik koordinátarendszerben felcserélődik.

A fénysebességnél nagyobb sebességű jelek okozta akauzális effektusokra számos további példát említhetnénk; mindegyiknek az a lényege, hogy az ilyen jelek által keltett hatások időbeli sorrendje függ a koordinátarendszer mozgásállapotától. Azt mondhatná valaki, hogy ennyi „furcsaság" már elég alapot ad a tachionok létezésének tagadására.

Az átértelmezés elve

Az alaposabb megfontolás azonban azt mutatja, hogy az energia és az időtartam előjelcseréjével kapcsolatos nehézségeket a tachionok elméletének már a jelenlegi, eléggé elemi szintjén megszüntethetjük. Gondoljuk meg, hogy *mindkét* mennyiség előjelcseréje az $uv > c^2$ feltétel teljesülésekor következik be:

$$\frac{E'}{E} = \frac{\Delta t'}{\Delta t} = \left(1 - \frac{uv}{c^2}\right)\gamma \qquad (1)$$

Ez a körülmény az E és Δt előjelváltozásával kapcsolatos paradoxon feloldását lehetővé teszi. Nagyjából azt lehet mondani, hogy a két előjelcsere egymást mintegy kölcsönösen kompenzálja [4], [9]—[11].

Egy pozitív energiájú részecske abszorpcióját a negatív energiájú részecske emissziójával teljesen azonos eseménynek fogjuk tekinteni; hasonlóképpen azonos eseményeknek tekintjük az $E > 0$ energiájú részecske emisszióját és az $E < 0$ energiájú részecske elnyelődését.* Ezt a posztulátumot az „átértelmezés elvének" nevezzük [4], [9]—[11]. E megállapodás után az események időbeli sorrendjének megváltozása az (1) összefüggésnek megfelelően az emisszió és az abszorpció aktusának olyan átrendeződésével jár együtt, hogy a pozitív energiájú részecskékre az események egymásutánja minden esetben összhangban marad az okság elvével. Vagyis: fizikai jelek (hatások) révén csak pozitív energiájú objektumok lehetnek kapcsolatban egymással.**

Tekintsünk pl. egy olyan folyamatot, amelyet úgy értelmezünk, hogy az 1. téridő-pontban egy pozitív energiájú tachion emittálódott, majd egy másik 2 téridő-pontban elnyelődött. Abban a koordinátarendszerben, amely az előzőhöz képest $u > c^2/v$ sebességgel mozog (v a tachion sebessége) a 2 pontbeli esemény az 1 pontbelinél korábban játszódik le. Ebben a koordinátarendszerben azonban a tachion energiája is előjelet vált. A mozgó koordinátarendszerbeli megfigyelő tehát az egész folyamatot úgy fogja értelmezni, hogy az 1 pontban elnyelődik egy pozitív energiájú tachion, amely a 2 pontban *korábban* emittálódott. A negatív energiák, az akauzális effektusok problémája tehát mindkét koordinátarendszerbeli megfigyelő szempontjából megszűnik.

Könnyen belátható, hogy az átértelmezés elvének alkalmazása után a 2.a) ábrán az események időbeli sorrendje változatlan marad, a 2.b) ábrán szemléltetett folyamat pedig a következő értelmezést kapja: egy antitachion spontán emittálódik, majd ezt követően a rádióadó elektromágneses hullámot sugároz ki és ezt a hullámot később

*Ezt a példát néha logikai paradoxonná élesítik a következőképpen. Követeljük meg, hogy a rádióadó akkor és csak akkor bocsátja ki a rádiójelet, — amely a tachion-adót bekapcsolja, — ha előbb nem kapott jelet a tachion-forrástól. Ebben az esetben az adók között jelváltás „csak akkor következik be, ha nem következik be". [7], [8]. Valójában azonban nincs szó semmiféle paradoxonról, minthogy a probléma alapját képező követelmény belső ellentmondást tartalmaz; a kezdeti feltétel ugyanis önmagát kizárja s minthogy nem teljesülhet, egyszerűen nem jön létre semmiféle sugárzás. (*Minden* t_1 pillanatot megelőzi-e a múlt?)

* Ez az elv nem teljesen idegen a fizikában. Jusson eszünkbe, hogy hasonló megfontolás képezte alapját a pozitron Dirac-féle elméletének: a negatív energiájú elektronok „alvilágában" levő „lyukat" pozitív energiájú pozitronnal tekintjük azonosnak.

** Az időtartam előjelével a tachionnak nemcsak az energiája vált előjelet, hanem más kvantumszáma, pl. elektromos, barion- vagy leptontöltése, stb. is. Ezért az átértelmezés elvét pontosabban így fogalmazhatjuk: minden kölcsönhatásban azt a negatív energiájú részecskét, amely a reakció végállapotában (kezdeti állapotban) visszafelé mozog az időben, azonosnak kell tekinteni a pozitív energiájú antirészecskéjével, amely a reakció kezdeti (vég-) állapotában előre mozog az időben.

a tachionforrás elnyeli. A 3. ábrán vázolt események időbeli sorrendje is összhangba kerül az okság elvével.

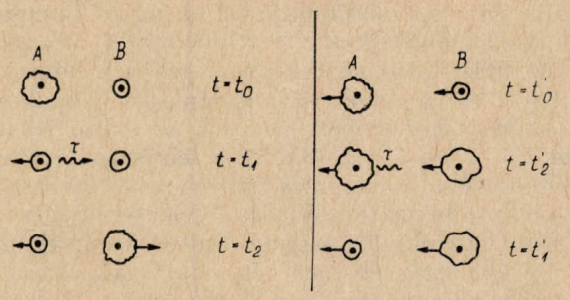
Még egyszer az okság elvéről

Az előbbiekben az időbeli sorrend megcserélődését az antirészecskére való áttéréssel kötöttük össze. Ez az interpretáció azonban még nem zárja ki az összes akauzális jelenség lehetőségét. Ennek szemléltetésére vegyük a következő példát.

A K koordinátarendszerben valamilyen t_0 pillanatban két atom nyugalomban van: az A atom gerjesztett, a B atom pedig alapállapotban (4. ábra). A tachion átadása következtében előbb az A atom alapállapotba megy át, azután a B atom gerjesztődik. A tachion emissziója és abszorpciója közben mindkét atom meglökődik, tehát a folyamat végén a K rendszerben mindkét atom mozog. Mozogjon egy megfigyelő a K-rendszerhez képest $u > c^2/v$ sebességgel. (Hangsúlyozni kívánjuk, hogy ez az u sebesség kisebb a vákuumbeli fénysebességnél, vagyis a megfigyelő mozgása egészen szokásos, „szubfotonikus"). Ez a mozgó megfigyelő előbb észleli a B atom állapotának a megváltozását, vagyis akkor, amikor az A atommal még semmi sem történt. Ez a megfigyelő úgy értelmezi az egész folyamatot, hogy a B atom spontán tachiont emittál, majd az A atom a tachiont elnyeli. A B atom sorsát tehát a két megfigyelő különbözőnek találja: a nyugvó megfigyelő szerint tachiont abszorbeál, a mozgó megfigyelő szerint viszont spontán emittál egy tachiont.

Képzeljük el, hogy az A és B atom közé olyan ernyőt helyezünk el, amely a tachionokat elnyeli. Az ernyőn adott t pillanatban egy rést megnyitunk és Δt ideig nyitva tartjuk. Ha ezt a folyamatot sokszor megismételjük, a nyugvó megfigyelő végül azt fogja tapasztalni, hogy a B atom gerjesztett állapotának időbeli eloszlása (időbeli hisztogramja) attól függ, milyen törvényszerűség szerint van nyitva a nyílás az ernyőn. Minthogy a rés nyitása mindig megelőzi a B atom gerjesztődését, a nyugvó megfigyelő számára a jelenség egész lefolyása összhangban van az okság elvével. Egészen másként kell értelmeznie a jelenséget a mozgó megfigyelőnek. Ő is korrelációt állapít meg a B atom spontán gerjesztéseinek időbeli eloszlása és a rés nyitott állapotainak időbeli eloszlása között. Az ő koordinátarendszerében azonban a rés mindenegyes esetben a B atom gerjesztődése *után* nyílik ki; a mozgó megfigyelő számára tehát a fenti korreláció érthetetlen akauzális effektus: a B atom előre „tudja", milyen törvényszerűség szerint fog kinyílni és bezáródni a rés az ernyőn [12].

Ezt a paradox furcsaságot a következő példával kívánjuk érzékeltetni. Tegyük fel, hogy Shakespeare valamelyik szonettjét Morse-ABC-re ültetjük át, majd ennek elektromos impulzusaival nyitjuk és zárjuk a rést az ernyőn, s a tachion-áram intenzitását ezzel moduláljuk. A B atom pontosan ennek ütemében fog sugározni. A mozgó megfigyelő megrázó csodát észlel: a *spontán* sugárzó B atom Shakespeare-szonettet emittál! Ez a megfigyelő azonban mindig megtalálhatja a szokatlan jelenség okát: ha áttér egy másik koordinátarendszerre.



4. ábra. Az egyik atom tachiont ad át a másiknak
a) A nyugvó megfigyelő szempontjából a kezdeti t_0 pillanatban az A atom gerjesztett állapotban, a B atom pedig alapállapotban van. Egy későbbi t_1 pillanatban az A atom egy τ tachiont emittál, közben impulzust kap és alapállapotba megy át. A $t_2 > t_1$ pillanatban a B atom a τ tachiont abszorbeálja, miáltal gerjesztett állapotba kerül és átveszi a megfelelő, visszalökődési impulzust.
b) A mozgó megfigyelő szempontjából a kezdeti t'_0 pillanatban az A atom szintén gerjesztett, a B atom pedig alapállapotban van. Ehhez a megfigyelőhöz képest mindkét atom mozog. A későbbi t_2 pillanatban a B atom emittálja a τ tachiont, közben gerjesztett állapotba megy át és kinetikus energiája megfelelő értékkel csökken. Az A atom a $t'_1 > t'_2$ pillanatban abszorbeálja a tachiont, alapállapotba megy át, s közben mozgási energiája megnövekszik. A nyugvó megfigyelő koordinátarendszerében $t_0 < t_1 < t_2$, a mozgó megfigyelő számára viszont $t'_0 < t'_2 < t'_1$

Megfontolásainkat a következőkben foglalhatjuk össze: az olyan folyamatokban, amelyekben fénysebességnél nagyobb sebességű részecskék vesznek részt, az információ (a kölcsönhatási energia) áramának az iránya, amely valamilyen oksági kapcsolat alapját képezi, invariáns a koordinátarendszer megváltoztatásával szemben; az ok és az okozat időbeli sorrendje azonban függ a koordinátarendszer megválasztásától.

Az utóbbi években sok dolgozat foglalkozott a fénysebességnél nagyobb sebességű részecskékkel kapcsolatban az okság elvével [7]—[9], [12]—[17], a megnyugtató megoldás azonban még várat magára.

Egyes szerzők (pl. [8]) azt vallják, hogy a tachionos folyamatokban az okság elve feltétlenül megsérül és ezt úgy értelmezik, hogy a tachionok egyáltalán nem lépnek kölcsönhatásba a fotonokkal és a „közönséges" részecskékből, tardionokból felépült anyaggal. Ez végső soron azt jelenti, hogy lemondunk a tachionok megfigyelésének lehetőségéről, minthogy egyetlen mérőeszközünk sem képes őket detektálni. Ebben az esetben tehát meg kellene engednünk a természetben olyan objektumok létezését, amelyek elvileg megismerhetetlenek.

Más szerzők szerint az oksági kapcsolat a tachionos folyamatokban is érvényes marad, de az ilyen folyamatokban az oksági kapcsolat régi formája helyett módosított, általánosabb alakját kell al-

kalmazni. Az okság elvének ez az általánosabb alakja szimmetrikusan tartalmazza a „retardált kauzalitást", amikor az ok megelőzi a következményt, és az „avanzsált kauzalitást", amikor a következmény időben megelőzi az okozó jelenséget [7], [12], [16], [18]. Ez a leírásmód azonban metodológiai szempontból aligha lehet kielégítő a makroszkópikus téridő-méretű jelenségek egész világára. Ezenkívül nagyon fontos hangsúlyozni, hogy az okság elvének régi megfogalmazását, a következmény késését az okeseményhez viszonyítva, nagyon jól igazolják a kísérletek; gondoljunk arra, hogy a részecskék rugalmas szóródására vonatkozó diszperziós relációk leszármaztatásának alapját a „retardált kauzalitás" követelménye képezi. A diszperziós relációk egészen a $\Delta x \approx \approx 7 \cdot 10^{-16}$ cm, $\Delta t \approx 2 \cdot 10^{-26}$ sec téridő-távolságig nagyon jó összhangban vannak a kísérleti eredményekkel [19].

Mi következik hát az elméletből?

Noha minden eddigi tapasztalatunk az „avanzsált kauzalitás" ellen tanúskodik, mégsem zárhatjuk ki olyan, teljesen új, szokatlan jelenségek létezését, amelyekben az ok-következmény kronológiai sorrendjének nincs szigorúan meghatározott, a koordinátarendszer megválasztásától független jelentése. Gondoljunk pl. arra, hogy a részecskebomlások vizsgálata meggyőzött bennünket arról, hogy a fizikai jelenségek lehetnek nem-invariánsak a téridő-tükrözéssel szemben. Ezek után a fenti lehetőség — legalábbis a mikrovilágban — egyáltalán nem tekinthető valószínűtlennek.

Elképzelhető, hogy a tachionok — valamilyen, számunkra még ismeretlen törvény következtében — nem léphetnek ki valamilyen mikroszkópikus „nem-lokális tartományból", ahol az időbeli sorrend határozatlan, vagy nincs is értelmezve, esetleg olyan értelme van, amely lényegesen különbözik eddigi elképzelésünktől. Ha így van, akkor makroszkópikus mérőeszközeink segítségével nem észlelhetjük azokat a jelenségeket, amelyekben az ok és az okozat időbeli sorrendje fordított. Ez a megfontolás nem teljesen idegen a fizikában. A $\Delta E \Delta t \sim h$ határozatlansági összefüggés értelmében nem mutatható ki kísérletileg az energia-impulzus megmaradása klasszikus törvényének megsérülése a virtuális kvantumfolyamatokban.*

A fénysebességnél nagyobb sebességű részecskék létezésének a lehetőségét tehát nem lehet kizárni. Léteznek-e ilyen részecskék vagy nem, erre a kérdésre végső soron a kísérlet adhat csak választ.

Az utóbbi években végeztek néhány speciális kísérletet a tachionok észlelésére; ezen kívül néhány kutató ismert asztrofizikai adatok, valamint a gyorsítókkal nyert adatok gondos analízise alapján próbált a tachionok tulajdonságaira következtetni. Az alábbiakban röviden áttekintjük a munkák eredményeit. Nem titkoljuk: egyetlen kísérlet alapján sem lehet a tachionok létezésére következtetni. Ezek a hipotetikus részecskék azonban olyan szokatlan tulajdonságokkal rendelkeznek, hogy az eddigi kísérletek és becslések negatív következtetései egyáltalán nem egyértelműek és — mint alább látni fogjuk — a tachionok sok fontos sajátságát nem veszik figyelembe.

Tachionok keresése asztrofizikai folyamatokban

A tachion tömegét és elektromos töltését megpróbálhatjuk megbecsülni a kozmikus rádiósugárzásra vonatkozó kísérleti adatok alapján. Minthogy a tachion energiája tetszőlegesen kicsi lehet, ezért már a nagy hullámhosszúságú fotonok is tachion-antitachion-párra bomolhatnak: $\gamma \to \tau + \bar{\tau}$.

Ugyanakkor a kozmikus rádiósugárzás 10^{10} fényév nagyságrendű, kolosszális távolságokat fut be, mielőtt a földi felfogó berendezésbe jut.

Tételezzük föl, hogy a tachion ugyanolyan törvények szerint lép kölcsönhatásba az elektromágneses térrel, mint más elektromos részecskék; akkor annak valószínűsége, hogy a foton bomlás nélkül 10^{10} fényév távolságot befut, egyszerűen megadható. Ennek alapján a tachion e_0 elektromos töltésére és m_0 tömegére a következő becslés adható:

$$\frac{e_0}{e}\,\frac{m_0}{m_e} \lesssim 10^{-24},$$

ahol e az elektron elektromos töltése, m_e pedig a tömege. Vagyis: ha a tachionok léteznek, akkor semleges (vagy „majdnem semleges") részecskéknek kell lenniük, az elektron töltésénél sokkal kisebb töltéssel, avagy m_0 tömegüknek kell az elektron tömegénél sok nagyságrenddel kisebbnek lennie [21].

Ezt a következtetést azonban nem szabad túlságosan komolyan venni; már csak azért sem, mert ha a laboratóriumi rendszerben a foton tachion-antitachion-párra bomlik, mindig található egy másik olyan koordinátarendszer, amelyben a tachionoknak formálisan negatív az energiájuk, s így az átértelmezés elvének megfelelően a fenti folyamat tachion-pár annihilációjának felel meg: $\tau + \bar{\tau} \to \gamma$ Megfordítva: valamelyik mozgó koordinátarendszerbeli fotonbomlást a laboratóriumi rendszerben a $\tau + \bar{\tau}$ tachionpár szétsugárzása eredményének észleljük. Minthogy a koordinátarendszerek energiaáram intenzitása szempontjából egyenértékűek, a kozmikus rádiósugárzás intenzitása átlagban változatlan marad.

A kompenzálódó annihilációs folyamatok lehetősége azt jelentené, hogy a Világegyetemnek betöltve kell lennie tachion-sugárzással. Ez az átértelmezés elvének fontos és nem kevésbé csodálatos következménye. Egyébként már utaltunk arra, hogy a Világegyetem tele van vákuumfluktuációkkal, maradék-fotonokkal, igen gyengén kölcsönható és ezért megfigyelhetetlen neutrino-su-

* A nem-lokális elméletek különböző variánsait ezen idea formális-matematikai megfogalmazásának tekinthetjük.

gárzással. Ha ezt megfontoljuk, a „tachion-alvilág" — bármennyire sajátságosak is a tulajdonságai —, nem tűnik egészen kivételes valaminek és létezése egyetlen ismert fizikai törvénnyel sincs ellentétben.

Van azonban egy másik, talán még megalapozottabb elgondolás is. A $\gamma \to \tau + \bar{\tau}$ bomlási folyamatot és a megfordított, szétsugárzási folyamatot ugyanazon amplitúdó jellemzi, mint a tachion Cserenkov-sugárzását (csak a kinematikai változók értéke és a kvantumszámok előjele különbözik).* Mint alább látni fogjuk, eléggé meggyőző érveléssel indokolható, hogy tachion Cserenkov-emissziója vákuumban nem lehetséges. Akkor viszont tiltottnak kell lennie a vele kapcsolatos másik két folyamatnak is: a foton szétesésének tachionpárra és két tachion szétsugárzásának fotonra. E megfontolás megalapozatlanná teszi azt a fenti következtetést, hogy a Világegyetem tele van tachionsugárzással. (Így elveszti hitelét a tachion tömegére és elektromos töltésére vonatkozó, fentebbi becslés is.)

Mindenesetre nem szabad elfelednünk, hogy ezek a következtetések is eléggé bizonytalanok, sok hipotézist tartalmaznak és kapcsolatosak azzal a feltevéssel, hogy a Lorentz-transzformációt fénysebességnél nagyobb sebességű sugárzásokra általánosíthatjuk (1. ábra). Létezik-e tachion-háttér a természetben és mekkora az intenzitása, végül is elsősorban kísérleti kérdés.

Danburg és Kalbfleisch [22] érdekes módon próbál a tachionok és a közönséges „tardion-anyag" kölcsönhatására következtetni. Megfontolásuk lényegét az képezi, hogy megbecsüljék azt a hőmennyiséget, amely egy bolygó, pl. a Föld belsejében keletkezik a tachion-háttér részecskéinek az abszorpciója folytán.

Annak valószínűségét, hogy a tachiont egy nukleon vagy elektron abszorbeálja, az átértelmezés elve segítségével megbecsülhetjük; a folyamatot formálisan úgy tekintjük, mint negatív energiájú tachion spontán emisszióját.**

$$N \to N + \tau, \qquad e \to e + \tau$$

A Föld belsejéből kifelé irányuló hőáram értékét kb. 10% pontossággal ismerjük. Ha egy pillanatra elfeledkezünk arról, hogy a Föld belsejében atommagok rádioaktív bomlása hőt termel, és a hőáramot *teljes egészében* a tachion-abszorpció következményének tekintjük, akkor a nukleon és az elektron tachion-bomlására a következő időtartamot kapjuk. (Ez az az átlagos időtartam, amely alatt e részecskék valamelyike tachiont abszorbeál):

$$t_N \gtrsim 3 \cdot 10^{17}\, \Delta E_N \text{ év}, \quad t_e \gtrsim 1{,}5 \cdot 10^{17}\, \Delta E_e \text{ év},$$

ahol ΔE (MeV) az a visszalökődési energia, amelyet a nukleon vagy elektron a tachion-abszorpció során nyer [22].

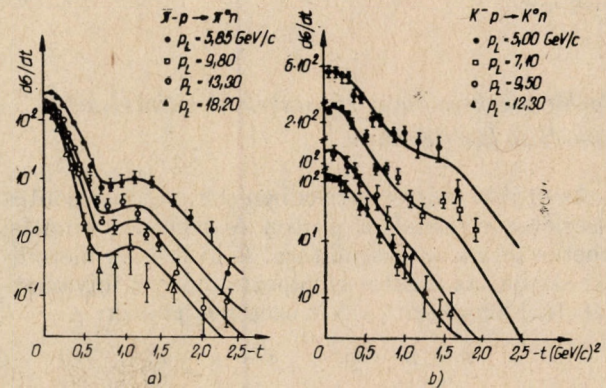
A ΔE visszalökődési energia értékét megbecsülhetjük. Tételezzük fel, hogy a kozmikus háttér tachionjainak már sikerült elveszíteniük teljes E energiájukat és impulzusuk már megegyezik a $p = m_0 c$ határértékkel (azaz sebességük sokkal nagyobb a fénysebességénél: $v \gg c$). Az energia megmaradásának a tételéből erre az esetre rögtön következik, hogy az M tömegű, gyengén kötött abszorbeáló részecske visszalökődési energiája:

$$\Delta E \approx E_{\text{vég}} - M = \frac{m_0^2}{2M} \tag{2}$$

Ha most feltételezzük, hogy a tachionok kölcsönhatását leíró kifejezések fővonásaikban más részecskék kölcsönhatását leíró kifejezésekkel megegyeznek, akkor a nukleon ill. elektron tachion-bomlásának t időtartamát elméletileg megbecsülhetjük. Ha ezt az elméleti úton nyert t időtartamot a fenti, kísérletileg becsült t_N és t_e időtartammal összevetjük, akkor a tachion-nukleon-, ill. a tachion-elektron kölcsönhatás csatolási állandójára a következő becslést kapjuk:

$$\frac{g_N^2}{hc} \lesssim 10^{-52}, \quad \frac{g_e^2}{hc} \lesssim 10^{-55}.$$

Ezek a becslések arra az esetre vonatkoznak, ha nukleon-abszorpció esetén a tachion tömege $m_0 \gtrsim 10\ MeV$, elektron-abszorpció esetén pedig $m_0 \gtrsim 0{,}1\ MeV$ [22]. (Kisebb m_0 értékek esetén pontosabban figyelembe kell venni a tachion kölcsönhatását az egész atommal, minthogy ilyenkor a ΔE visszalökődési energia értéke nagyon kicsi.)



5. ábra. A $\pi^- + p \to \pi^0 + n$ és a $K^- + p \to K^0 + n$ reakciók differenciális hatáskeresztmetszete [29]
a) A görbék azzal a feltételezéssel adódtak, hogy a kölcsönhatást ϱ-mezonok és tachionok közvetítik;
b) a $K^- p$ — kölcsönhatás hatáskeresztmetszetének a kiszámításánál feltételezték, hogy a kölcsönható részecskék A_2-mezont is cserélnek. p_L a primér mezon impulzusa a laboratóriumi koordinátarendszerben

* Mindhárom folyamatot ugyanazon háromágú Feyman-gráf írja le; ezért a részecskék négyes impulzusának és kvantumszámaik előjelét az határozza meg, milyen irányban haladunk a diagramon. Ebben az esetben a kölcsönhatási folyamatoknak ún. crossing (kereszt-) szimmetriájával van dolgunk.

** Hangsúlyozni szeretnénk, hogy esetünkben a megfontolás teljesen formális, minthogy az emittált antitachion teljes energiája negatív.

Ez a gondolatmenet is eléggé labilis, minthogy azon a feltételezésen alapszik, hogy a Világegyetem tele van tachion-sugárzással. Ha azonban a tachionok (Földre jutó) áramának intenzitása kicsi, akkor a Föld belsejében csak néhány nukleon vagy elektron fog tachiont abszorbeálni, s a fenti megfontolások segítségével legfeljebb a tachion-áramsűrűség és a kölcsönhatási állandó szorzatát lehet megbecsülni.

Azok a „kísérleti következtetések" tehát, hogy a tachionok nagyon gyenge — minden eddig ismertnél gyengébb — kölcsönhatásban vannak a közönséges, tardion-anyaggal, olyan hipotéziseken alapulnak, amelyek egyáltalán nem nyilvánvalóak, nem magától értetődőek; a következtetések sem lehetnek tehát meggyőzőek.

Érdekes kísérleteket végzett a tachionok észlelésére egy indiai kutató csoport [23]: a földi légkörben a kozmikus sugárzás összetevői közt próbálták a tachionokat kimutatni. Ezekben a kísérletekben azt vizsgálták, van-e a kiterjedt kozmikus záporoknak olyan komponense, amelyik gyorsabban jut el az észlelő berendezéshez, mint az elektron-foton-komponens. A statisztikus hibahatáron belül az adódott, hogy az ilyen, fénysebességnél nagyobb sebességű részecskék száma kisebb, mint az elektronok számának a 0,03%-a.

Az utóbbi években nagyszámú, meglepő asztrofizikai jelenséget fedeztek fel. Ezeknek a jelenségeknek a magyarázata ismert fizikai törvények segítségével, tachionok létezésének feltételezése nélkül — sok szerző véleménye szerint — nagyon mesterkélt, erőltetett. Így pl. az amerikai asztrofizikusok nagy csoportja úgy véli, hogy a 3C—279 kvazár sugárzására vonatkozó kísérleti eredményeiket nehéz lenne megmagyarázni olyan hatások nélkül, amelyek a fénynél kb. tízszer nagyobb sebességgel terjednek [24]. A gravitációs hullámok észlelését célzó Weber-féle kísérletek interpretációja is a tachionok elméletén nyugszik [25]. Ezek a „pozitív eredmények" azonban még nem tekinthetők meggyőzőeknek, s további vizsgálatot igényelnek.

Tachionok keresése a részecskék stabilitására vonatkozó kísérletekben

Az utóbbi másfél évtizedben sok, nagyon pontos kísérletet végeztek a proton és elektron bomlási lehetőségének a vizsgálatára. E kísérletek metodikai alapját az a feltevés képezte, hogy a folyamatban tachion-abszorpció is szerepet játszik:

$$\tau + p \to p; \qquad \tau + e \to e;$$

a tachion-abszorpció a feltevés szerint úgy nyilvánulna meg, hogy a kezdetben nyugvó részecske „spontánul" mozgásba jön. E kísérletek közül kettőt kissé részletesebben ismertetünk.

G. N. Flerov és munkatársai [26], [27] megvizsgáltak minden spontán hasadást Th^{232}-mintában. A Th^{232}-mag hasadásra nézve stabilis; ha azonban a magban levő egyik proton elbomlik, vagy ha a proton tachion-abszorpció révén gerjesztődik, az így keletkező közbülső mag elbomlik. A kísérletek negatív eredménye alapján a proton élettartamára alsó korlát adható meg, illetve alsó korlát adható meg a magbeli proton és a tachion kölcsönhatási időtartamára:

$$t_p \gtrsim 2 \cdot 10^{23} \text{ év}$$

Ilyen kísérleti metodikával az $m_0 \gtrsim 100\ MeV$ tömegű tachionok kölcsönhatása tanulmányozható. (Ez a becslés a (2) formából következik.)

A t_p-re nyert kísérleti és elméleti eredmények alapján megbecsülhető a tachion-proton-kölcsönhatás csatolási állandója:

$$\frac{g_p^2}{\hbar c} \lesssim 10^{-54}$$

H. S. Gurr és munkatársai [28] mélyen a földfelszín alá, tehát a kozmikus sugárzás hatókörén kívül elhelyezett szcintillációs számlálókkal regisztrálták az olyan proton- és elektronbomlásokat, amikor a bomlástermékek elektromos töltést hordoznak. A kísérleti berendezés automatikusan rögzítette volna azokat az eseteket is, amikor a proton vagy elektron tachiont abszorbeált volna.

A kísérleti adatok alapján a tachion (abszorpciós) élettartamára a következő becslés adódott:

$$t_p \gtrsim 10^{29} \text{ év}, \qquad m_0 \gtrsim 200\ MeV$$

$$t_e \gtrsim 10^{29} \text{ év}, \qquad m_0 \gtrsim 10\ MeV$$

(A tachiontömegre a korlátot a berendezés érzékenysége határozza meg; a kísérleti eszköz ugyanis olyan részecskék regisztrálására volt képes, amelyeknek a kinetikus energiája $T > 20\ MeV$.) A fenti élettartamokból a kölcsönhatás csatolási állandójára rendkívül kicsiny érték adódik:

$$\frac{g_p^2}{\hbar c} \sim \frac{g_e^2}{\hbar c} \lesssim 10^{-60}$$

Mint fentebb, a földkéregbeli hőáramra alapozott becslésnél, most is azon a feltevésen alapszik a gondolatmenet, hogy a Világegyetem tele van tachionokkal; ha ez nem így van, akkor a valóságban a fenti becslés nem g^2 értékét határozza meg, hanem a kölcsönhatási állandónak és a relatív tachionintenzitásnak a szorzatát.

Tachionok keresése gyorsítókkal végzett kísérletekben

C. Baltay, G. Feinberg és munkatársai [21] a tachion „nukleon-töltésére" adtak becslést; a tachion-nukleon-kölcsönhatás $g_N^2/\hbar c$ állandóját a vákuumban felgyorsított protonnyaláb energiaveszteségének analízise alapján határozták meg. Ezt az energiaveszteséget a következő emissziós effektussal lehetne értelmezni:

$$p \to p + \tau; \qquad p \to p + \tau + \bar{\tau}.$$

Ha ismét feltételezzük, hogy a tachion-kölcsönhatást ugyanolyan típusú kifejezésekkel írhatjuk le, mint közönséges részecskék esetén, akkor a kísérleti és elméleti eredmények összevetése lehetőséget ad a proton-tachion-kölcsönhatás erősségének a meghatározására:

$$\frac{g_p^2}{\hbar c}\,\frac{m_0}{m_p} \lesssim 10^{-18},$$

ahol m_p a proton tömege. Ennek alapján az a következtetés vonható le, hogy vagy a tachion nukleon-töltése nagyon kicsi, vagy a tömege nagyon kicsi.

De mint fentebb, a tachion elektromágneses kölcsönhatásával kapcsolatban, most is komoly ellenvetés tehető. Az átértelmezés elve szerint ugyanis a tachion-emisszióval egyenlő valószínűségű a fordított folyamat, vagyis a tachion, ill. tachionpár abszorpciója:

$$p + \tau \to p; \qquad p + \tau + \bar{\tau} \to p.$$

Ha ezt figyelembe vesszük, a protonnyaláb energiája átlagban állandó marad. Hasonló következtetésre jutunk azoknak a megfontolásoknak az alapján is, amelyek a tachion Cserenkov-sugárzására vonatkoznak (l. alább).

Ugyanezt lehet elmondani azokról a kísérletekről is, amelyekben buborék-kamrák segítségével igyekeztek kimutatni elektromos töltésű és semleges tachionok keletkezését. A vizsgált reakciók:

$$K^- + p \to \Lambda + \tau, \quad \Lambda + \tau + \bar{\tau}$$

$$\bar{p} + p \to \pi^+ + \pi^- + \tau, \quad \pi^+ + \pi^- + \tau + \bar{\tau}$$

A fénysebességénél kisebb sebességű, közönséges részecskék (tardionok) és a tachionok négyes impulzusa négyzetének különböző az előjele ($P_\beta^2 = -m^2$, $p_\tau^2 = m_0^2$ Ez az előjelkülönbség a reakció során keletkező részecskék kinematikai jellemzőinek a korrelációjában is megjelenik. Első pillanatra úgy tűnhet, hogy megkonstruáljuk a szekundér részecskékre a hiányzó effektív tömegek hisztogrammjait és megkeressük bennük a „rezonancia-csúcsokat". (Így járunk el általában a rövid élettartamú részecske-rezonancia-kísérletek esetén is.) Azonban a tachion-keltő reakciókban egyidejűleg olyan folyamatoknak is le kell játszódniuk, amelyekben az ütköző részecskék tachiont és antitachiont abszorbeálnak. (Pl.: $K^- + p + \bar{\tau} \to \Lambda$, $K^- + p + \bar{\tau} \to \Lambda + \tau$; stb.) Kinematikai szempontból az ilyen folyamatok ekvivalensek olyan részecskék keletkezésével, amelyeknek négyes impulzusa ellenkező előjelű és így végeredményben átlagban a várt anomáliákat kompenzálják, eltüntetik. (A [21] dolgozatban a szekundér részecskék tulajdonságainak az analízisére használt kinematikai relációkat ennek megfelelően kell módosítani.) Ez lehet a magyarázata annak, hogy Baltay és munkatársai [21] tachionoknak nyomát sem találták.

Ugyanezek a kritikai megjegyzések egy másik, későbbi kísérletre is érvényesek [29]. Gleeson és munkatársai mágneses térbe helyezett, hidrogénes buborékkamrában tanulmányozták a $K^- + p \to \Lambda +$ két ionizáló részecske típusú reakciókat a 2 GeV energiaérték körüli tartományban. Feltételezték, hogy a két ionizáló részecske elég hosszú élettartamú $\tau + \bar{\tau}$, tachionpár is lehet.

A szekundér részecskék effektív tömegének kinematikai analízisénél ebben az esetben is számításba kell venni a tachion-abszorpciós, inverz folyamatok lehetőségét.*

Hogy a megfordított folyamatok okozta nehézségeket kiküszöböljék, Danburg és Kalbfleisch [22] hidrogénes buborékkamrában az olyan eseményeket tanulmányozták, amikor nagyon lassú (gyakorlatilag nyugvó) protonok tachionokat abszorbeálnak. A fordított folyamatot, a tachion-emissziót ebben az esetben az energia- és az impulzusmegmaradás tétele tiltja.**

E kísérletek alapján a tachiontömeg minimális értéke $m_0 \approx 5$ MeV adódott; ez kb. feleakkora, mint a protonbomlási kísérletekből kapott érték.

Nagy számú felvétel analízise alapján arra a következtetésre lehet jutni, hogy a proton átlagban $t_p \approx 2 \cdot 10^{21}$ év alatt egyszer abszorbeálhat tachiont; ez az élettartam a kölcsönhatás csatolási állandójára a következő felső korlátot adja:

$$\frac{g_p^2}{\hbar c} \lesssim 10^{-52}$$

Ismét hangsúlyoznunk kell azt a körülményt, hogy ez a becslés is azon a feltevésen alapszik, hogy a Világegyetem tele van tachionokkal.

Teljesen más módszerrel vizsgálta a tachionok tulajdonságait Gleeson, Gundzik és Sudarshan [29]. Feltételezték, hogy a tachionok nagyon rövid élettartamúak s ezért — a rezonanciákhoz hasonlóan — csak kölcsönhatásokban figyelhetők meg. Speciálisan: virtuális tachionok kicserélődésének azzal a következménnyel kell járnia, hogy a mezonok, nukleonok, γ-kvantumok rugalmatlan szóródásának differenciális hatáskeresztmetszetében járulékos csúcsok jelennek meg.

A töltéscserével járó $(\pi - p)$ — szórás differenciális hatáskeresztmetszetében, de sok más kétrészecskés reakció hatáskeresztmetszetében valóban megfigyeltek ilyen járulékos csúcsot az átadott impulzus $t \approx -0{,}1$ $(GeV/c)^2$ értékénél. Fontos az a megfigyelés, hogy ez a csúcs nem változtatja meg helyzetét, ha egyik reakcióról a másikra térünk át, és nem függ a primér részecske energiájától.

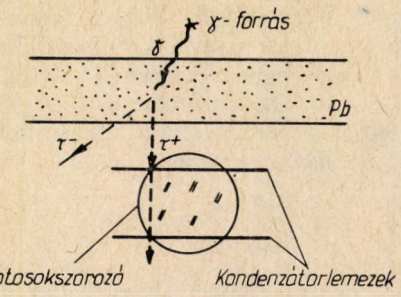
* Gleeson és munkatársai valóban megfigyeltek néhány olyan eseményt, melyet tachionpár keletkezésével lehetett értelmezni. A [29] munka szerzői azonban „természetesebb magyarázatot" is találtak az események értelmezésére.

** A tachionok abszorpciójának jelenségét a hidrogénes buborékkamrában nem lehet megkülönböztetni attól a folyamattól, amikor a kozmikus sugárzás semleges részecskéi protonokon szóródnak; a proton ilyenkor is visszalökődik és a kamrában látható nyom keletkezik. Az ilyen nyomok hiányából (ill. nagyon csekély számából) megbecsülhető a tachion-abszorpció hatáskeresztmetszetének felső korlátja.

Ezekre a megfigyelésekre az elemi részek elméletének keretein belül mindmáig nem sikerült egyértelmű, meggyőző magyarázatot adni.

Danburg és munkatársai [30] azonban megmutatták, hogy ez a csúcs jól értelmezhető tachoncserével; pontosabban ha feltételezzük, hogy a kölcsönható részecskék olyan tachiont cserélnek, amelynek tömege $m_0 = 1\ GeV$, élettartama $\tau_0 \approx \approx 10^{-24}$ sec, egyéb kvantumszámai pedig megegyeznek a ϱ-mezon kvantumszámaival.

Ez az eredmény természetesen még nem jelenti rövid élettartamú tachionok létezésének a bizonyítékát; ennek eldöntéséhez jóval több, *különböző* úton nyert kísérleti adatra van szükség. Mindenesetre érdekes és figyelmet érdemel az előző kölcsönhatás „tachionos" értelmezésének a sikere.



6. ábra. A tachionok Cserenkov-sugárzásának kimutatására szolgáló kísérlet elvi vázlata [31], [32].
A tachionok az ólomrétegben keletkeznek; az ólomréteg a γ-forrást teljesen leárnyékolja. A pozitív elektromos töltésű tachionok a kondenzátor elektromos terében lefékeződnek; Cserenkov-sugárzásukat fotosokszorozó regisztrálja

A tachionok Cserenkov-sugárzására vonatkozó kísérletek

Amerikai és svéd fizikusok egy csoportja a tachionok Cserenkov-sugárzásának a kimutatására végzett méréseket [31], [32].

Ha a tachionnak elektromos töltése van, akkor — a többi elektromos részecskéhez hasonlóan — Cserenkov-sugárzást bocsát ki, hacsak nagyobb a sebessége, mint a fény fázissebessége abban a közegben, amelyben az elektromos részecske mozog: $v > c^* = c/n$ ($n \geq 1$ a közeg törésmutatója). Minthogy a tachion sebessége a vákuumbeli fénysebességnél nagyobb, várható, hogy a tachionok — a közönséges részecskéktől, a bradionoktól eltérően — vákuumban is képesek Cserenkov-sugárzásra. E sugárzás kimutatására végzett kísérlet lényege a következő. Tételezzük fel, hogy a kb. 1 *MeV* energiájú γ-kvantumok hatására az ólomrétegben tachionpár keletkezik, s kilépve az ólomrétegből, a vákuumban Cserenkov-sugárzást emittál. A sugárzást fotosokszorozóval érzékeljük. Az elméleti megfontolás azt mutatja, hogy a tachion keletkezésétől számítva néhány század milliméter távolságon csaknem az összes energiáját elveszti. Ezért az elektromos tachion útjába speciális kondenzátort helyeztek; a kondenzátor elektromos terét úgy választották meg, hogy a tachion energiaveszteségét kompenzálja (6. ábra). A kísérleti berendezés paramétereit úgy választották meg, hogy a fotosokszorozóban száznál több foton volt várható. Ennek ellenére a kísérlet a tachion Cserenkov-sugárzásának nyomát sem mutatta; a tachionok fotokeltésének hatáskeresztmetszete legalább 10^4-szer kisebb, mint az elektron-pozitronpár keletkezésének a hatáskeresztmetszete.

Ez az eredmény azért is fontos, mert a fotosokszorozó attól függetlenül detektálja a fotont, hogy az emissziós folyamatban keletkezett-e vagy a fordított: $\tau + \bar{\tau} \to \gamma$ folyamat eredményeként jött-e létre.

A kísérletek negatív eredménye egész sor elméleti vizsgálat kiindulópontja lett. Mindenekelőtt tisztázódott, hogy a tachionok vákuumban nem emittálnak Cserenkov-sugárzást. A sugárzás létrejöttének feltételezése a bradionokra érvényes formula hibás általánosításán alapult. (l. [33], [34]; e dolgozatokban további irodalmi utalások találhatók.) Az alaposabb megfontolások azt mutatják, hogy a bradionokhoz hasonlóan vákuumban a tachionok nem emittálnak Cserenkov-sugázást.

Ezt a következtetést a következőképpen világíthatjuk meg. Tételezzük fel, hogy nemcsak a bradionokhoz, hanem a tachionokhoz is hozzárögzíthető egy koordinátarendszer. Ha így van, akkor a koordinátarendszereket összekötő Lorentz-transzformációt általánosítani kell, ki kell terjeszteni fénysebességnél nagyobb sebességű relatív mozgásokra is [35]—[37]. Ha már most egy részecske a laboratóriumi rendszerben $v > c$ sebességgel mozog, akkor van olyan koordinátarendszer, amelyben a részecske sebessége kisebb a fénysebességnél: $v < c$, azaz ebben a rendszerben a részecske bradion s így a fizika „szokásos" törvényei szerint viselkedik. Így pl. energiája nem változik, ha vákuumban mozog:

$$\frac{dE}{dt} = 0$$

Ha ezt az egyenlőséget az általánosított Lorentz-transzformáció segítségével átültetjük a laboratóriumi rendszerbe, azt kapjuk, hogy a részecske energiája ebben a rendszerben is állandó:

$$\frac{dE_{lab}}{dt_{lab}} = 0$$

vagyis vákuumban semmilyen részecske sem emittál Cserenkov-sugárzást (37).*

A Lorentz-transzformáció általánosítása alapján tehát arra a következtetésre jutunk, hogy a tachionok Cserenkov-sugárzása vákuumban tiltott. Ez a következtetés a Cserenkov-sugárzással kapcsolatos nehézségeket és ellentmondásokat nagyrészt megszünteti [20], [33], [38], [39]. Nem

* Ez a következtetés nemcsak az elektromágneses sugárzásra érvényes, hanem más típusú, pl. gravitációs sugárzásra is.

szabad azonban elfelednünk, hogy a Lorentz-transzformáció általánosítása, amelyre megfontolásunkat alapozzuk, még nem bizonyított hipotézis.

A kérdés még feleletre vár

Látható tehát: nagyon specifikus kísérleti feltételek szükségesek ahhoz, hogy megnyugtató módon, egyértelműen értelmezhessük a tachionok esetleges létezésével kapcsolatos effektusokat.

Az eddig elvégzett, ilyen vonatkozású kísérletek negatív eredménye még nem ad okot a kétkedésre. Léteznek-e fénysebességnél nagyobb sebességű részecskék? A kérdés még válaszra vár. A tachionokkal kapcsolatos jelenségek kauzális értelmezésének a nehézségei azonban arra utalnak, hogy a tachionok, — ha egyáltalán léteznek — a $\Delta x < 10^{-16}$ cm, $\Delta t \lesssim 10^{-26}$ sec rendkívül kicsiny téridő-tartományba „vannak zárva", vagyis abba a tartományba, ahol már a téridő-szimmetriát sértő folyamatok kezdenek fontos szerepet játszani.

IRODALOM

1. Я. П. Терлецкий, ДАН СССР *133*, 329 (1960)
2. Ya. P. Terletsky, J. Phys. et Radium *21*, 681 (1960) *23*, 910, (1962)
3. Я. П. Терлецкий, Парадоксы теории относительности, М., „Наука", 1966.
4. O.M.P. Bilaniuk, V. K. Deshpande, E. C. Sudarshan, Am. J. Phys. *30*, 718 (1962)
5. A. Sommerfeld, Kon. Ned. Acad. Wetenshap. Amsterdam Proc. *8*, 346 (1904)
6. A. Sommerfeld, Nachr. Ges. Wiss. Göttingen, 201 (1905)
7. P. L. Csonka, Nucl. Phys. *B21*, 436 (1970)
8. W. B. Rolnik, Phys. Rev. *183*, 1105 (1969)
9. G. Feinberg, ibid. *159*, 1089 (1967)
10. M. E. Azons, E. C. G. Sudarshan, ibid. *173*, 1622 (1968)
11. J. Dhar, E. C. G. Sudarshan, ibid. *174*, 1808
12. R. G. Newton, ibid. *162*, 1274 (1967)
13. A. E. Antippa, A. E. Everett, ibid. *D4*, 2198 (1971)
14. J. A. Parmentola, D. D. H. Lee, ibid. p. 1912
15. L. S. Schulman, Am. J. Phys. *39*, 481 (1971)
16. E. Recami, Lett. Nuovo Cimento *4*, 73 (1970)
17. R. Fox, C. E. Kuper, S. G. Lipson, Proc. Roy. Soc. *A316*, 515 (1970)
18. P. L. Csonka, Phys. Rev. *180*, 1266 (1969)
19. М. Г. Шафранова, Пробл. физ. ЭЧАЯ (1974)
20. H. K. Wimmel, Nature (Phys. Sci.) *236*, 79 (1972)
21. C. Baltay, G. Feinberg, N. Yen, R. Linsker, Phys. Rev. *D1*, 759 (1970)
22. J. S. Danburg, G. R. Kalbfleisch, ibid. *D5*, 1575 (1972)
23. P. V. Ramana Murthy, Lett. Nuovo Cimento *1*, 908 (1971)
24. A. R. Whitney, I. I. Shapiro, A. E. E. Rogers, D. S. Robertson, C. A. Knight, T. A. Clark, R. M. Goldstein, G. E. Marandino, N. R. Vanderberg, Science *173*, 225 (1971)
25. L. S. Schulman, Nuovo Cimento *B2*, 38 (1971)
26. Г. Н. Флеров, сборник „Ядерные реакции при малых и средних энергиях" (Труды Всесоюзной конф. ноябрь 1957 г.), М., Изд-во АН СССР, 1958, стр. 608.
27. Г. Н. Флеров, Д. С. Клочков, В. С. Скобкин, В. В. Терентьев, ДАН СССР *118*, 69 (1958)
28. H. S. Gurr, W. R. Kpopp, F. Reines, B. Meyer, Phys. Rev. *158*, 1321 (1967)
29. A. M. Gleeson, M. G. Gundzik, E. C. G. Sudarshan, ibid. *D6*, 908 (1972)
30. J. S. Danburg, G. R. Kalbfleish, S. R. Borenstein, R. S. Strand, V. Vanderburg, ibid. *D4*, 53 (1971)
31. T. Alväger, M. N. Kreisler, ibid. *171*, 1357 (1968)
32. M. B. Davis, M. N. Kreisler, T. Alväger, ibid. *183*, 1132 (1969)
33. E. C. Jones, ibid. *D6*, 2727 (1972)
34. H. K. Wimmel, Lett. Nuovo Cimento *1*, 645 (1971)
35. M. Glück, Nuovo Cimento *A1*, 467 (1972)
36. R. Mignani, E. Recami, ibid. *A14*, 169 (1973)
37. R. Mignani, E. Recami, Lett. Nuovo Cimento *7*, 388 (1973)
38. R. G. Cawley, Phys. Rev. *D2*, 276 (19
39. A. S. Lapedes, K. S. Jacobs, Nature (Phys. Sci.) *234* 6 (1972)

TÉRTÖLTÉSI EGYENLETEK KÖZELÍTŐ MEGOLDÁSA

Wiedemann László
Fővárosi Pedagógiai Intézet

A gázok és a vákuumban mozgó töltéshordozók elektromos vezetése köréből tekintünk néhány esetet. E munkában igyekszünk konkrét problémákon megvilágítani az elektromos vezetés mélyebb értelmezését, mely a tértöltési egyenletek felhasználásával lehetséges, és egyben bemutatni azt, hogy — a még egyszerűsített helyzetekben is — a megoldandó differenciálegyenletrendszer közelítéssel tárgyalható csupán. Itt előtérbe kerülnek a matematikai közelítésnek a fizikai szemléletből adódó szempontjai; az a törekvés, hogy a közelítés éppen a jelenség lényegét emelje ki, vagy lehetőleg a kevésbé lényegeset veszítsük el.

Ha részben evakuált, két elektródát tartalmazó zárt gáztérben végbemenő vezetést vizsgálunk, vagy vákuumdioda vezetését, midőn a katód termoemisszióval hozza létre a vezetést biztosító elektronokat, a vezetési térnek ez a része egyrészt tértöltést tartalmaz általános esetben, másrészt a differenciális Ohm törvény $j = \sigma E$ alakját tekintve, a σ vezetőképesség nem állandó. Így a vezetési tér nem lineáris karakterisztikájú. Kimutatható, hogy a közönséges Ohm törvény (vagyis a lineáris feszültség-áram karakterisztika, mikoris σ állandó érték) csak tértöltéssel nem rendelkező vezetési térben lehet érvényes. Minthogy stacionárius vezetéskor az áramtér az összes töltést tekintve (pozitívokat és negatívokat egyaránt) forrásmentes, ezért $\mathrm{div}\, j = 0$. Ezt és a $j = \sigma E$ összefüggést, továbbá az elektrosztatika $div\, E = 4\pi\varrho$ törvényét tekintve, valamint σ most feltételezett konstans jellegét felhasználva, egymásba való helyettesítéssel $\varrho = 0$ adódik. Tehát az összes térfogati töltés koncentrációból adódó ϱ tértöltés zérus [$\varrho = e(n_+ - n_-)$].

Tértöltés, vagy nem állandó σ vezetőképesség esetén a térmennyiségek meghatározása már nehezebb. Bonyolítja a helyzetet, ha a pozitív és negatív töltéshordozókra nézve külön-külön forrásos a tér, és egyidejűleg rekombináció is fogyasztja a töltéshordozókat. Stacionárius

esetben mindezek ellenére, a kétfajta töltéshordozót tekintve, a térnek továbbra is forrásmentesnek kell lennie. Nem állandó σ esetén a tértöltési egyenletekhez a töltéshordozóknak az adott esetre vonatkozó mozgástörvényeit leíró összefüggéseket kell csatolni, így a meghatározandó függvények száma a differenciálegyenletrendszer egyenleteinek számával egyezik meg. Részben evakuált gáztérben semleges atomok között mozgó ionokra a $v = u\,E$ feltevés bizonyult helyesnek, vagyis a töltéshordozók sebessége arányos a térerősséggel, ahol u jelenti a részecske mozgékonyságát. Ez esetben u-ra a rugalmas ütközés feltételezésével $u = \frac{e\lambda}{2mv_k}$ összefüggés adódik, ahol λ a szabad úthossz, m a részecske tömege és v_k a termikus mozgás átlagsebessége. Számszerűen: $u \sim 10^3\,\mathrm{cm\,s^{-1}/V\,cm^{-1}}$. Ha ellenben vákuumban elektronok képviselte tértöltésben zajlik a vezetés, akkor az elektronok sebességér az elektrosztatikai munkatételből: $\varphi = \frac{1}{2}mv^2$, ahol φ az adott hely potenciálja és v ugyanazon a helyen az elektron sebessége. Ez esetben tehát nem állandó a mozgékonyság.

1. Gáztér vezetése

Részben evakuált gáztérben ionizátor egyenletesen hoz létre egyenlő számú pozitív és negatív töltéshordozót $q(\mathrm{cm^{-3}s^{-1}})$ forráserősséggel és ugyanakkor rekombináció is fogyasztja a töltéshordozókat. Térfogategységben időegység alatt $\gamma n_1 n_2$ tűnik el, ahol n_1 a pozitív, n_2 a negatív részek térfogati koncentrációja és γ a rekombinációs együttható. A gáztérben semleges atomok is jelen vannak, így a $v = uE$ összefüggést vesszük érvényesnek ugyanazon állandó u mozgékonysággal mindkét töltéshordozóra nézve, továbbá a stacionárius állapotot tekintjük. Jelölje e az elemi töltés abszolút értékét és u_1, u_2 a mozgékonyságok abszolút értékkét. Tekintsünk továbbá egyszeres ionizációt. Vizsgáljuk az önállótlan vezetést, az ütközési ionizációt figyelmen kívül hagyjuk. Ezért a keresett vezetési karakterisztikának csak a gyújtási feszültség alatti tartományban van realitása. A tértöltési egyenletrendszert vékony, hosszú csőre írjuk fel, tehát egydimenzióban és eltekintünk a töltéshordozók koncentráció különbségeiből adódó diffúziós áramtól is. A tértöltési egyenletrendszer:

$$1.\ \varphi'' = -4\pi\varrho; \qquad 2.\ \varrho = e(n_1 - n_2).$$

$$3.\ E = -\frac{d\varphi}{dx}; \qquad 4.\ v = u\,E.$$

$$5.\ j = j_1 + j_2; \qquad 6.\ j = (eu_1n_1 + eu_2n_2)E. \quad (1)$$

$$7.\ \frac{dj}{dx} = 0; \qquad 8.\ \frac{dj_1}{dx} = e(q_1 - \gamma n_1 n_2).$$

$$9.\ \frac{dj_2}{dx} = -e(q_2 - \gamma n_1 n_2); \qquad 6a.\ j_{1,2} = eu_{12}n_{12}E$$

A (1) egyenletrendszer megfelelő egyenletei az általános $\Delta\varphi = -4\pi\varrho$; $E = -\operatorname{grad}\varphi$ és a $\operatorname{div} j = 0$ egyenletek speciális alakjai. Egyszerűsítő feltevéseink:

$$q_1 = q_2; \quad n_1 = n_2; \quad u_1 = u_2. \qquad (2)$$

Az (1) rendszer 8. és 9. egyenletének összege közelítésmentesen 7-re vezet, tehát külön a pozitív és külön a negatív ionokra a tér forrásos, de az összes töltésre nézve forrásmentes. Mégis, az (1) egyenletrendszer a (2) feltevésekkel nem integrálható, hanem mindössze közelítő megoldása létezik. Látható, hogy ez így van, ha az $n_1 = n_2$ feltevést az 1/1. egyenletbe tesszük. Ekkor ugyanis homogén elektromos tér adódna. Viszont 1/7.-ből $j = jo$ helytől független, így 1/6. szerint $E =$ konst. mellett a pozitív és negatív ionkoncentráció külön tekintve homogén eloszlású. Ennek viszont ellentmond az 1/8. egyenlet, ha előzőleg az 1/6a egyenletet behelyettesítjük; ugyanis n_1-re, ennek helyfüggésére differenciálegyenlet adódik, melynek $n_1(x) \neq$ konst. megoldása van.

Ha nem vezetünk be további egyszerűsítő feltevéseket, a tértöltési egyenletrendszer még egydimenziós alakjában is bonyolult differenciálegyenletre vezet. Ebben a problémában lényegi jelenség az egyes ionfajtákra külön-külön fennálló forrásos tér létezése és a rekombináció. Ezt kiemelve, közelítő eljárásunk most abban áll, hogy elvetjük n_1 és n_2 szigorú egyenlőségét, helyette a $n_1 \sim n_2$ feltevést tesszük, a másik két feltételt változatlanul hagyjuk. Ily módon 1/1-ből megengedhető, hogy $E(x)$ térerősség átlagát tekintsük: E értéket, melyet az anódfeszültséggel változtathatunk, és az 1/8-ban $n_1 n_2 \sim n_1^2$ marad továbbra is.

Ekkor az 1/6. és 8. egyenletből $n_1(x)$-re differenciálegyenlet adódik:

$$u_1 E \frac{dn_1}{dx} = q_1 - \gamma n_1^2. \qquad (3)$$

Bevezetve az

$$a = \frac{q_1}{u_1 E} \text{ és a } b = \frac{\gamma}{u_1 E}$$

jelöléseket, kapjuk, hogy

$$\frac{dn_1}{dx} = a - bn_1^2. \qquad (4)$$

Az elrendezés sémája szerint a kezdőfeltételek a szemléletből adhatók meg:

$$\begin{cases} x = 0 \\ j_1 = 0 \end{cases} \qquad \begin{cases} x = l \\ j_2 = 0. \end{cases}$$

Az ionok felszaporodása ugyanis a töltéshordozókéval azonos előjelű elektródáknál kezdődik.

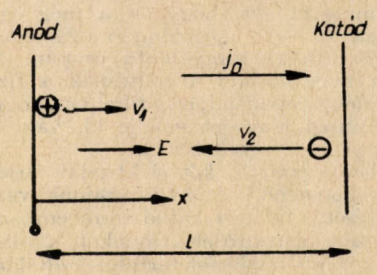
Ha most tekintjük a 1/6a egyenletet, akkor látható, hogy az áramsűrűség az n térfogati koncentrációval arányos, mivel E a térerősség hely szerinti átlaga, tehát a cső mentén állandó. Ezek szerint az elektródákon pusztán csak egyik fajta töltéshordozó lenne jelen s közben n_1 és n_2 eloszlása az áramsűrűség eloszlása szerint változna s csak egyetlen keresztmetszetben lenne $n_1 = n_2$, de korántsem igaz az $n_1(x) = n_2(x)$ azonosság. A szemlélet ugyan alátámasztja a kezdőfeltételeket, de a (2) feltevésekkel ez nincs egyezésben. Így mondhatjuk, hogy az elektródákon a közelítésnek elég durva vonásai jelentkeznek. A későbbiek szerint viszont a vezetés lényeges vonásairól ad számot a közelítő számítás, vagyis a (4) egyenlet megoldása.

A (4) egyenlet megoldása $y = \operatorname{arth}(x)$ függvényre vezet. Az első kezdőfeltétellel

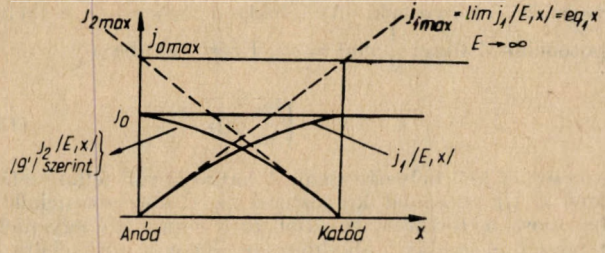
$$j_1 = eu_1 E \sqrt{\frac{q}{\gamma}} \frac{\exp(2\sqrt{ab}\,x) - 1}{\exp(2\sqrt{ab}\,x) + 1}. \qquad (5)$$

A j_0 teljes áramot kívánjuk meghatározni: $j_0 = j_1 + j_2$. Ebből $j_2 = j_0 - j_1$. Most alkalmazzuk erre a második kezdőfeltételt, akkor $j_0 = j_1(l)$. Végül a keresett közelítő megoldás:

$$j_0 = eu_1 E \sqrt{\frac{q}{\gamma}} \frac{\exp(2\sqrt{ab}\,l) - 1}{\exp(2\sqrt{ab}\,l) + 1}. \qquad (6)$$



1. ábra



2. ábra

A 2. ábra szemlélteti, hogy az egyes ionfajták által szállított áram helyfüggő, azonban az összes áram, vagyis a j_0 áramsűrűség mindenhol ugyanaz a kisülési cső mentén.

A (6) megoldás fizikai realitásának kritériuma, hogy fontos határeseteket is magában foglal. Az a és b konstansok jelentése szerint a $\sqrt{ab}$ mennyiség fordítva arányos az E térerősséggel. Kis anódfeszültség, tehát kis térerősség esetén a (6) formula exponenciális kifejezései dominálnak, így (6)-ban a törtben ± 1 elhagyható:

$$j_0 = eu_1 \sqrt{\frac{q}{\gamma}}\, E. \text{ (E-nek kis értékeire).} \qquad (7)$$

Így, ha a j_0 áramsűrűséget E függvényében tekintjük, a (7) képlet éppen a differenciális Ohm törvény állandó értékű $\sigma = eu_1 \sqrt{\frac{q}{\gamma}}$ vezetőképességgel. Ebből viszont az integrális Ohm törvény nyerhető, tehát lineáris feszültség — áram karakterisztika. Pontosan ezt mutatja a tapasztalat is; az induló tartományban az önállótlan vezetés az egyszerű Ohm törvény szerint zajik. Ha viszont a térerősség lesz igen nagy, akkor nincs mód rekombinációra, mert a keletkező töltéseket a tér igen gyorsan elszívja. Így tehát beáll a telítési állapot; a keletkező töltések áram formájában mind el is távoznak. Pontosan számot ad erről is az áramsűrűség (6) képlete:

$$\lim_{E\to\infty} j_0 = eq_1 l. \qquad (8)$$

A (8) határértékre úgy jutunk, hogy tekintjük ezt a határértéket:

$$\lim_{E\to\infty} \left[\frac{\exp\left(\frac{2\sqrt{q_1\gamma}}{u_1 E}\right) - 1}{\frac{1}{E}} \right]. \qquad (8a)$$

Ezt a L'Hospital szabállyal határozzuk meg, továbbá (6) nevezője $E \to \infty$-re 2-höz tart. Ezekből adódik a (8) telítési formula, melynek jelentése egészen szemléletes. Annyi megjegyzés kínálkozik, hogy az $eq_1 l$ telítési áramsűrűséget a katódon a pozitív ionok valósítják meg, míg egyidejűleg az anódon a negatív töltéshordozók. Közelítő képletünk nem tartalmazza az önálló vezetés leírását, vagyis az ütközési ionizációt. Ezt már az (1) tértöltési egyenletrendszerben kellene kifejezésre juttatni. Így természetes, hogy a telítési formula $E \to \infty$ határértékre véges áramsűrűséget ad.

Szeretnénk megvilágítani, hogy a (2) egyenletben miért szükséges az ionmozgékonyságok egyenlőségét feltételezni az eddigiekben számított közelítő megoldásban. Így teljesül ugyanis a megoldás egyértelműségének követelménye.

A (3) egyenletet felírhatnánk az n_2 negatív töltéshordozókra is. Ehhez 1/6a és 1/9-et kell felhasználni. Ekkor j_2-re ezt kapjuk:

$$j_2 = eu_2 E \sqrt{\frac{q}{\gamma}}\, \frac{\text{Cexp}\,(-2\sqrt{a'b'}\, x) - 1}{\text{Cexp}\,(-2\sqrt{a'b'}\, x) + 1}. \qquad (9)$$

ahol a' és b' konstansok a és b megfelelői de az u_2 mozgékonysággal. Ami a C állandót illeti, most $j_2(l) = 0$ és ebből (9) alapján $C = \exp/2\sqrt{a'b'}\, l)$. Így j_2-re ezt kapjuk:

$$j_2(E, x) = eu_2 E \sqrt{\frac{q}{\gamma}}\, \frac{\exp\,[2\sqrt{a'b'}\,(l - x)] - 1}{\exp\,[2\sqrt{a'b}\,)\,(l - x)] + 1}. \qquad (9')$$

Felhasználva, hogy $j_0 = j_1 + j_2$ és $j_1(0) = 0$, következik, hogy $j_0 = j_2\,(0)$. Így (9')-ből j_0-nak újabb kifejezése adódik.

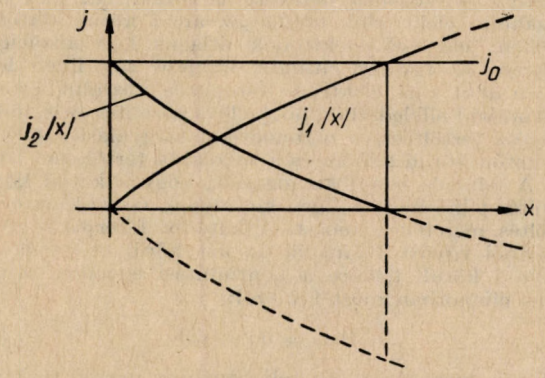
$$j_0 = eu_2 E \sqrt{\frac{q}{\gamma}}\, \frac{\exp\,(2\sqrt{a'b'}\, l) - 1}{\exp\,(2\sqrt{a'b'}\, l) + 1}. \qquad (9a)$$

A megoldás egyértelműségének követelménye szerint j_0 (6) és (9a) kifejezéseinek meg kell egyezniök. Azonosság csak akkor lehet, ha $u_1 = u_2$. Így a jelen közelítő megoldásnak ez szükséges feltétele.

A számítás közelítő jellege abban is jelentkezik, hogy ha $j_2(x)$-et $j_1(x)$-ből számoljuk és nem (9')-ből, akkor $j_2(x)$-re kissé eltérő eloszlást kapunk:

$$j_2(x) = j_0 - j_1(x).$$

Ennek a képe már nem azonos a $j_2(x)$-nek a 2. ábrán feltüntetett képével:



3. ábra

2. *Tértöltés vákuumban, véges teljesítményű, egy helyre koncentrált ionforrással*

Gondoljunk a vákuumdiodára, ahol tértöltés jelenlétében az izzó katódból emittált elektronok biztosítják a vezetést. A katódot tértöltés veszi körül, az elektromos tér ebből szívja el — közbülső tértöltés jelenlétében — a vezetéshez szükséges elektronokat. Ha a katód hőmérséklete (legyen pl. közvetett fűtésű) nem változik, világos, hogy az anódfeszültség növelésével végül is beáll a telítési áram. Ezt a telítésbe hajló feszültség-áram karakterisztikát kívánjuk közelítőleg meghatározni.

Ha a katód tetszőlegesen változtatható teljesítményű elektronforrás, akkor egzaktul meghatározható a karakterisztika a tértöltési egyenletek alábbi rendszeréből:

$$\nabla^2 \varphi = 4\pi en(x)\text{: } j = j_0; \quad \text{konst, } e\varphi = \frac{1}{2} mv^2 \qquad (10)$$

$$\left.\begin{aligned} j &= \text{env} \\ x &= 0 \\ E &= 0 \\ \varphi &= 0 \end{aligned}\right\} \text{ kezdeti feltételekkel.}$$

Ebből adódik az elektroncső karakterisztikák fontos ún. 3/2-ed kitevős törvénye, mely a karakterisztika kezdeti és középső, emelkedő szakaszát írja le. Korlátozott teljesítményű elektronforrás esetén a karakterisztika ezen részeit is csak közelítéssel írja le a 3/2 kitevős tör-

vény. Ha egydimenzióban oldjuk meg a (10) egyenletrendszert, akkor a megoldás explicit alakja ilyen:

$$j = \frac{1}{9\pi}\left(\frac{2e}{m}\right)^{1/2}\frac{U^{3/2}}{d^2}. \quad (d\text{: katód}-\text{anód távolság}).$$

Jelen problémánk közelítő megoldását úgy képzeljük, hogy a katód körüli tértöltést véges, de változtatható teljesítményű elektronforrásnak tekintjük, és ezt kombináljuk a (10) egyenletrendszerrel. Az anódfeszültség növelésével az elektromos tér egyre több töltést szív el a katód körüli felhőből. Így az itteni elektronkoncentráció egyre csökken. Tehát az anódfeszültség tetszőleges növelésével az elszívott elektronok okozta áram nem növekedhet akármeddig, hanem határt szab ennek a katód termoemissziós teljesítménye. A vezetés egész terében tértöltés van jelen, melyet részben a (10) egyenletrendszer ír le a katódtól távolabbi helyekre, másrészt a katód körül e felhőből történik az áram biztosítása. E felhőnek a vezetés szempontjából egyik fontos tulajdonságát az erre a térrészre alkalmazott kontinuitási egyenlettel vesszük figyelembe. Így a katód körüli tértöltésre vonatkozóan a dinamikus egyensúlyt használjuk fel; a termoemisszió folytán kilépő elektronok egyrészt áramként távoznak, másrészt visszahullanak a katódba. A kontinuitási egyenletben a visszahullással eltűnő elektronokat negatív forráserősségként vesszük figyelembe. Ez utóbbira — minthogy a folyamat igen összetett — közelítő feltevést vezetünk be: legyen a visszahulló elektronok száma az anód körüli tértöltés felhőben jelenlevő elektronok átlagos koncentrációjával arányos. Így az eltűnést kifejező tag ilyen lesz: $-e\alpha n$ ahol e az elektron töltésének abszolút értéke. Nem szabad elfelednünk, hogy eleve közelítés az is, mikor az egész tértöltést, a matematikai tárgyalást tekintve, egy katód körüli felhőre és a távolabbi tértöltésre bontjuk. A feltevés annyiban jogosult, hogy a katód körüli tértöltés felhő méretét igen kicsinynek vesszük az egész tértöltés méretéhez képest. A katódot kiterjedés szempontjából együtt tekintjük az azt körülvevő felhővel. A katód körüli felhőre a kontinuitási egyenlet stacionárius állapotban most így szól:

$$\operatorname{div} j = eq - e\alpha n, \qquad (11)$$

ahol q a termoemissziós teljesítményt jelenti térfogategységre nézve. Alkalmazzuk Gauss tételét és (11)-et integráljuk a felhő térfogatára:

$$\int_A j_n \, dA = \int_V (eq - e\alpha n)\, \mathrm{d}V. \qquad (12)$$

A telítési jelenséget modellszerűen kívánjuk tárgyalni ezért a (12) integrált egydimenzióban számítjuk ki és az $n(x)$ térfogati koncentrációnak a felhőben levő átlagértékével számolunk: Ekkor

$$jA = (eq - e\alpha\bar{n})\ V$$

melyből

$$j = e(q - \alpha\bar{n})\, l_1. \qquad (13)$$

ahol l a katód körüli felhő szélességét jelenti. Másrészt tudjuk, hogy az áramsűrűség: $j = e\,\bar{n}\,v$, ahol v az elektronok átlagsebességének abszolút értéke. A (13) egyenlettel kapjuk, hogy

$$\bar{n} = \frac{q}{\alpha + \frac{v}{l}}.$$

Ismét felhasználva az áramsűrűség képletét, végül

$$j = eq\,\frac{vl}{\alpha l + v}. \qquad (14)$$

Az áramsűrűség a katód körüli felhőben helyfüggő valójában, jelenleg ennek átlagértékével számolunk, melyet (14) fejez ki. A tértöltés másik részében — mivel nincs semmilyen forrás — már helytől független állandó érték, és megegyezik a katód körüli felhő szélén levő értékkel. Így a vezetés egész terére az áramsűrűség (14) képletét vesszük érvényesnek. Az elektron sebessége a helyi potenciáltól függ: $\frac{1}{2}mv^2 = e\varphi$. Ezért (14)-be a

$$v = \sqrt{\frac{2e}{m}\varphi(l)} \qquad (15)$$

sebességet kell helyettesíteni. A katód körüli felhő szélén levő φ (l) potenciál kifejezhető az U anódpotenciállal, ha most a tértöltés további részére a (10) egyenletrendszer megoldását alkalmazzuk. Ez a φ potenciálra a

$$\varphi(x, j)^{3/4} = \frac{3}{2}\left(\frac{8\pi^2 m}{e}\right)^{1/4}\sqrt{jx} \qquad (16)$$

megoldást adja, ahol x a katódtól mért távolság, m az elektron tömege. Ha (16)-ot egyszer a katód körüli felhő szélére $(x = l)$, másodszor a katód—anód d távolságára írjuk fel, majd a két egyenletet osztjuk (figyelembe véve, hogy j mindkét esetben ugyanaz), akkor kapjuk, hogy

$$\frac{\varphi^{3/4}(l)}{U^{3/4}} = \frac{l}{d}. \qquad (17)$$

Így a (15)-ben adott $\varphi(l)$ az U anódpotenciállal kifejezhető. Ezt (14)-be helyettesítve, kapjuk a telítési jelenség közelítő megoldását:

$$j = eq\,\frac{l\sqrt{\frac{2e}{m}}\left(\frac{l}{d}\right)^{2/3}\sqrt{U}}{\alpha l + \sqrt{\frac{2e}{m}}\left(\frac{l}{d}\right)^{2/3}\sqrt{U}}. \qquad (18)$$

Látható, hogy $U \to \infty$ határesetben $j \to eql$, ami szemléletesen is közvetlenül adódik. A telítési áramsűrűség tehát: $j_{\max} = eql$.

A (18) képlet a telítéshez közeli állapotra adja meg az áramsűrűség közelítő értékeit, míg a 3/2 kitevős törvény az anódfeszültség kisebb értékeire ad közelítést.

Megemlítjük még, ha az elektronoknak a katódba való visszahullását továbbra is $e\alpha n$ negatív forrásként vesszük figyelembe és nem bontjuk két részre a tértöltést, hanem a valóságnak megfelelően egyetlen tértöltésként tekintjük — így $n(x)$ helyfüggő a vezetés egész terében — akkor az alábbi tértöltési egyenletrendszert kell megoldani:

$$\nabla^2\varphi = 4\pi en \qquad j = en\,v \qquad \operatorname{div} j = eq - e\alpha n$$

$$\frac{1}{2}mv^2 = e\varphi.$$

Ez az egyenletrendszer még egydimenziós átírásban is nehéz differenciálegyenletre vezet, melyet nem tudunk zárt alakban integrálni. Ezért szükséges több esetben a fizikai szemlélet alapján — a jelenség lényegét megtartva — matematikai közelítést alkalmazni. A közelítés ez esetben abban áll, hogy olyan modellt alkotunk a jelenségről, mely már matematikailag egzaktul tárgyalható, azonban maga a modell tartalmazza a jelenség közelítő megragadását. Ilyen eljárást követtünk a most tárgyalt két probléma kapcsán is.

A modell szerepe igen fontos; ez a közvetítő láncszem a valóságos jelenség és annak matematikai tárgyalása között. Hogy helyesen írunk-e le valamely jelenséget, ezt döntően megszabja, hogy a vonatkozó modell a jelenség lényeges fizikai elemeit tartalmazza-e. Gondoljuk meg például, hogy a szilárd testek tárgyalásakor a periodikus potenciál bevezetése mennyire nem a reális helyzetet írja le, mikor a négyszög alakú periodikus potenciállal oldják meg a Schrödinger egyenletet. Az ún. végtelen hosszú vonalkristálynak ilyen tárgyalása mégis e problémában a leglényegesebbet tartalmazza; számot ad a sávstruktúráról és a sávokon belüli diszkrét energianívókról. Nemcsak kvalitatív kép ez, hanem közelítőleg kvantitatív eredményeket is szolgáltat és a szakirodalom elfogadottnak tekinti, mint közelítést. Ilyen módon a közelítő számítások a nehezebb problémáknak szinte kizárólagos vizsgálati eljárásai.

A TERMÉSZETTUDOMÁNYOK EREDMÉNYESEBB TANÍTÁSÁRÓL

A. Baez
ICSU University of California, Berkeley

Úgy érzem, nagy megtiszteltetés számomra, hogy ezen hallgatóság előtt a természettudományok tanításának megjavításáról beszélhetek. Az ICSU célja az, hogy az emberiség javára előmozdítsa a természettudományokat nemzetközi szinten, ezért kívánságom szerint itt jelen vannak nemcsak a természettudományokkal foglalkozók, hanem humánok is, mert cél csak a két csoport közti szoros kapcsolattal és együttműködéssel érhető el. Bízom benne, hogy ez a kapcsolat szorosabbá válik, ha a természettudományt a jövőben jobban és eredményesebben sikerül tanítanunk mindkét csoport számára.

Az emberiség legnagyobb problémái, amelyek szoros kapcsolatban vannak a tudomány és a technika fejlődésével, négy „P"-vel kezdődő szóba foglalhatók össze. Ezek: population, pollution, poverty and peace (magyarul népesség, szennyezés, szegénység és béke).

Hiszek a nevelésben, mint olyan eszközben, mely a béke megvalósításának fontos tényezője, és hiszek a természettudományok szerepének fontosságában a nevelés egész területén.

Hiszem, hogy ha a természettudományokat megfelelő módon tanítják, akkor az elő fogja segíteni négy olyan emberi tulajdonság kifejlődését, mely hivatott a négy „P" által támasztott problémák megoldására. Ezeket én röviden a négy „C"-nek nevezem: curiosity, compassion, creativity és competence (magyarul: állandó kíváncsisággal párosult érdeklődés, együttérzés, alkotóképesség és hozzáértés).

Victor Weisskopf a következőket mondja: „A természettudomány nem fejlődhet, ha nem a tiszta tudás kedvéért űzzük. Elpusztul, ha bölcsen és nagy intenzítással nem az emberiség javára használják fel, hanem egyes csoportok hatalmi érdekeinek előmozdítására. Az emberiség létének két hatalmas tényezője van: az egyik az együttérzés, a másik az érdeklődés. Ha az érdeklődés mellől hiányzik az emberi együttérzés, akkor hiányzik a humánum, az együttérzés érdeklődés nélkül viszont hatástalan."

Önökhöz úgy jövök, mint az ICSU ama bizottságának elnöke, amely a természettudomány tanításával foglalkozik, és fő célja a tanítás eredményesebbé, jobbá tétele nemzetközi méretekben. A továbbiakban el fogom mondani, hogy mit tettünk eddig.

Az első kérdés: hogyan lehet a természettudományok *tanítását* eredményesebbé tenni? Primitív válasz erre: a természettudomány *tanulásának* eredményesebbé tételével. A válasz mégis lényegében tartalmazza a modern tanítási módszerek és a régi tekintélyen alapuló módszerek közti alapvető különbséget. Nem is lehet jobban és rövidebben összefoglalni a tanítás mai reformeszméit, mintha azt mondjuk, hogy a tanulás fontosabb a tanításnál. Az a jó tanár, aki olyan helyzeteket tud teremteni, amelyek a tanulást teszik lehetővé!

Azt hiszem, Bertrand Russel mondta, hogy a könyvnyomtatás feltalálásával az előadásos módszer elavult. Gondoljunk csak arra, hogy mi történik mégis tanítás címén egyetemeinken! Ott a tanítás szinte egyértelmű az előadással. Én is ide álltam Önök elé, és előadást tartok arról, hogy hogyan kellene tanítani. Éppen az ellenkezőjét teszem annak, amit prédikálok! Előadok, sőt olvasom az előadásomat!

Az előadási mód mellett ismerek azonban több más módszert motiváció és információ közlésére, és ma ezek közül szeretnék valamit bemutatni. Megpróbálok olyan szituációt teremteni, melyben a tanulás lehetővé válik. Egyidejűleg megengedtem magamnak egy kompromisszumot is, leírtam a szöveget, mert így később el is olvashatják. Közben eltérek időnként az írott szótól, bemutatok kísérleteket és filmet. Közönségem összetételének megfelelően nemcsak az érdeklődést kívánom felkelteni és új tudnivalót közölni, hanem egyúttal szórakozást is nyújtok.

Az előadás egyik felében a természettudományok tanításának eredményesebbé tételéről beszélek, a másik felében — az első illusztrálására — egy konkrét témát választok fizikából: *az állóhullámokat*. Egy kicsit bűvészkednem kell, remélem, sikerülni fog.

*

(Ehhez a kísérlethez egy hosszú, vékony rúdra van szükség, amelyen az állóhullámokat demonstráljuk.)

Íme, egy közönséges vonalzó, amilyent az ácsok is használnak. Választhattam volna valamilyen egyszerű farudat is, de nem fért volna be a bőröndömbe. Íme, egy állóhullám! A két végen nagy kilengést látunk, középen egészen kicsit. Ideális, súrlódás nélküli esetben középütt teljes nyugalom van — egy tökéletes *csomópont*. A rúd két vége jó példa *duzzadási helyre*, ahol a kitérés maximális. A rezgés szaporaságát frekvenciának — *rezgésszámnak* nevezzük. A mi esetünkben kb. két rezgés esik egy másodpercre.

Ezzel azt is bemutattuk, hogyan lehet kísérlet alapján szavakat bevezetni új fogalmak elnevezésére. Minél több példát mutatunk, annál világosabb lesz a fogalom.

Ha a vonalzót a végétől számított kb. egy negyedében fogjuk meg, akkor új rezgésalakot tudunk létrehozni. A jellemző rezgésszám nagyobb, mint az első esetben. Ugyanez a rezgésforma úgy is előállítható, hogy a vonalzót a közepén fogjuk és szaporábban rázzuk megfelelő frekvenciával. Két csomópontot és három duzzadási helyet figyelhetünk meg.

*

Már várom az Önök ellenvetését. Miért én, a tanár mutatom be a kísérletet és nem a tanulókkal végeztetem el? Igazuk is van. Előnyösebb ugyan, ha a tanulók maguk kísérleteznek, de a tanári kísérlet is alkalmas az érdeklődés felkeltésére. Ezt a vonalzót azonban nem szívesen adnám tanulók kezébe, mert ahhoz aránylag túl drága. Ha csak ez az eszköz állna rendelkezésemre, akkor a kísérlet bemutatása után valószínűleg elzárnám, ahogy azt sok országban a tanárok meg is teszik a demonstrációs eszközökkel. Ha nem tennék, akkor a tanulók biztosan összetörnék.

Ehhez a kísérlethez azonban bőven akad olcsó eszköz. Egyszerű fa vagy fém rúd is megfelel. A tanulók kvantitatív kísérleteket is végezhetnek. Mérhetik a rúd hosszának megfelelő megengedett frekvenciákat.

Az állóhullám fogalma fontos, mert nemcsak rudakon jön létre, hanem rugók, rádióhullámok, hanghullámok, vízhullámok, fény és más jelenségek esetében is. Még az atomok belsejében is beszélünk állóhullámokról. A matematikusok igen részletesen foglalkoztak ilyen jelenségekkel, de ők a megengedett frekvenciákat egy furcsa szóval jellemzik: saját függvényekről beszélnek. Lám, mi most, ha felületesen is, de egy igen fontos fogalmat érintettünk.

*

[ICSU = International Council of Scientific Unions = Természettudományi Társulatok Nemzetközi Tanácsa. A. Baez az ICSU természettudományok tanításával foglalkozó bizottságának elnöke. A szerző az Eötvös Loránd Fizikai Társulatban 1975 október 8-án tartott előadás folyamán kísérleteket és filmeket mutatott be. Fordította Kunfalvi Rezső.

(Kísérlet: állóhullámok egy hosszú, vékony gumicsővel.)

Íme egy másik példa állóhullámra. Ilyen gumicső vegyszerüzletekben kapható. A kísérletnek több előnye van. Először is a jelenség nagy méretben mutatható be, így egyidejűleg sokan láthatják. Másodszor aránylag olcsó és könnyen végrehajtható. Keressük az *alaprezgést*, vagyis azt a rezgést, amelynek legkisebb a frekvenciája. Ezúttal csomópont van a két végen és duzzadási hely középen. Ha nagyobb frekvenciával mozgatom a csövet, akkor két duzzadási helyet fog közre három csomópont. Látjuk, hogy most is csak meghatározott frekvenciák lehetségesek. Az állóhullámnak ez a fontos jellemzője többek között az ún. *határfeltételektől* függ. Világos, hogy a mi esetünkben a két rögzített végnél csomópontnak kell lennie.

A gumicső rugalmas, így még egy előnye van. Ha elengedem, visszaugrik a helyére és nem kell vesződnöm az elrakással.

*

Sok országból azt halljuk, hogy a gyakorlati, vagyis laboratóriumi munka nem valósítható meg, mert az eszközök elrettentően drágák. Valóban, egyes eszközök drágák: egy jó mikroszkóp, egy árammérő sokba kerül. Igen sok berendezés azonban kevés költséggel könnyen improvizálható. Világszerte törekednek olyan egyszerű és olcsó eszközök előállítására, amelyek alkalmasak alapvető fogalmak demonstrálására. Érdekelni fogja Önöket, hogy az UNESCO nagyszámú kiadványa közül éppen egy bennünket érdeklő könyv lett bestseller — a Source Book for Science Teaching. (Forrásmunka a természettudományok tanításához). 25 nyelvre fordították le és több mint egymillió példány fogyott belőle. Az eredeti második kiadása most jelent meg.

Az ötvenes évek elején tanterv és tananyag reformok hulláma öntötte el a világot. Eddig több mint 200 különböző tervet hoztak létre a természettudományok tanításának megjavítására. Összefoglalva megtalálható egy részük az International Clearinghouse on Science and Mathematics Curricular Developments 1972. évi jelentésében. Az UNESCO is kiadott kb. kétévenként egy-egy kötetet az New Trends (Új Irányzatok) sorozatban, külön-külön az egyes tárgyakhoz: Fizika, Kémia, Matematika, Biológia és újabban Integrált Természettudomány. A Maryland Egyetemen működő Természettudományi Oktatási Központ három kötetes segédkönyvet adott ki egyszerű kísérleti eszközök készítéséhez a fizika, kémia és biológia tanárok számára.

*

(Kísérlet: műanyagból készült porszívó cső zenei hangot ad, ha forgatjuk. Álló hanghullámok.)

Ismét egy kísérlet. Ezt a csövet játéküzletekben árusítják. Neve: *zümmögő*, azon egyszerű oknál fogva, mert forgatva zümmögő hangot ad. Ha gyorsabban forgatom, a hang magasabb, frekvenciája nagyobb. A frekvencia azonban nem folytonosan növekszik. Alacsonyabb hangról magasabbra egyszerre ugrik fel. Különböző sebességgel forgatva bizonyos megengedett hangokat kapunk és csak azokat kapjuk. Ez emlékeztet bennünket olyan megengedett frekvenciákra, amilyeneket már állóhullámok esetében láttunk. Nyilván a csőben létrejövő állóhullámok felelősek a zümmögő hangért.

Ezt a csövet az UNESCO montevideoi igazgatójától kaptam. Az ő gyermeke játszott vele az udvaron és annyira elbűvölt, hogy végül is megkaptam ajándékba az akkor tervezett filmem számára, amelyet a későbbiekben be fogok mutatni.

A következő héten ugyancsak az UNESCO megbízásából Sao Paoloban jártam és az autóbuszon utazva megláttam egy hasonló csövet egy üzlet kirakatában. Leugrottam a buszról és az üzletbe berohanva rögtön megvettem. A szállodába érve megforgattam — így ni — de a cső nem zümmögött.

Először csalódást éreztem. A kísérletem nem sikerült. Egyszer éppen ezt demonstráltam, mire a hallgatóság egy egyik tagja, Elizabeth Wood, a Bell Telefon Laboratóriumból ellentmondott. Szerinte a *kísérlet mindig csak sikeres lehet*. Az eredmény esetleg nincs kedvünkre, de feltétlenül megfelel a természet törvényeinek és a mi feladatunk azokat a törvényeket megtalálni. Sokszor csalódunk, mert nem az történik, amit vártunk. Pontosan így van ez a tudományos kutató munkában is.

Így azóta bátran bemutatom előadásaimon ezt a kísérletet a zümmögővel kapcsolatban, mert felcsigázta a kíváncsiságomat, felkeltette érdeklődésemet. Miért is nem működik ez a cső? A tudományos kutatás legnagyobb ösztönzője éppen ez az érdeklődés, kíváncsiság. Ha fel tudjuk kelteni tanítványainkban egy játék segítségével, miért ne tegyük?

A viselkedéselmélet szaknyelve szerint én az utóbbi csőben egy „ellenpéldát" találtam, melyet fel lehet használni a zümmögő elvének tisztázására. Nem akarom itt definiálni az ellenpélda fogalmát, inkább egy másik esettel megvilágítom. Amikor pl. a hullám fogalmát meghatározzuk, akkor két tulajdonságot emelünk ki: 1. energiát szállít egyik helyről a másikra, 2. az egyik helyen keletkező deformáció más időben, más helyen lép fel ugyanolyan alakban. Nos, egy tekergőző kígyó megfelel mindkét feltételnek. Az a deformáció, amit az egyik helyen látunk, később ugyanolyan alakban megjelenik a másik helyen. Még meglepően szinuszhoz hasonló alakú is, akárcsak egyes hullámfajták. Mégsem hullám! A zavar nem egy folytonos, rugalmas közegben terjed. Így a kígyó mozgása egy értékes ellenpélda, és világosabbá teszi a hullám fogalmát. Emlékeztet arra, hogy a definícióból kimaradt egy lényeges elem: folytonos, rugalmas közeg szükséges a hullám közvetítéséhez.

Zümmögőket felfedeztem a világ minden tájáu. Ezek pl. Londonból származnak. Úgy tudom, hogy ilyen csöveket használtak a Szentivánéji Álom előadásánál kísérteties hangok keltésére. Hogyan működnek? Hangjuk a trombitáéhoz hasonlítható, ezek pedig megegyeznek a nyitott orgonasíp felharmonikusaival. Lényeg az, hogy ismét álló hullámokkal van dolgunk.

Tudjuk, hogy a hosszú orgonasíp mélyebb alaphangot ad, mint a rövid. Ezt a két zümmögőt forgatva láttam, hogy itt ugyanez a helyzet, pontosan ugyanaz történik. Kezdtem hinni az állóhullámok alapján alkotott magyarázatban, míg meg nem próbáltam ezt a nagyon hosszú csövet. Azt vártam, hogy most nagyon alacsony alaphangot kapok. Megforgatva, éppen az ellenkezője történt. A hang igen magas volt. Elképzelésemet a zümmögők elméletéről újból revízió alá kellett vennem.

Így lett belőle egy tanulmány témája az egyik tanulócsoportom számára, aminek eredményeként ma már ellentmondásmentes elmélet áll rendelkezésre. Nem ismertetem. Az asztalon hagyom a csöveket, és előadás után ki lehet próbálni, mindenki igazolhatja elméletét.

Ugyanezt a felszólítást intéztem egyik előadásom hallgatóságához. A hallgatóság természettudományokat tanító pedagógusokból állott, nem árulom el, hol. Az előadás után egyetlen hallgató sem jött ki, hogy a zümmögő működését kipróbálja. A gyerekek rendszerint kirohannak. A tanárok talán valamiféle társadalmi kényszer hatása alatt állnak és nem mernek kíváncsiságot mutatni. Avagy még rosszabb: elvesztették a kíváncsiságot, érdeklődést, ami gyermekkorukban bizonyára élt bennük. Szabadon Bernard Shaw után: az iskola elrontotta a tudás iránti vágyat.

*

Később még bemutatok egy további kísérletet és egy filmet. Most egyrészt azzal a világszerte elterjedt mozgalommal szeretnék foglalkozni, amely az ötvenes évek közepe óta a természettudományok tanításának megreformálásával foglalkozik, másrészt néhány mai irányzattal. Az idevágó anyag megtalálható lesz abban a könyvben, amelyet az UNESCO számára írok Innovation in Science Education (Újítások a természettudományok tanításában) címmel. A mai előadásban 5 ilyen irányzatot szeretnék ismertetni:

1. A felfedezésen alapuló tanítás.
2. A természettudományok tanítása alkalmazhatóság, társadalmi szükségesség és felelősség szempontjából.
3. Integrált természettudomány.

4. Állandó intézmények létesítése a természettudományok tanításának folyamatos megjavítására.
5. Az oktatási technológia felhasználása.

1. *A felfedezésen alapuló tanítás*

Az ötvenes évek végén a nyugati országokban mozgalom indult meg a természettudományok tanításának megjavítására a középiskolában. Keveset tudok arról, hogy mi történt ugyanekkor Kelet-Európa országaiban, így azokkal nem fogok részletesen foglalkozni. Az UNESCO-ban töltött szolgálati éveim után, a hatvanas évek végén, alkalmam volt a Szovjetunió és több keleti ország meglátogatására és tapasztalatom szerint a reform problémáját ott úgy oldották meg, hogy a felelősséget rábízták a Pedagógiai Tudományok Akadémiájára. Ezek az intézmények foglalkoznak olyan kérdésekkel, mint a tananyag, a tanterv, módszerek, eszközök és a tanítás pszichológiája.

Foglalkozzunk most a nyugati törekvésekkel, elsősorban az Egyesült Államokban, amelyekkel személyes kapcsolatom volt.

Nálunk a második világháború után a kezdeményezést egyetemi tanárok vették kézbe. Tudósokból, egyetemi oktatókból, pedagógusokból, műszaki emberekből és a szemléltetőeszközök szakértőiből munkabizottságokat alakítottak. Ezek azután nemcsak tantervet készítettek, hanem az új anyag oktatásához minden szükséges segédeszközt is (tankönyvet, tanári kézikönyvet, laboratóriumi vezérkönyvet, filmeket és laboratóriumi eszközöket.) Külön csoportok alakultak a fizika, kémia, matematika, biológiai és a földtudományok területén. A hangsúly a modern tartalmon és a modern tálalási módon volt. A tanulót úgy irányították, hogy maga fedezze fel a tényeket és ne bemagolja. Súlyt helyeztek olyan egyszerű kísérletekre, amelyeket a tanuló olcsó, egyszerű eszközökkel maga végez.

Eredetileg öt nagy terv készült a négy természettudomány és a matematika területén. Ezeket a szövetségi kormány igen komoly támogatásban részesítette. Nem tudom eléggé dicsérni az úttörő munkát végző kezdeményezők lelkesedését és erélyét. A mozgalom azután átterjedt más országokra is. Ma több mint 200 terv létezik a világon, ebből kb. a fele az Egyesült Államokban. Köztük nagy különbségeket látunk, de lényegében mindegyik súlyt helyez a kíváncsiság, az érdeklődés, a kutatási kedv keltésére és arra, hogy a tanár kezébe adja a terv végrehajtásához szükséges segédeszközöket. Szükségessé vált a tanárok újszerű képzése és továbbképzése is, de ez egy másik téma, amelyre itt most nincs időm és helyem kitérni.

2. *A természettudományok tanítása alkalmazhatóság, társadalmi szükségesség és felelősség szempontjából*

Mint már mondottuk, az érdeklődő kíváncsiság által vezetett tudós, arra törekszik, hogy a természetet és az ember alkotta világot megértse. Az első esetben tiszta, a második esetben alkalmazott tudományról van szó A cél: *megérteni azt, ami van.*

Egyes régi tudósok ezt a tevékenységet kizárólag magának a tudásnak a kedvéért űzték. A társadalmi hasznosság, alkalmazhatóság nem szerepelt gondolataik között.

Mások, csodálva például a bámulatos csillagászati felfedezéseket, valószínűleg azért látták hasznosnak a kutatást, mert bizonyította a naprendszer isteni eredetét.

Az utóbbi időkben azonban az isteni rend helyébe a természet rendje került és a deizmust a humanizmus váltotta fel. A tudós számára most két filozófiai kérdés fontos: hogyan fejlesztheti tovább a világ tudományos megértését, és hogyan teheti jobbá a társadalom intézményeit. Előtérbe került az ember iránti gondoskodás. Nem az ember van a tudományért, hanem a tudomány az emberért.

Henry Margenau szerint: „Nem elég, ha csodáljuk a tudományt vagy félünk tőle. Korunk legnagyobb feladata a tudomány emberivé tétele, vagyis felgyorsítani azt a folyamatot, mely szervesen részévé teszi az emberi életnek és kultúrának."

Nézetem szerint ez jellemzi a gyakorlati irányú természettudományi oktatás célkitűzését.

A másik szó (felelősség) ma gyakran felelősségérzetet jelent, melyet a többi ember iránti aggodalom, törődés vált ki bennünk. Világos a kapcsolat az együttérzéssel olyan értelemben, ahogy a szót Weisskopf használta. Az ökológusok és a környezettel foglalkozók észrevették velünk, hogy a Föld és tartalékai végesek. Nem lesz kielégítő életterünk, ha tovább folyik a rendelkezésünkre álló energia és természeti kincsek felelőtlen pazarlása. Ez az aggodalom az oka annak, hogy az ICSU erősen érdeklődik a környezetismeretre kiterjedő tanítás iránt.

Íly módon természetes, hogy a tudósok és pedagógusok szükségét érezték új tantervek és tanítási módszerek bevezetésének.

3. *Integrált természettudomány*

Az ICSU és az UNESCO erősen érdekelve van ebben az irányzatban. Mint talán tudják is, az UNESCO természettudományok tanításával foglalkozó osztálya súlyt helyez az alapvető természettudományok tanítására a fejlődő országokban, és tanítási kísérleteket indított el középfokon 1963-ban Latin-Amerikában fizikából, 1965-ben Ázsiában kémiából, 1967-ben Afrikában biológiából és 1969-ben az arab államokban matematikából. New Trends (Új irányzatok) címmel kiadványok készültek mindegyik tárgyból, számítva az ICSU oktatási bizottságának aktív támogatására a végrehajtásban. Így pl. a kémia program ma is állandó tanácsot és segítséget kap az IUPAC oktatási bizottságától.

E tevékenység közben az UNESCO arra a meggyőződésre jutott, hogy a fejlődő országokban a természettudományok tanítása terén alapvetően fontos lenne a segítség az általános iskolai szinten is. Egyes területeken — pl. Afrikában — kevés gyermek jut tovább az általános iskolánál. Így amit tanítani akarunk a természettudomány tényanyagából, szellemében és módszereiből, azt az általános iskolában kell közölnünk. A tananyag megválasztásában a legnagyobb gonddal kell eljárnunk, hogy az valóban a gyermekek segítségére legyen olyan területeken, mint pl. a táplálkozás, betegségek. Beléjük kell plántálni a tudatot, hogy a természet jelenségei meghatározott törvények szerint zajlanak le, megismerhetők és irányíthatók.

Elemi fokon nincs értelme az egyes tárgyak elválasztásának. Pedagógiailag indokolható és sokkal természetesebb, ha úgy tanítunk, hogy kivisszük a gyerekeket a természetbe, ahol megfigyelnek, jegyeznek, méréseket végeznek, majd ésszerű magyarázatot keresnek a megfigyeltekre. A világot nem bontják fel fizikára, biológiára és kémiára. A matematikát is kezdeti fokon eszköznek lehet tekinteni.

A közelítésnek ezt a módját nevezzük ma integrált természettudománynak. Az UNESCO kezdett előbb foglalkozni az integrált természettudományos oktatással, majd az ICSU időközben megalakult természettudományok tanításával foglalkozó bizottságához fordult segítségért.

Ennek a bizottságnak és az UNESCO természettudományok tanításával foglalkozó osztályának együttműködése egész sereg eredményt mutatott fel az integrált oktatás terén. 1973-ban második ICSU—UNESCO konferenciát tartottak az integrált természettudományi oktatásról Maryland-ben, — az elsőt Bulgáriában rendezték 1960-ban. A jelenlegi ICSU bizottság ebben erősen érdekelve volt. Ezúttal a tanárok megfelelő képzésére helyezték a hangsúlyt, 63 különböző országból több mint 200 résztvevő jelent meg és ismertette az elmúlt évek tapasztalatait.

Megjegyezhetjük, hogy az integrált tanításra még két konferencia után sem alakult ki pontos definíció. A közvélemény szerint az integrált természettudományos oktatás „olyan eljárásokat jelent, melyek kifejezik a

természettudományos módszer egységét és elkerülik a korai szétválasztást egyes diszciplínákra".

Az UNESCO az ICSU segítségével azóta igen élénk munkát fejtett ki világszerte megfelelő központok kialakítására. 3 kötetet adott ki a New Trends sorozatban az integrált oktatásról, az utolsó ezek között a marylandi konferencia anyaga. 1972-ben már 96 integrált program szerint tanítottak a világon, ebből 65 az Egyesült Államokra esik és 31 a többi országra. A legtöbb az általános iskolai szinten mozog, de a gondolat átterjedt középiskolai vonalra, sőt néhány esetben az egyetemi szintre is.

Az egyetemi szintű integrált oktatás főként olyan tanulók esetében hasznosítható, akik a továbbiakban nem foglalkoznak természettudománnyal. Legjobb példa erre az Open University of Great Britain (Szabad Egyetem) Science Foundation Course (alapvető természettudomány) elnevezésű tanfolyama. Ezen a tanfolyamon fizika, kémia, biológia, matematika és földtudomány fogalmak összefonódva kerülnek tárgyalásra, különös figyelemmel társadalmi fontosságukra és hasznukra. 1974-ben 47 000-en jelentkeztek az 1975-ös tanfolyamra. A felvehető létszám 12—15 000. Az egyetem teljes kapacitása 50 000. Lényeges hányad választja az integrált természettudományt.

4. *Állandó intézmények létesítése a természettudományok tanításának folyamatos megjavítására*

Az említett tantervreformok a nyugati országokban kormányok által támogatott nagy tervekkel kezdődtek, sok időt, pénzt és munkát jelentettek, és számos tudós közreműködését. Úgy gondolták, hogy nagyméretű akcióval új életet öntenek a természettudományok oktatásába. Menet közben azonban mindenütt észrevették, hogy a tantervváltoztatásnak nincs vége, állandó, megszakítás nélküli és hosszú távra tervezett aktivitásnak kell lennie. Így a szakemberek és a pedagógusok szükségét érezték olyan állandó intézményeknek, melyek hivatásszerűen foglalkoznak a folytonos, „gördülő" reformmal.

E tekintetben a kelet-európai országok előbbre voltak, mert már korábban létesítettek ilyen célra állandó intézményeket. Meglátogattam Moszkvában a Pedagógiai Tudományok Akadémiáját, láttam, hogy a folyamatos kutató—fejlesztő munkáért, valamint a modernizálási kísérletekért, új szemléltetőeszközökért egyes osztályok felelősek, a végrehajtást pedig rábízzák országszerte a pedagógiai intézetekre. Azt hiszem, hogy a Pedagógiai Tudományok Akadémiája és a Pedagógiai Intézetek a nyugati egyéni törekvésekkel egyidejűleg foglalkoztak olyan problémákkal, mint a computer felhasználása a tanításban, programozott oktatás, oktatógépek, audiovizuális eszközök stb.

Az a helyzet, hogy a Pedagógiai Tudományok Akadémiája mint állandó intézmény, olyan stabilitást és lehetőséget ad távlati tervek készítésére, amilyenre csak most kerül sor természettudományi oktató központok létesítése útján a nyugati világban.

Sajnos eddig nem alakult kielégítő mértékű kapcsolat a gondolatok kicserélésére a természettudományok tanítása terén a kelet-európai országok és a világ többi része között. Az UNESCO és az ICSU e munkája ebben az irányban nem volt elegendő. Itt az ideje, hogy erősítsük az eszmék és tapasztalatok cseréjét a világ összes országai javára.

A fejezet további részében ismertetek olyan centrumokat, amelyek Kelet-Európán kívül alakultak, többnyire speciális tervekkel kísérletező országokban.

Így pl. az UNESCO a kezdeti tervek alapján szerzett tapasztalatok után támogatásban részesítette nemzeti központok szervezését a természettudományok tanításának megjavítására. Az UNESCO-nak ugyan nincs pénze akár egyetlen ilyen központ támogatására sem, de van a United Nations Development Programme-nak (UNDP = Egyesült Nemzetek Fejlesztési Programja), és ez a szerv valóban lelkesedik olyan intézmények létesítéséért, amelyek a társadalmi és gazdasági fejlődést szolgálják. Az UNESCO bármely tagállama folyamodhat az UNDP-hez segítségért ilyen terv megvalósításához. A valóságban az érdekelt ország az UNESCO-hoz fordul segítségért, előterjesztve javaslatát az UNDP-hez. Ha az anyagi támogatást megkapja, akkor azt az UNESCO kezeli, mint a Nemzetek Szövetségének illetékes szerve a természettudományok oktatásának területén.

Ilyen nemzeti központok alakultak Izraelben és Thaiföldön. Segítséget kért az UNESCO-tól Brazília és Venezuela. Körülbelül három év szükséges olyan terv kidolgozásához, mely elnyerheti az UNDP jóváhagyását. Igenlő esetben a segítség egymillió dollár körül mozog, melyhez ugyanolyan vagy nagyobb összeggel járul hozzá az érdekelt ország.

Az Egyesült Államokban több központ létesült UNDP támogatás nélkül. Ezek közül kiemelkedik Kaliforniában a Berkeley Egyetemen a Lawrence Hall of Science. Évi költségvetése kétmillió dollár felett van.

A keleti parton működik a Maryland Egyetem Természettudományi Oktató Centruma. Több más mellett különösen részletesen foglalkozott a természettudományos oktatás nemzetközi előmozdításával azáltal, hogy olcsó laboratóriumi eszközök előállításához adott ki könyveket, továbbá támogatta az ICSU és az UNESCO munkáját, segítve egy nemzetközi konferencia rendezését az integrált tanításról.

Röviden megemlítek még néhány centrumot, nem annyira fontosságuk szerint, hanem azért, mert alkalmam volt azokat meglátogatnom vagy vezetőikkel együtt dolgoznom. Itt van pl. Angliában a Chelsea Collegeben működő Centre for Science Education, vezetője K. W. Keohane. A Nuffield Project erre az intézetre támaszkodik munkájában. Németországban a kieli egyetemen működik az Institut für Pedagogik. Igazgatója volt hosszú éven át a fizikus Karl Hecht. A Fülöpszigeteken Dolorez Hernandez vezeti a Science Education Center-t. Japánban egy egész hálózata van a természettudományos oktatás fejlesztését célzó centrumoknak.

Itt csak néhány példát soroltam fel, a teljességről szó sem lehet. Ennyi talán elegendő az ilyen irányú fejlődés bemutatására.

5. *Az oktatási technológia felhasználása a természettudományok tanításának eredményesebbé tételére*

Az általános cél nyilván az, hogy eredményesebb tanulást biztosítsunk minél több ember számára. Hogyan lehet ezt elérni? Világos, hogy az oktatás rendszerét, melyben az „input" a tanár, az „output" a sokoldalú, tanult ember, jobb hatásfokúvá kell tenni.

A hatásfok szónak műszaki, technológiai íze is van. Túlságosan gépszerűen hangzik ahhoz, hogy egy olyan emberi tevékenységre alkalmazzuk, amilyen az oktatás. De amíg nem tudjuk megmérni az oktatási eljárás hatásfokát, addig nem mondhatjuk meg, mennyit sikerült rajta javítanunk.

Az az elképzelés, hogy valamely eljárás hatásfokát méréssel akarjuk meghatározni, emlékeztet az operációkutatásra és a rendszeranalízisre. Valóban, ezeket a diszciplínákat alkalmazzuk az oktatásban is oktatási technológia név alatt.

Amikor fokozatosan rájövünk arra, hogy a tanítás sikeres voltának a tanulás eredménye a mértéke, egyúttal világossá válik az is, hogy olyan új tanítási—tanulási stratégiát kell kialakítani, mely a teljesítmény lemérését is lehetővé teszi.

Nevelési technológiának a hozzáállás, a módszer, a tanítási eszközök komplex alkalmazását szokás nevezni. Nem pedig egyszerűen az oktatásban használatos technikai segédeszközök halmazát — ezek ugyanis csak példák az oktatást szolgáló technológiára. Mielőttünk az oktatás technológiája áll, vagyis az a hozzáállás és a módszer, amely az eszközökkel együtt a jobb tanulást teszi lehetővé.

A régi technológia olyan feltevéseken alapult, melyek ma már nem helytállóak. Abból indult ki, hogy a tanár fő feladata az információ közlése. Ehhez „hardware"-ként a tábla, a kréta, a tankönyv, a tanuló jegyzete és

ceruzája, az elemi iskolában esetleg a tanító vonalzója vagy pálcája tartozott. Ha a tanuló nem tanult, akkor az nyilván az ő hibája volt. Csak ritkán gondoltak arra, hogy a tanár vagy a rendszer is hibás lehet.

A modern oktatási technológia szerint nem a „hardware" a fontos — bár hozzá most a tévé, vetítő, film, kazetta, magnó, video és egy sor oktatógép is tartozik. Ezek egyszerűen az oktatáshoz használt eszközök. A legfontosabb gondolat az, hogy felismertük: a tanítás legfontosabb célja a tanuló munkája, *a tanulás*. Az oktatási technológia magában foglalja a tanítás—tanulás stratégiáit, melyeknek közös vonásai a következők:

(a) Először megjelöli, hogy a tanuló mit tudjon *tenni* a végén, amire nem volt képes kezdetben. Más szóval a viselkedéselméleti célt előre meghatározza.

(b) Felhasználja, a tanuláselmélet összes tényeit és tényezőit; a módszerek, a technika és az eszközök jól megválasztott kombinációját, ezáltal optimális lehetőséget nyújtva a tanulásra. A bizonyíték arra, hogy a tanuló elsajátította az anyagot az, hogy meg tudja *tenni*, amit elvárnak tőle.

(c) A végén ellenőrzés következik, mely megállapítja, hogy a tanuló milyen mértékben felel meg a tőle várt követelménynek.

Az oktatási technológiát alkalmazó tanártól tehát elvárják, hogy a legalkalmasabb módon tudja megválasztani a módszert, eszközöket és ezekkel maximálisan kedvező feltételeket létesít a tanuláshoz.

Ünnepélyesebb kifejezésekkel: az oktatási technológia „bővíti és javítja az emberi tanítás és tanulás feltételeit eszközök és módszerek létesítésével és szervezett alkalmazásával".

Ma a tanítás—tanulási folyamat segítéséhez a „hardware" impozáns tömege áll rendelkezésre a megfelelő „software"-rel együtt.

(Amerikai oktatási körökben a hardware és a software a megvásárolható oktatási eszközöket jelöli.)

Sokan ezután azt hiszik, hogy ez elegendő is, és a modern tanítás csak új eszközök bevetéséből áll. Ha azonban a problémát magasabb szempontból nézzük, akkor rájövünk, hogy ezek csak segédeszközök, melyekkel az oktatás feladatának csak csekély része végezhető el. Befejezésül ismétlem: a „hardware" és a „software" az oktatási technológiánk egy része, de nagyon tévedünk, ha azt hisszük, hogy ezek alkotják egyedül azt a rendszert, amit oktatási technológiának nevezünk.

*

(Kísérlet: állóhullámokat hozunk létre egy alumínium rúdban. Kalapáccsal megütjük és hosszirányban végig simítjuk kézzel.)

Filmet ígértem az állóhullámokról. A film az állóhullámokról szól, illusztrálja azt a módot, ahogy egy filmet a tanításnál felhasználhatunk. A film elkészítésénél mint tanácsadó működtem közre.

Mielőtt a filmet vetítenénk, mutatok még egy kísérletet. Állóhullámok egy fém rúdban. A hullámot nem látjuk, de hangot hallunk. A rudat rezgésben hozom úgy, hogy középütt fogom, és az egyik végén gyantázott kesztyűvel dörzsölöm. Nem látjuk a duzzadási helyet a végeken. Mivel azonban a rudat középen fogom, ott csomópontnak kell lennie. Ugyanaz az eset, mint amit a vonalzónál már láttunk: egy csomópont két duzzadási hely között. A zümmögőre is ez vonatkozott, bár nem bizonyítottam.

A végén kalapáccsal megütve, a rúd két különböző hangot ad. Az egyik magasabb, a másik alacsonyabb. Azt állítom, hogy az egyiket transzverzális, a másikat longitudinális rezgés okozza. Bizonyítékul végighúzom az ujjamat a rúdon: az alacsonyabb hangot letöröltem. Ez lehetett a transzverzális rezgés. Marad a longitudinális rezgés, a magasabb hang.

*

(Film: Állóhullámok és a szuperpozíció elve. Encyclopedia Britannica Educational Corporation. Száma: 3035 Színes, 3036 B & W.)

*

Befejezésül szeretnék röviden még három ICSU tevékenységet említeni.

Az UNESCO-val együttműködve támogattunk egy értekezletet az oktatási technológiáról és annak felhasználásáról a természettudományok tanításánál 1972-ben Párizsban. A területnek 20 szakértője jött össze és számolt be tapasztalatairól. Rendelkezésünkre állt egy 400-nál több tételből álló bibliográfia, melyet az UNESCO állított össze. A találkozó jelentése rövidesen nyomtatásban is megjelenik az UNESCO kiadásában.

A marylandi konferencia után a Bizottság az UNESCO val karöltve részt vett az első olyan nemzetközi konferencia rendezésében, amelyre a természettudományok tanárainak egyesületei küldték el képviselőiket a világ minden tájáról. Megalakult a Federation Internationale des Associations de Professeurs des Sciences (FIAPS — angolul ICASE = International Council of Associations for Science Education), mely célkitűzése szerint nemzeti és körzeti csoportok aktivitásáról gyűjt és közvetít információt tanáregyesületek körzeti konferenciáit rendezi, folyóiratot ad ki és a természettudományok tanításának javítását előmozdítja a tanáregyesületeken keresztül.

A Bizottság magasabb szinten rendezett egy kisebb szemináriumot: „Koordináció, integrálás és a diszciplínák szétválasztása egyetemi szinten". A Bizottság tagjai, a meghívott előadók fejtették ki egyesületeik nézetét.

A jövőben a Bizottság tervezi a marylandi konferencia folytatását egy szeminárium formájában, amely az integrált oktatással foglalkozik. Ez valószínűleg 1975 végén vagy 1976 elején lesz a FIAPS védnöksége alatt a tanáregyesületek szövetségének közgyűlésén.

Tervezzük a természettudományok oktatásának javítását egyetemi szinten talán egy tanári kézikönyv kiadásával.

Továbbá — és számomra ez egy különösen érdekes terület — vita indul meg a COSTED, a SCOPE és az ICSU-n kívüli szervezetek bevonásával természeti kincsek és környezet tanulmányozásának integráló tényezőként való felhasználására az oktatásban, különös tekintettel a fejlődő országokra.

Befejezésül: vezérfonálként hangsúlyoztam az érdeklődés és az együttérzés fontosságát a hetvenes évek természettudományos oktatásában. A másik két „C" (alkotókészség és hozzáértés) éppen olyan fontos, de időhiány miatt most nem tudok velük foglalkozni. Nyugodtak lehetnek, hogy a Bizottság további munkájában szerepelni fognak.

EGYSZERŰ MÓDSZER A BOLTZMANN-ÁLLANDÓ KÖZVETETT MEGHATÁROZÁSÁRA

Szabó József, Sztaricskai Tibor
KLTE Kísérleti Fizikai Tanszék, Debrecen

Bevezetés

A fizika fundamentális állandóinak meghatározására irányuló vizsgálatok egyidősek a kísérleti fizikával. Ezen állandók közül is kivételes szerepe van a Boltzmann-állandónak, hiszen ez kapcsolja össze a fizikai jelenségek makro- és mikrofizikai leírását. A Boltzmann-állandó közvetlen meghatározására szolgáló módszerek száma igen kevés és azok kivitelezése sem egyszerű. Ilyenközvetlen mérési módszerek:

1. Folyadékban lebegő, mikroszkoppal megfigyelhető kollodális részecskék magasság szerinti eloszlásának (a szedimentációs egyensúlynak) a vizsgálata.
2. Brown-mozgás vizsgálata.
3. Az elektromos áram mikroszkópikus vizsgálata (zajmérés ideális négypólussal).

A közvetett mérési eljárások révén a Boltzmann-állandó (k) lényegesen egyszerűbben határozható meg. Egy ilyen közvetett eljárásra ad lehetőséget az e/k meghatározása.

A mérés elve

A mérési módszer [1] azon alapul, hogy földelt bázisú üzemmódban működtetett tranzisztor esetén a rövidzárási kollektoráram (I_C) és az emitter-bázis feszültség (V_{EB}) között igen széles áramtartományban exponenciális kapcsolat van az

$$I_C = I_0 e^{\frac{eV_{EB}}{ekT}} \qquad (1)$$

összefüggés szerint, ahol e az elemi töltés, T a hőmérséklet. Féllogaritmikus papíron ábrázolva az I_C-t a V_{EB} függvényében, a kapott egyenes iránytangense az e/kT mennyiséget adja. Ha a hőmérséklet ismert, az e/k meghatározható.

Bár a diódák nyitó irányú karakterisztikájának leírására is az (1) egyenlethez hasonló egyenlet szolgál [2], a valóságban a diffúzión kívüli effektusok a mérést pontatlanná teszik. Egy valós p-n átmenetben az elektromos vezetés a következő mechanizmusok révén jön létre:

a) diffúziós áram
b) rekombinációs, elektron-lyuk pár keltési áram a kiürítési tartományban
c) felületi áramok.

A teljes áramnak a fent említett mindhárom komponense különböző módon függ az átmenet feszültségétől. Az elmélet szerint a diffúziós áram az $\exp(eV/kT)$ mennyiséggel, míg a rekombinációs, elektron-lyuk pár keltési áram az $\exp(eV/2kT)$ mennyiséggel arányos a nyitó irányban előfeszített átmenetnél. A különböző felületi áramok által létrehozott áram az $\exp(eV/mkT)$-vel arányos, ahol $m > 2$. Diódák esetén mindhárom áram létrejön és az áram-feszültség karakterisztika az

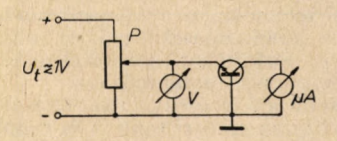
$$I_C = I_0 e^{\frac{eV}{m^* kT}} \qquad (2)$$

összefüggés szerint adható meg, ahol m^* értékét kísérleti úton kell meghatározni. Mivel az m^* nem ismert a priori, a diódák nem alkalmasak az e/k meghatározására [3].

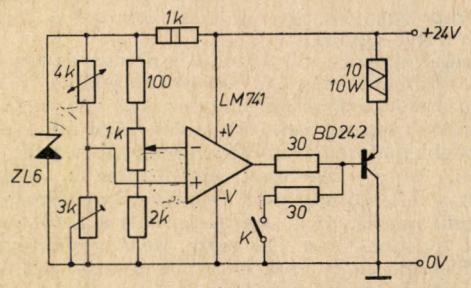
A földelt bázisú tranzisztor kapcsolás esetén a kollektor áram elsősorban azon töltéshordozók hatására jön létre, melyek diffúzió útján az emitter-bázis átmenetből a kollektor tartományba injektálódnak. Ilyen módon a fenti 3 komponens közül elsősorban csak a diffúziós áram hatása érvényesül és a teljes kollektor áramnak a V_{EB}-től való függését az (1) összefüggés adja. Igen sok szilícium tranzisztor esetén az említett összefüggés 1% pontosságig érvényes, miközben a kollektor áram akár 6 nagyságrenddel változik. Ez különösen a modern planár epitaxiális felépítésű tranzisztorok esetén érvényes. Így a planár tranzisztorok alkalmasak az e/kT mennyiség és így a hőmérséklet és az elemi töltés ismeretében a Boltzmann-állandó meghatározására.

Kísérleti elrendezés

A méréshez 2N2219A típusú, npn szilícium planár epitaxiális tranzisztort használtunk. Ezen tranzisztor használata azért előnyös, mert felépítése biztosítja a félvezető átmenetek és a tranzisztoros fémtok közötti termikus csatolást. Kis kollektor áram esetén (< 5 mA) a tranzisztor tok és az emitter-bázis vagy kollektor-bázis átmenet réteghőmérséklete alig tér el egymástól. Így a termosztátba helyezéskor a tranzisztor átmeneteinek hőmérséklete megegyezik a termosztát által beállított hőmérséklettel. Az e/k meghatározáshoz a tranzisztort az 1. ábra szerinti kapcsolásban használtuk.



1. ábra Földelt bázisú kapcsolás az e/k meghatározáshoz



2. ábra Az elektronikus termosztát kapcsolási rajza

A különböző hőmérsékletek beállítására termosztátokat alkalmaztunk. Az egyik termosztát a kereskedelmi forgalomban kapható MINISTAT (típusszám: 607) volt. A tranzisztort egy 2 cm átmérőjű, 12 cm hosszú olajjal megtöltött rézhengerbe tettük. A vízfürdőbe helyezett rézhenger közvetlen közelébe helyeztük el az ellenőrző hőmérőt. A vízfürdő hőmérsékletét $\pm$ 0,05 °C pontossággal lehet stabilizálni. Annak érdekében, hogy a tranzisztor hőmérséklete megegyezzen az ellenőrző hőmérőn mérttel, a mérések előtt kb. 15 percig vártunk. (A gyors hőátadás érdekében célszerű a hengert jó hővezető anyagból készíttetni.)

A drága termosztát helyettesítésére egy egyszerű elektronikus mikrotermosztátot is építettünk. A termosztát konstans hőmérsékletű térfogatát egy 2 × 2 × 1 cm-es réztuskó valósítja meg, melyet a BD 242 típusú teljesítmény tranzisztor fűt. A termosztát kapcsolási rajza a 2. ábrán látható. A réztuskó két oldalára a fűtőtranzisztort és a 4 kΩ-os termisztort szigetelve, de a hővezetést biztosító berilliumoxidos szilikon pasztával szereltük fel. A tuskó hőmérsékletének változását a termisztor ellenállásváltozással érzékeli és ez a ZL6 Zener diódával táplált híd felborulásához vezet. Ha a tuskó lehül, a termisztor ellenállása megnő és az LM 741 műveleti erősítő kimenetén a feszültség negatívabb lesz. Ez a negatív feszültség a BD 242 tranzisztort jobban kinyitja, melynek eredményeként mind ez utóbbi, mind a tuskó hőmérséklete emelkedni fog. A termisztor ellenállása csökken és a híd kiegyenlítődik. A 3 kΩ-os beállító potenciométerrel a mikrotermosztát termosztálási

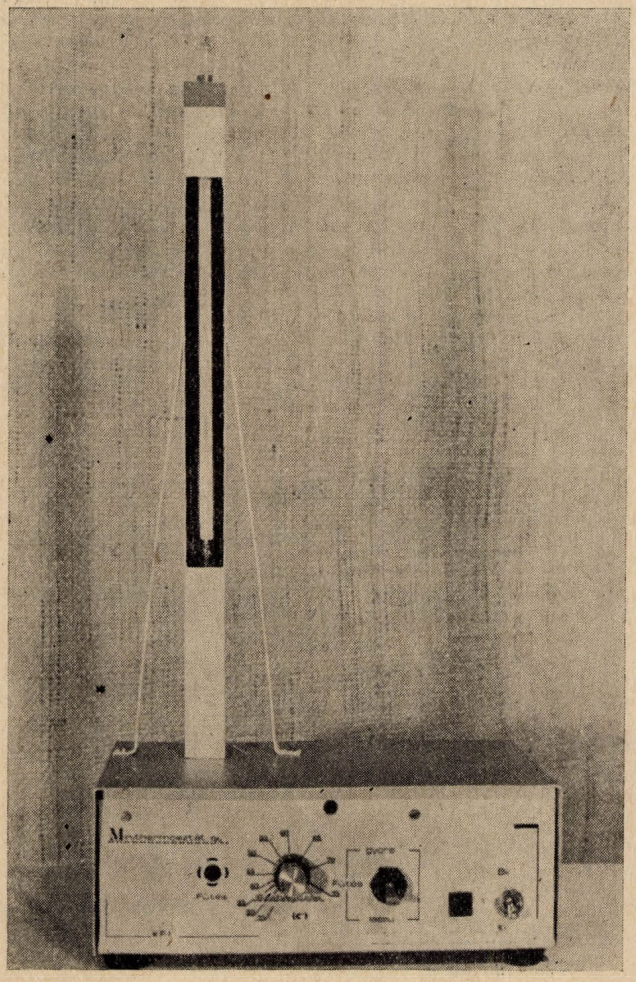
hőmérséklet tartományát + 25° és + 75°C közötti értékre állítottuk be. A termosztát hőmérsékletét a fenti két határ között, kívánság szerint, az 1 kΩ-os potenciométerrel lehet beállítani. A tuskóban helyeztük el a vizsgált tranzisztort (2N 2219A), valamint egy — a készülék dobozából kiálló — hőmérőt. A jó hőkontaktust a már említett pasztával biztosítottuk. A termosztátot egyszerű kétoldalas egyenirányító-pufferkondenzátoros tápegység táplálja. A kívánt hőmérséklet néhány perc alatt áll be. A felfűtést meg is lehet gyorsítani oly módon, hogy a BD 242 bázisát a K kapcsolón és egy 30Ω-os ellenálláson keresztül összekötjük a kollektorral. A fűtést tényét a 10Ω-os ellenállással párhuzamosan kapcsolt fényemittáló dióda jelzi. A megépített termosztát a 3. ábrán látható.

Eredmények

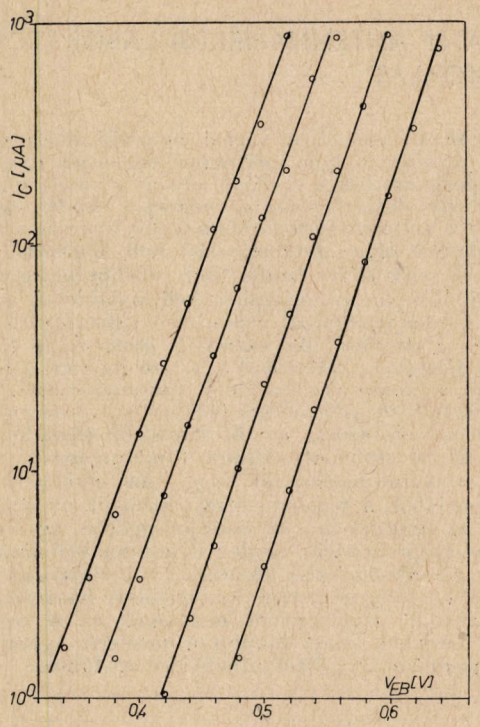
Az e/k értékét 4 különböző hőmérsékleten határoztuk meg. A V_{EB} mérésére UNIVEKA, az I_C mérésére UNI-10 típusú mérőműszerek szolgáltak. Annak érdekében, hogy a tranzisztor átmeneteinek hőmérséklete ne térjen el a termosztát hőmérsékletétől, a tranzisztor által disszipált teljesítményt ajánlatos 1—2 mW alatt tartani. Ez úgy érhető el, ha a szilícium tranzisztorok esetén a kollektor áram nem haladja meg a 2—3 mA-t. A mérési adatokhoz a legkisebb négyzetek módszerével illesztett $I_C = f(V_{EB})$ függvények a 4. ábrán láthatók. Az e/k értékek az (1) egyenlet egyszerű átalakításával az

$$\frac{e}{k} = 2{,}302\, T \cdot \frac{\triangle lg\, I}{\triangle V_{EB}} \qquad (3)$$

összefüggés alapján határozhatók meg. A (3) szerint számított e/k értékeket az I. táblázatban foglaljuk össze.



3. ábra Az elektronikus termosztát



4. ábra Az $I_C = f(V_{EB})$ függvények 4 különböző hőmérsékleten

1. táblázat

Hőmérséklet [K]	e/k [K/V]	
293,5	(1,1194 ± 0,0158).	10^4
309	(1,1641 ± 0,0143).	10^4
328	(1,1550 ± 0,0241).	10^4
344	(1,1690 ± 0,0191).	10^4

A különböző hőmérsékleteken mért e/k értékek súlyozott átlagára $e/k = (1{,}1505 \pm 0{,}0104).\ 10^4$ K/V adódik.

Az elemi töltés irodalmi értékének felhasználásával ($e = (1{,}6021917 \pm 0{,}0000070).\ 10^{-19}$ C) [4] a Boltzmann-állandóra

$$k = (1{,}3926 \pm 0{,}0125).\ 10^{-23}\ J/K$$

adódik, ami igen jó egyezésben van az irodalmi $k = (1{,}380622 \pm 0{,}000059).\ 10^{-23}\ J/K$ értékkel [4].

A szerzők köszönetüket fejzik ki Dr. Várnagy Mihály és Karácsonyi György kollégáknak hasznos közreműködésükért.

IRODALOM

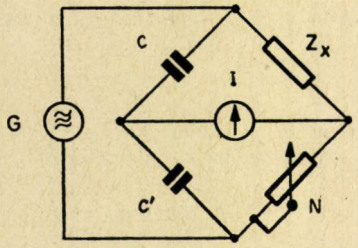
1. F. W. Inman, C. E. Miller: Am. J. Phys. 41, 349 (1973)
2. J. N. Shive: A félvezetők fizikája. Műszaki Könyvkiadó, Bp. 1963.
3. K. V. Salimovoj: Praktikum po poluprovadnyikam i poluprovadnyikovüm priboram. Vüszsaja Skola, Moszkva 1968.
4. B. N. Taylor: Rev. Mod. Phys. 41, 375 (1969).

NÉHÁNY ANTENNAMÉRÉSI LABORATÓRIUMI GYAKORLAT

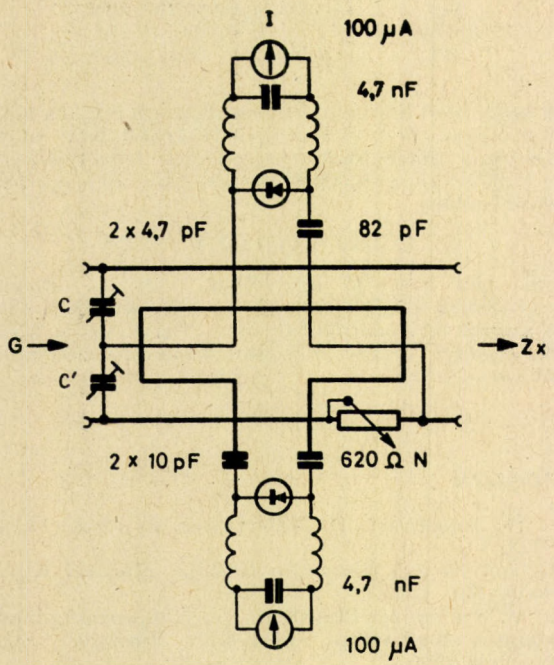
László Tihamér—Lázár György
Babes-Bolyai Tudományegyetem Cluj-Napoca
Elektromosságtan-elektronika Tanszék

Antennák mérésénél a végcél műszaki alkalmasságuk meghatározása: milyen mértékben valósítják meg a forrással gerjesztett és a nyelővel elvont vezetett hullámok és az átvívő közegben szabadon terjedő hullámok illesztését. Az antenna térfogatában vagy közvetlen közelében *adás*kor olyan árameloszlást kell létesíteni, amely sugárzási teret képes fenntartani, *vétel*kor pedig a fennálló térből olyan árameloszlást kell kialakítani, amely a térből kivont energiával valamilyen jelfeldolgozó készüléket működtethet. Az *antennák geometriája* (mérete, alakja, felépítése, telepítése) kötelező módon: a hullámhossztól, a közeg viselkedésétől (paramétereitől, polarizációjától), a terjedésmódtól (közvetlen, visszaverődéses, elhajlásos, szórásos), az üzemmódtól (haladó-, állóhullámú), a szolgálat céljától (hullámvezetés, műsorszórás, helymeghatározás) függ. Az *átviteli hatásfok* szempontjából: a rezonanciafrekvencia ill. az önhullámhossz, az impedancia, az irányjelleggörbe, az antennanyereség, a polarizáció, esetleg az antennabeli árameloszlás és a térerősség fázisa jelentős. Az alkalmazandó *mérőmódszerek*et főleg az üzemi frekvenciasáv határozza meg.

Didaktikai szempontból nem annyira a nagyfokú méréspontosság, mint inkább a mérések egyszerűsége és a problémakör áttekinthetősége a fontos.



1. ábra Változóáramú Schering-mérőhíd



2. ábra A mérőkészülék kapcsolási rajza

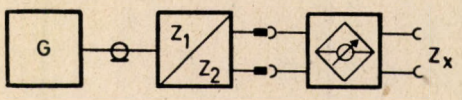
Önhullámhossz és impedancia meghatározása

Gyakorlatilag az *impedanciát* gerjesztett, adóüzemű antennán mérik. A méréseredmény azonban — a Rayleigh—Helmholtz—Carson reciprocitási elv értelmében — ugyanarra az antennára vevőüzemben is érvényes. Az antennára adott feszültséggel szemben mutatott Z impedancia R *rezisztív összetevője* a sugárzási és a veszteségi ellenállásból tevődik össze; utóbbi a nagyobb frekvenciák felé mindinkább veszít jelentőségéből. Kapacitív ill. induktív reaktáns összetevő jelenléte rezonancia hiányára mutat, arra, hogy a tápfrekvencia a rezonanciagörbe egyik vagy másik ágán, az önfrekvencia alatt ill. fölött van. Az X *reaktáns összetevő* csak a rezonanciagörbe csúcsán, a rezonanciapontban zérus. A rezonanciafrekvencián így az X reaktáns összetevő kiegyenlítése elkerülhető, a mérés pusztán az R rezisztív összetevő meghatározására egyszerűsödik le, ez adja meg az antenna $R = Z$ impedanciáját.

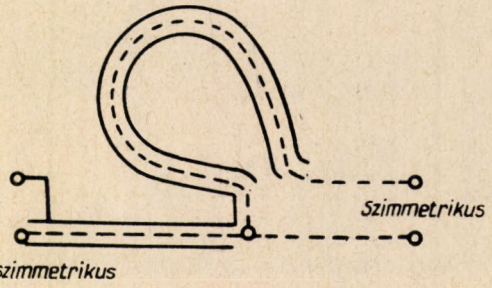
A *méréseket* a méteres hullámsávra ($f \approx 150$ MHz) méretezett antennákon célszerű végezni, mivel ezek geometriai mérete aránylag kicsiny és viszonylag sokféle változatuk van.

A *mérőkészülék* egy Schering-*mérőhíd*ból (1. ábra) és egy *rezonanciaindikátor*ból áll. A mérőhíd kiegyenlítésindikátora (a 2. ábra felső részén) és a rezonanciaindikátor (a 2. ábra alsó részén) közel azonos felépítésű. (Mérődiódaként bármely URH kristálydióda megfelelő). A G szignál*generátor* a mérőhíd kéthuzalos (Lecher) tápvonalán át táplálja a Z_x impedanciájú antennát és az N lineáris mérőellenállást (a 2. ábra középső részén). A rezonanciaindikátor induktíven csatlakozik ehhez a tápvezetékhez. Amennyiben a hidat tápláló G generátor aszimmetrikus kimenetű, kimenőkapcsai és a szimmetrikus bemenetű mérőhíd közé Z_1/Z_2 szimmetrizáló és impedancia*illesztő transzformátort* kell beiktatni (3. ábra). Erre megfelel a félhullámú ívvezeték, amelynél a szimmetrikus csatlakozás egyik pontját a generátor földeletlen kimenőkapcsa, másik pontját pedig az ugyanehhez a kapocshoz csatlakoztatott, félhullámhosszú, árnyékolóköpenyével a generátor földelt kapcsához kötött koaxiális kábeldarab ere képezi (4. ábra).

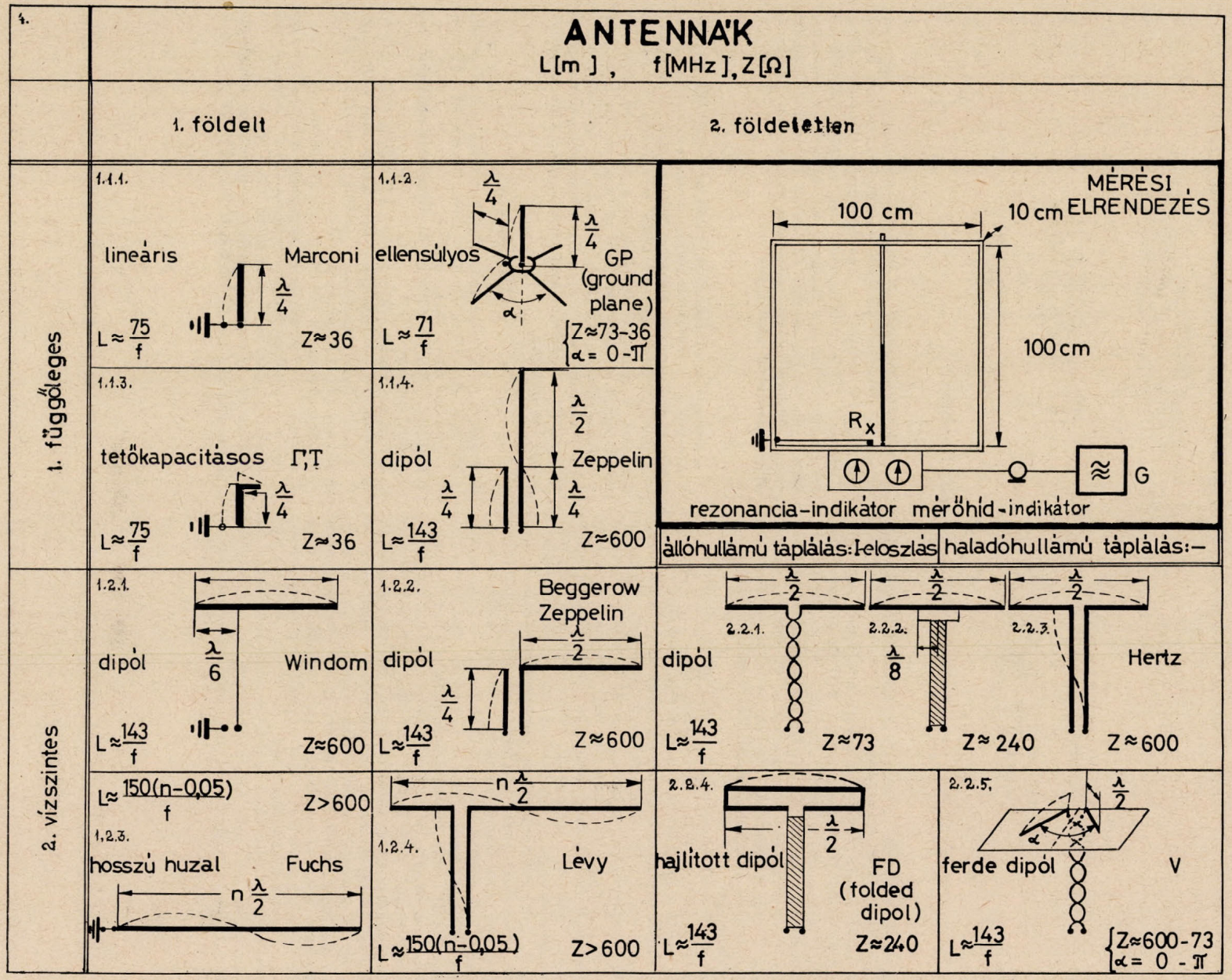
A mérőhíd a rezonanciaindikátorral együtt közös, földeletlen árnyékolódobozba építve, fakeret aljára van szerelve (az 5. ábrán a jobbra fennt bekeretezett *mérési elrendezés)*. A mérőhíd két bemenőkapcsa a keret alján



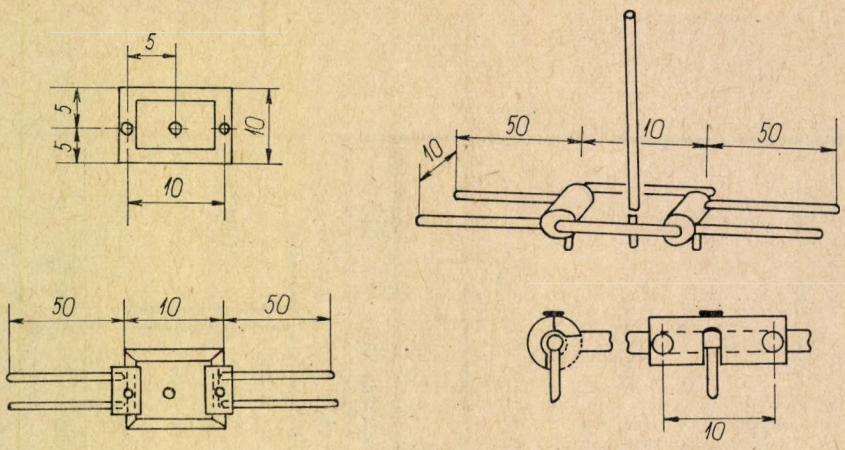
3. ábra Aszimmetrikus kimenetű generátor illesztése szimmetrikus bemenetű mérőhídhoz



4. ábra A félhullámú ívvezeték elrendezése



5. ábra Mérési elrendezés. A mérendő antennák felépítése és jellemző adatai



6. ábra Az ellensúly felépítése

van, egyik közülük — az antennatípusnak megfelelően — szükség szerint földelhető.

A *mérés menete* abban áll, hogy a mérendő antennát a mérőkészülékre csatlakoztatva, a G szignálgenerátor frekvenciáját addig változtatjuk, míg a rezonancia-indikátor *rezonanciát* jelez. Ekkor a generátorról leolvassuk az antenna f önfrekvenciáját és ebből kiszámítjuk a λ önhullámhosszát. Ezután a *hídkiegyenlítést* elvégezve, az N mérőellenállásról leolvassuk az antenna Z impedanciáját.

A *vizsgálandó antennák*at előregyártott elemekből a fakereten állítjuk össze. Az elemek $\lambda/4$ ill. $\lambda/2$ hosszúságú, egyik végükbe beforrasztott fém csatlakozódugókkal, másik végükön e dugóknak megfelelő oldalfuratokkal ellátott, kb. 10 mm átmérőjű rézcsövek. Vizsgálni lehet (5. ábra balra, és jobbra lennt): 1. *földelt* 1.1 *függőleges* és 1.2 *vízszintes*, valamint 2.2 *földeletlen vízszintes antennák*at. Az ábrázolt antennák mellett mindenütt fel van tüntetve elnevezésük, felépítésük, az f önfrekvenciájuknak megfelelő L hatásos hosszuk és Z impedanciájuk, valamint (szaggatott vonallal) az I árameloszlásuk. A keretre szerelt függőleges antennák talppontjaikkal, a vízszintes antennák pedig tápvezetékeikkel csatlakoznak a mérőhíd bemenőkapcsaihoz. — Igen tanulságos például a ferde dipól (2.2.5) és az ellensúlyos antenna (1.1.2) esetén megvizsgálni, hogy a két félhullámú dipól ill. a függőleges negyedhullámú sugárzó meg a 4 negyedhullámú tagból álló ellensúly közötti α hajlásszög (0-tól π-ig való) változtatásával miként változik az antenna Z impedanciája. (Az ellensúly célszerűen 10 cm oldalhosszúságú, rézcsövekből összeforrasztott négyzet alakú keret, amelynek két szemközti oldalára, rajta forgatható két vastagabb rézcsövet húzunk és az ezek két szélén készített furatokba, egymással párhuzamosan 2—2 negyedhullámhosszúságú rézcsövet forrasztunk. A vastagabb csövekbe szerelt szorítócsavarokkal az ellensúlyként szolgáló antennapárokat a vízszintestől lefelé, egészen a függőleges helyzetig tetszésszerinti α szögben rögzíthetjük. A függőleges antennát talppontjával, az ellensúlyt pedig a keretébe forrasztott csatlakozódugóval kötjük a mérőhíd kapcsaihoz) (6. ábra). Érdekes továbbá megfigyelni, hogy miként változik a Z antennaimpedancia a dipólnál, ha azt sodrott vezetéken (2.2.1) ill. szalagkábelen (2.2.2) át haladóhullámokkal, vagy félhullámhosszú kéthuzalos tápvonalon (2.2.3) át állóhullámokkal tápláljuk.

*

Minthogy az antennák képezik az összekötő kapcsot a vezetett és a szabadon terjedő hullámok között, a mérések is ezek tulajdonságaira vonatkoznak. A vizsgálat szempontjából *előnybe részesülő tulajdonságok* azonban nemcsak a hullámsávtól hanem a felhasználáskor előadódó egyébb szükségletektől is függnek. Számos, gyakorlatilag fontos vizsgálat, mint pl. az átviteli sávé, a jel/zaj viszonyé vagy a fadingcsökkentésé, azonban már túllépni az antennamérések technikájába való általános bevezetés határait.

IRODALOM

1. *Terman, F. E.—Pettit, J. M.*, Electronic measurements. McGraw-Hill Book Company, Inc., New York—Toronto—London 1952. 411—447 o.
2. *Guilbert, Ch.*, Technique de l'émission-réception sur ondes courtes. Éditions Radio, Paris 1959. 173—200, 242—253 o.
3. *Dohnal, F.*, Ausstrahlung von Kurz- und Ultrakurzwellen. Radio Amateur *14* (1937), 5. sz. 287—292. o.
4. *Király, A.*, Impedanciamérő. Rádiótechnika *12* (1962), 5. sz. 137—138. o.
5. *Hidvégi, T.*, Amatőr és TV sugárvető antennák és azok mérése. Rádiótechnika évkönyve 1970. Ifjúsági lapkiadó vállalat, Budapest 1970. 123—125. o.
6. *Richter, H.*, Ultrarövidhullámú és televíziós zsebkönyv. Műszaki könyvkiadó, Budapest 1958. 42—48, 51—64. o.

IZZÓSZÁLAK FÉNYKÉPE

Csekő Árpád
Budapest

Ha izzólámpák izzószálát jó objektívvel 5—15 m távolságban levő ernyőre élesen leképezzük, majd pedig oda tett fényérzékeny anyagon megörökítjük, akkor az így nyert képek sok információt adnak nemcsak az izzótest alakjára, méreteire, hanem annak sugárzására is. Ilyen módon készültek 1 : 3,5-es és 10,5 cm gyújtótávolságú Heliar-lencsével matt Bromofort nagyítópapírra egyszerű spirál izzószálról az 1., 2., 3. képek; duplaspirál izzószálról a 6. kép és spiralizálatlan izzószálról a 4. kép. Az 5. képen duplaspirál izzószálat síkfilmen örkítettünk meg, azért annak másolata az előbbiekkel ellentétben pozitív képen mutatja a jelenséget. Az 50—100-szoros nagyításokból a valóságos méretekre számításokat végezhetünk.

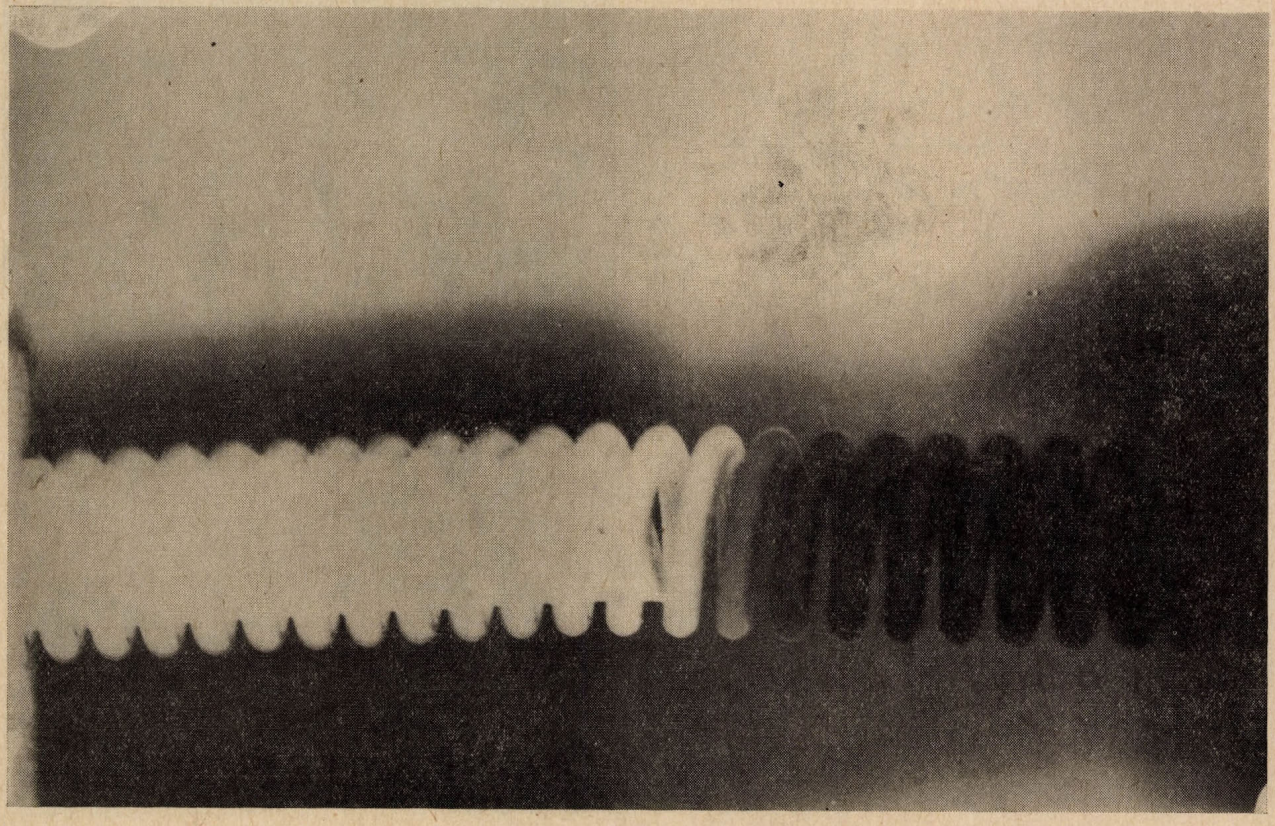
Érdekesebbek a sugárzásra vonható következtetések! A nagyítópapírokon csak a 600 nm-nél rövidebb hullámhosszúságú sugárzás létesít vegyi változást. Az orto — és pankromatikus filmek érzékenyítve vannak, tehát azokon a vörös színek is létesítenek vegyi változást. A hőmérsékleti sugárzók hullámhosszúság szerinti energiaeloszlásgörbéi megsejtetik, hogy a nagyítópapírok emulziójában a vörös izzású drótok vegyi változást nem indítanak meg, hanem az csak a fehér izzás fokozatos kialakulásakor következik be. Ugyanazon izzószál mentén annak hőmérséklete változása valami helyi hővezetés és hősugárzásbeli különbség révén állhat elő. Tehát hőmérsékletbeli változatosságot a bevezetéseknél, valamint a tartódrótok környékén remélhetünk. Éppen ezért ezeket fényképeztük.

Az 1. képen látható egyszerű wolfrámspirál bizonyára már a bevezető drót mellett is izzásban volt, de a bevezetődróton való hőelvezetés miatt nem alakult ki rajta olyan hőmérséklet, amelyik fotokémiai változást idézett volna elő. Azt látjuk, hogy a 15. spirálmenettől kezdve rohamosan következik be a magas izzású állapot. Bizonyára növelte a hőelvezetést a spirálban levő magdrót, amelyiknek vége a 13. és 14. menet között látható.

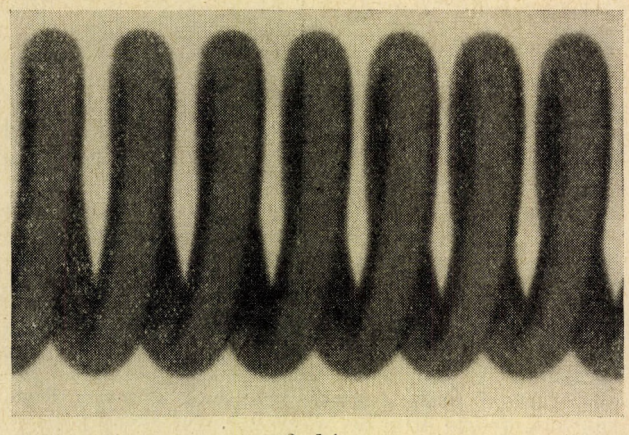
Szólni kell arról, miért tudjuk leszámlálni ezeket a meneteket, ha nem hagytak nyomot? Azért mert az izzólámpa üvegballonjáról visszaverődő, fotokémiai hatást is kifejtő másik sugárzás nem hatol át a spirálison, vagyis a spirális árnyéka került a fényérzékeny papírra.

Ha a képet jobban megnézzük, akkor ezen spirálmenetek oldalfalain visszaverődő sugárzást látunk. Ez a tapasztalat figyelmeztet arra, hogy a fényérzékeny anyag feketedését a saját sugárzás és a visszavert sugárzás eredőjének kell tekintenünk. A 15. menettől kezdve jól észlelhető saját sugárzás és annak a nyomából következtethető hőmérséklet egy-egy dróttekerületen sem azonos. A 2. képen még jobban lehet látni, hogy a drót külső felülete kevesebb feketedést létesített, mint a belső felülete. Legnagyobb feketedést viszont a menetek közötti felületek részesítenek. A belső részek egymásrasugárzása azokon a helyeken magasabb hőmérsékletet tart fenn. A visszavert sugárzás révén látjuk a magdrótvéget is.

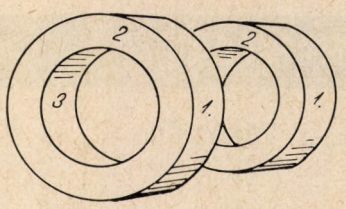
Vajon mi lehet az oka annak, hogy a drótmenetek külső felülete nem körkeresztmetszetűnek látszik, hanem mintha kívülről le volna lapítva. Miért alakulnak ki minden külső drótfelületen szinte azonos denzitású szürke foltokat létesítő sugárzási felületek? Ha denzitométerrel a spirál tengelye irányában végigmérnénk a 2. képet, akkor az 1. ábra a) grafikonját kapnánk. Pedig az 1. c) szerint gondolkozva az önálló sugárzás elméleti grafikonja



1. kép



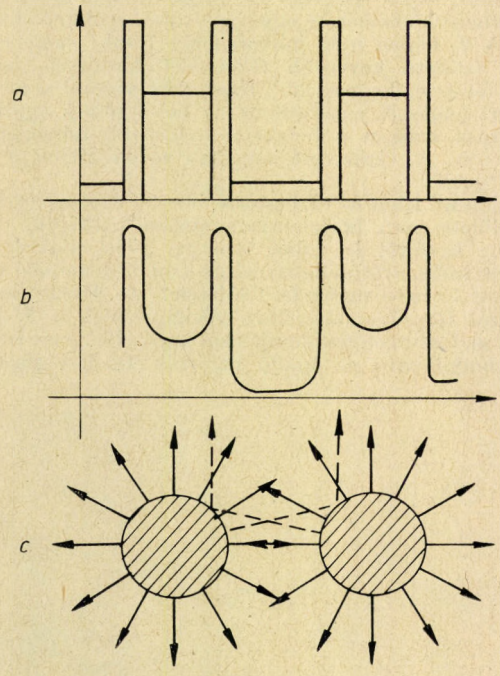
2. kép



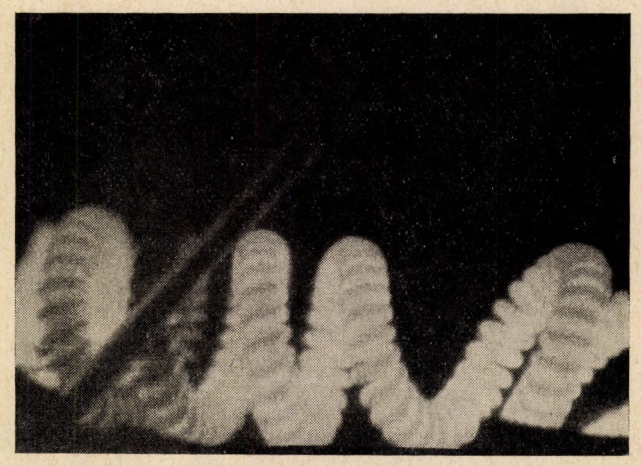
2. ábra



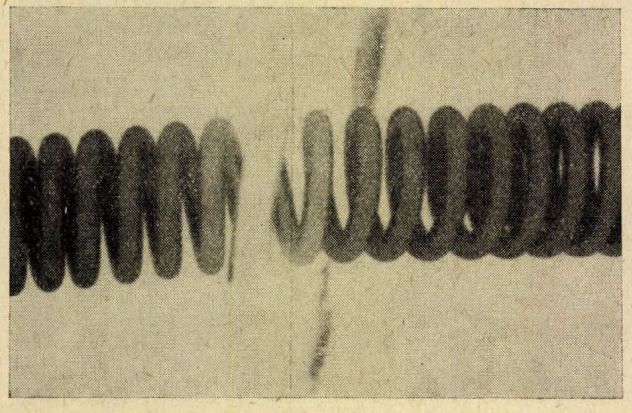
4. kép



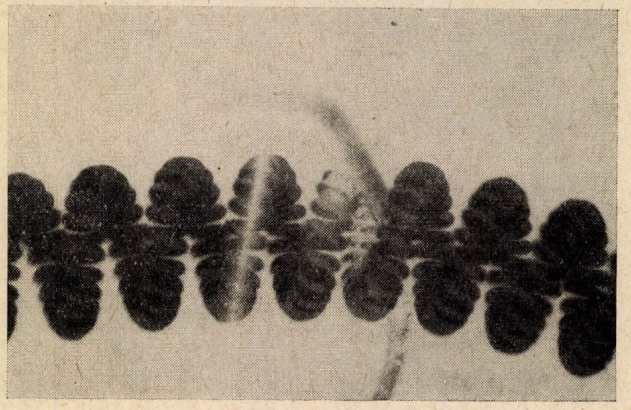
1. ábra



5. kép



3. kép



6. kép

az 1. b) lenne. Az önálló sugárzást talán az 1. c) vázlaton szaggatott vonallal bejelölt reflektált sugárzás egészíti ki úgy, hogy eredőül azonos denzitású foltokat létesítenek?

A 3—6. képeken egyaránt láthatjuk, hogy a tartódrót alatt az izzófelületek alacsonyabb hőmérsékletűek. Ennek oka az, hogy az alacsonyabb hőmérsékletű tartódrót elnyeli és elvezeti a hozzá legközelebb levő izzó drót által kisugárzott hőt, tehát alatta nagyobb a hőmérsékletesés, mint az izzóspirál egyéb helyein.

A tartódrót felmelegedése még azokon a helyeken sem vált a képek tanúsága szerint önsugárzóvá, pontosabban fogalmazva fotoaktív sugárzóvá, ahol az az izzított dróttal érintkezésbe került. A tartó drót a sugárzással és vezetéssel átvett hőt 600 nm-nél hosszabb hullámhosszúságú hősugárzással és vezetéssel adja le. A tartódrótról visszaverődő fotoaktív sugárzás annak belső és oldalfalairól szolgáltat információt. Ennek a reflektált fénynek segítségével jól lehet észlelni a tartódrót felületén levő egyenetlenségeket, illetőleg a rátapadt idegen szemcséket. (3., 6. kép.) Mintha ezt látszana igazolni a 3. kép izzó spirálisának felületi képe is. A wolfrámdrót belül kevésbé egyenletesen sugárzó, mint a külső felületi részeken. A wolfrámdrót húzásának hibái kívül észrevehetetlenek, belül viszont némely helyen mintha előtűnnének (6. kép).

Az 1. képen a bevezetéstől számított 13., 14. meneteknek a belső felületén valószínű húzásból származó hibákról reflektálódtak a csíkok. Ezeket a feketedett csíkokat valószínűleg kiemelkedésről visszaverődő aktív fény okozta, nem pedig olyan saját sugárzás, ami mélyedésben vált volna magasabb hőmérsékletűvé.

Rejtélyes fénykorona van az 1. képen a 14., 15., 16. menetek külső részének alsó és felső peremén. Ezen a negatív képen „fénykoronának" észlelhető jelenség a valóságban alacsonyabb hőmérsékletű felületrészeket kellene hogy jelentsen, ami pedig indokolhatatlan. Talán az izzó drótot ott gőzréteg veszi körül, amelyiknek olyan nagy a hősugárzása, hogy az már éppen nem fotoaktív.

Csodálatosnak mondható a spiralizálatlan izzószál hőmérsékletének 4. képen látható leképezése. A vastag tartódrót nemcsak az érintkezéssel átvett hőt szállítja el, hanem az izzószál közeli belső felületeiről sugárzással rákerülő hőt is. Az izzószál jelentős hosszúságú szakaszán látjuk, hogy kívül magasabb hőmérsékletű.

Az 5. pozitív képen látható izzó duplaspirálon ugyancsak szembeötlő az, hogy a drótok hengeres külső felületrészeinek alacsonyabb hőmérséklete nem olyan változatos, mint azt egy hengeres felületrésztől elvárnók, hanem olyan egyhangú, mint azt az 1. a) ábrán fejeztük ki. Egy-egy duplaspirálmenet egyszerű spiráljának külső felületi elemein azonos szürkeségű foltok észlelhetők. A tartó dróthurok alatt legsötétebb szürkék, attól távolodva kevésbé szürkék ezek a csíkok. Persze a duplaspiralizálás hibája miatt a tartódróttól számított harmadik duplaspirálmenet külső felülete alacsonyabb hőmérsékletű, mert a hiba miatt nagy köz van a második és harmadik menet között.

Jól látható az, hogy az izzó drótok hőmérséklete a legmagasabb az egyszerű spirálmenetek között, viszont kialakulnak ennél valamivel alacsonyabb hőmérsékletű, tehát egy kissé szürke csíkok a duplaspirál belső felülete mentén. Első közelítésben a duplaspirált a 2. ábra szerinti korong-gyűrűkből állónak tekinthetjük és a feketedés alapján csupán háromféle hőmérsékletre következtethetünk:

$$T_2 > T_3 > T_1$$

Ezt a következtetést vonhatjuk le a 2. és a 3. képekből is.

A tartódrót a róla visszaverődő aktív fény következtében válik láthatóvá. Saját sugárzása a képen nem hagyott nyomot. A tartó dróthurok alatt alacsonyabb hőmérsékletű az izzóspirálnak különösen a külső felülete.

A hőmérsékleti sugárzók törvényeinek az izzószálak képein való és a fentiekben leírt igazolódása még világosabbá válnék, ha a fényérzékeny anyag egy-egy sávját színszűrőkkel takarnánk le és az izzítás fokát a vörös izzástól a lámpa túlfeszítéséig valamilyen rendszer szerint változtatnánk. Még ezzel a többlettel is mindenütt megvalósítható egyszerű tapasztalatszerzés lehetősége van olyan területen, ahol csak elméleti út az általános eljárás.

A képek elkészítésében munkatársaim voltak *Erdey Grúz Ágota* és *Marosi Jutka*.

SZUPRAVEZETŐ EGYEN- ÉS VÁLTÓÁRAMÚ KÁBEL

Napjainkban az energia előállítása és főleg nagyobb távolságokra történő szállítása egyre égetőbb probléma. A koncentrált ipari központok és a nagyvárosok kialakulása olyan óriási mennyiségű energia szállítását kívánja meg, ami a jelenlegi hagyományos kábelek csúcsteljesítményét is túlhaladja. A probléma megoldását a szupravezető kábelek alkalmazása teszi lehetővé. Az ilyen kábeleken ellenállás és veszteség nélkül a hagyományos kábeleknél nagyságrenddel nagyobb energia továbbítható. Jelenleg a világ több országában foglalkoznak e probléma megoldásával. Magyarországon az Eötvös Loránd Tudományegyetem Alacsony Hőmérséklet Fizikai Laboratóriuma a Csepel Művek Transzformátorgyárával kooperációban és annak anyagi támogatásával vizsgálja a felmerülő elméleti és gyakorlati kérdések megoldását. A Laboratórium munkatársai felépítettek egy egyenáramú szupravezető kábelmodellt, amelynek névleges átviteli teljesítménye 5 MWatt, továbbá egy váltóáram továbbítására alkalmas, két részből álló 100 MVA teljesítményű szupravezető kábelt.

A váltóáramú kábelrendszer ipari jellegű konstrukciója lehetővé teszi tetszőleges hosszúságú kábel építését előregyártott egységek összekapcsolása révén. A kábeleken elvégzett kísérleti vizsgálatok, termikus, elektromos és mágneses mérések sok hasznos információt szolgáltattak a szupravezető kábelek építése szempontjából.

Kiss György

A FIZIKUSI MUNKA MEGBECSÜLÉSÉRŐL

Groma Géza
Fémipari Kutató Intézet
Fenyő Márta
Medicor Művek

Állásfoglalást óhajtunk — felkérés alapján — kialakítani a fizikusok helyzetével, különösképpen munkájának hatékonyságával, erkölcsi-anyagi megbecsülésével kapcsolatban. Különféle munkahelyeken dolgozó fizikusokból álló bizottság foglalkozott a fizikusok helyzetének megitélésével, ill. felmérés kiértékelésével. A bizottság által összeállított jelentésből néhány gondolatot kívánunk közölni. A jelentés 1975 év elején készült.

A fizikusok, különösképpen a kezdők helyzetének megítélésekor a munkahelyeket négy csoportba kell sorolnunk:

1. *akadémiai kutatóintézetek és egyetemi tanszékek,*
2. *ipari kutatóintézetek,*
3. *iparvállalatok, amelyeknél már van múltja a fizikusok alkalmazott és fejlesztő kutatásának,*
4. *iparvállalatok, amelyek korábban még nem foglalkoztattak fizikust.*

A jelentés a fizikusoknak az iparban elfoglalt helyével, lehetőségeikkel, munkájuk hatékonyságával, erkölcsi és anyagi megbecsülésével foglalkozik, így nem tárgyalja az 1. pontba tartozó munkahelyeken dolgozók helyzetét.

Közismert tény, hogy annak ellenére, hogy az ország három fizikusokat képző egyetemére a 10 évvel korábbi 70—80 hallgató helyett az utóbbi években csak 40—45-öt vesznek fel, az akkori 8—10-szeres túljelentkezés kb. másfélszeresre csökkent, ugyanakkor a humán szakokon, a bölcsészeti és jogi karokon, valamint az orvosegyetemeken megnőtt a jelentkezési arány.

Ennek egyik oka valószínűleg az, hogy a jobb anyagi lehetőségeket kínáló munkahelyek éppen a természettudományi tárgyak, így többek között a matematika és fizika területéről szívják el egyre inkább a jó középiskolai tanárokat, ezért az amúgy is nehéz felvételi tárgyak területén az előképzés szintje — és ezzel egyidőben ezek iránt a pályák iránt az érdeklődés felkeltése — lecsökkent.

Az orvosi, jogi és egy sor egyéb humán pálya jobb anyagi lehetőséggel kecsegtet, mint a fizikusi és ezt a fiataloknál nem minden esetben kompenzálja a természettudományos kutatási vágy.

Akik mégis a fizikusi hivatást választják és el is végzik az egyetemet, zömében kutatóintézetekben — éspedig elsősorban az elméleti fizika területén — igyekeznek elhelyezkedni. Ennek egyrészt az az oka, hogy egyetemeinken sokkal jobb az elméleti képzés, mint a gyakorlati (ami ugyancsak anyagi alapokra vezethető vissza), másrészt nemzetközi felmérések mutatják, hogy az elméleti fizika területén sokkal fiatalabban lehet elérni a kimagasló eredményeket. Ez a gyors siker ugyancsak vonzza a fiatalokat.

Az ipari kutatás mindig kísérleti munkát is — sőt, többnyire főleg ezt — igényel, aminek a feltételei az üzemeknél általában rosszabbak, mint a jól felszerelt kutatóintézetekben. Ugyanakkor az előbbiekben rendszerint jóval nagyobbak a kötöttségek is. Ezért azután évente csak néhány újonnan végzett fizikus — kényszerűségből többnyire a szerényebb képességűek — helyezkedik el az iparban.

Az ipari kutatóintézetek közül ma már a legtöbb rendelkezik valamilyen fizikai kutatást végző maggal, bár ennek szintje az egyes helyeken erősen eltérő. Az üzemekbe kerülő fiatal fizikus a legtöbb helyen sokkal magárahagyatottabb. Sorsa a tapasztalatok szerint erősen függ attól, hogy az adott helyen egy korábban, rendszerint már nagyobb gyakorlattal — és ennek megfelelően nagyobb tekintéllyel — odakerült fizikus megteremtette-e a fizikus szemléletet, vagy ez őrá vár. Az első esetben ugyanis van megfelelő szemlélettel rendelkező főnök, esetleg kollégák, vannak műszerek és fizikusra szabott feladatok, míg az utóbbi esetben rendszerint sem a főnök, sem a gyakorlattal nem rendelkező fiatal fizikus nem tudja, hogy mire is való ő azon a helyen. Az egyetemi képzés nem ad ilyen irányú útmutatást a pályakezdőknek, az alkalmazott fizikus képzés pedig — amelyet már több nagyobb, iparilag fejlettebb országban bevezettek — nálunk valószínűleg a kellő létszámigény hiányával párosuló magasabb képzési költségek miatt még nem valósult meg.

Szerencsére van ma már több olyan vállalatunk, amelyben kialakult komoly fizikai kutatás (Csepeli Fémmű, Dunai Vasmű, Egyesült Izzó, Gamma, MOM, Videoton stb.). Azonban a kohászat, gépészet, az építő- és műszeripar zömében, a kerámia, vegyi és gyógyszergyárakban még nagy szükség lenne ilyenekre.

Azoknál a vállalatoknál, ahol még nem alakult ki olyan szellem, amelyik a fizikusoknak a mérnököktől eltérő probléma megközelítési módját hasznosítani tudja, még a tehetséges kezdő is rendszerint elkallódik. Az ilyen gyárak vezetői többnyire azért vesznek fel fizikust, mert ez növeli a vállalat presztizsét. A közvetlen főnökök azután rendszerint vagy azokat a feladatokat bízzák a fizikusra, amelyeket addig senkinek sem sikerült megoldani, mert „ő mindenhez ért", vagy egyáltalában nem tudnak neki munkát adni.

Még olyan helyeken is jelentkezhetnek nehézségek — és ezek elsősorban gazdasági jellegűek — ahol egyébként megvan a jó szándék. A fizikus munkájához eszközök, műszerek szükségesek, amelyeknek a beszerzése sokszor nem kis összegbe kerül és az idők folyamán biztosan nem lesznek úgy kihasználva, amennyire azt a vállalatok gazdaságossági előírásai megkövetelnék. Az pedig, hogy a saját emberek felhasználásával egy-egy műszert kooperációban több

vállalat használjon, vagy időlegesen más intézménynél oldjon meg egy-egy feladatot az üzem saját fizikusa, kevés vezetőnek jut eszébe.

Mindez természetesen megmutatkozik a gyárakban az anyagi-erkölcsi megbecsülés területén is. A jelenlegi körülményeink között szinte törvényszerű gazdasági okai vannak annak, hogy még olyan vállalatoknál is anyagi és erkölcsi hátrányba kerül a fejlesztő vagy minőségellenőrző munkában alkalmazható fizikus a termelésben közvetlenül résztvevő mérnökökkel szemben, ahol pedig már elismerik munkájának a szükségességét. Ez a hátránya még ipari kutatóintézetekben is megvan a problémák fizikai hátterét vizsgáló, vagy a mérési munkákat végző fizikusnak a közvetlen technológiai feladatokat megoldó kutatókkal szemben, hiszen mindig úgy tűnik, hogy a vállalatoktól kapott szerződéses feladatokat az utóbbiak oldják meg és így elsősorban ők biztosítják az intézet bevételét is.

Nem szerencsésebb a helyzete az iparban dolgozónak a saját kollégái, a fizikusok körében sem. Itt a „hatékonyságot" tudományos eredményekkel, dolgozatokkal, tudományos fokozatokkal mérik.

Ritka eset, hogy valaki egy tudományos fokozat megszerzéséhez alkalmas feladatot kapjon az üzemben. Ha ilyen mégis adódik, az ipari fizikus szemléletmódja és adottságai ennek megoldása során biztosan lényegesen különbözni fog az őt rendszerint elbíráló kutatóintézeti kollégái elképzeléseitől (bár ezen a területen az utóbbi időben erős fejlődés mutatkozik). Másrészt az üzemi célok általában nem igénylik, közgazdaságilag pedig közismerten kimutatott, hogy a ráfordítások megsokszorozódása miatt rendszerint nem is érdemes egy kutatást egy vállalatnak olyan tökéletesen befejezni, amennyire az egy tudományos kutatómunka megítélésénél alapvető igény.

Végül, hogy az ipari fizikusok anyagi helyzetét is összehasonlítsuk a kutatóintézetekben dolgozókéval, megemlítjük, hogy fizetésük már az 1974. évi kutatóintézeti fizetésrendezés előtt is alacsonyabb volt az utóbbiakénál és ez a helyzet most csak fokozódott. Az elmaradás kb. 20%-ra becsülhető.

A Fizikai Szemle szerkesztő bizottsága az 1972. januárjában meghirdetett Vélemények sorozatát az olvasók kérésére tovább folytatja ez évben is, az akkor kialakított szerkesztőbizottsági állásfoglalás alapján. E szerint „a Fizikai Szemle feladatául vállalja el, hogy teret nyit a fizikai kutatás és a fizika oktatására vonatkozó egyéni véleményeknek, ha azok értékes gondolatokat tartalmaznak és építő szándékúak, függetlenül attól, hogy egyeznek-e a lap szerkesztőinek nézetével, vagy sem". Ennek szellemében várjuk továbbra is olvasóinknak, várjuk a magyar fizikusoknak leveleit.

A szerkesztő bizottság

A szerkesztésért felel: Turiné Frank Zsuzsa
Szerkesztőség: Budapest V., Anker köz 1, Eötvös Loránd Fizikai Társulat. Távbeszélő: 227-040
A kiadásért felelős: Siklósi Norbert igazgató
Kiadja a Lapkiadó Vállalat, Budapest VII., Lenin körút 9—11. Levélcím: 1906. Postafiók 223 Távbeszélő: 221-293
Terjeszti a Magyar Posta. Előfizethető bármely postahivatalnál, a kézbesítőknél, a Posta hírlapüzleteiben és a Posta Központi Hírlap Irodánál (KHI, 1900 Budapest V., József nádor tér 1.) közvetlenül vagy postautalványon, valamint átutalással a KHI 215-96162 pénzforgalmi jelzőszámlára
Előfizetés egy évre 72,—Ft; egyes szám ára 6,—Ft. Megjelenik havonta
76.2791 Akadémiai Nyomda Budapest V., Gerlóczy utca 2. — Felelős vezető: Bernát György

Index: 25.289

KÜLFÖLDÖN MEGRENDELHETŐ AZ ALÁBBI CÍMEKEN A FOLYÓIRAT:

ANGLIA:

THE DANUBIA BOOK COMPANY,
58, Chatsworth Road *LONDON NW2 4DD*

AUSZTRÁLIA:

COSMOS BOOK AND RECORD SHOP,
145 Acland St. *St. KILDA, Vic. 3182*
GLOBE AND CO.,
694—696 George St., *SYDNEY NSW 2000*

AUSZTRIA:

RUDOLF NOVÁK GmbH.,
Köllnerhofgasse 4., *A-1011 WIEN I.,*

BELGIUM:

„DU MONDE ENTIER" S. A.,
Rue du Midi 162 *B-1000 BRUXELLES*

BRAZÍLIA:

LIVRARIA D. LANDY LTDA.,
Rua 7 de Abril, Caixa Postal 7943.
01000 SAO PAULO

KANADA:

DÉLIBÁB FILM AND RECORD STUDIO
19, Prince Arthur Street West,
MONTREAL 130. Que.
PANNONIA BOOKS,
P.O. Box 1017 Postal Station „B"
TORONTO, Ontartio M5T 2T8
HUNGARIAN IKKA AND TRAVEL SERVICE,
1234 Granville Street, *VANCOUVER 2. B.C.*

DÁNIA:

HUNNIA BOOKS AND MUSIC,
Norrebrogade 182 I tv. *KOBENHAVN*

FINNORSZÁG:

AKATEEMINEN KIRJAKAUPPA,
Keskuskatu 2. *SF 00100 HELSINKI 10.*

FRANCIAORSZÁG:

SOCIÉTÉ BALATON,
12, Rue de la Grange Bateliere *75 PARIS IXe*

HOLLANDIA:

CLUB QUALITON,
Prinsenstraat 26. *AMSTERDAM*

JUGOSZLÁVIA:

FORUM,
Vojvode Misica broj 1. *NOVI SAD*

NORVÉGIA:

A/S NARVESENS LITTERATUR TJENESTE,
P.O. Box 6140 Etterstad *OSLO 6.*

NÉMET SZÖVETSÉGI KÖZTÁRSASÁG:

UJVÁRY — GRIFF,
8000 MÜNCHEN 81. Titurelstr. 2.
MUSICA HUNGARICA,
8 MÜNCHEN 40., Agnesstrasse 45

SVÁJC:

METROPOLITAN VERLAG,
Teichweg 16. *CH-4142 MÜNCHENSTEIN*

SVÉDORSZÁG:

A.B. NORDISKA BOKHANDELN,
Alströmergatan 22. *101 10 STOCKHOLM*

AMERIKAI EGYESÜLT ÁLLAMOK

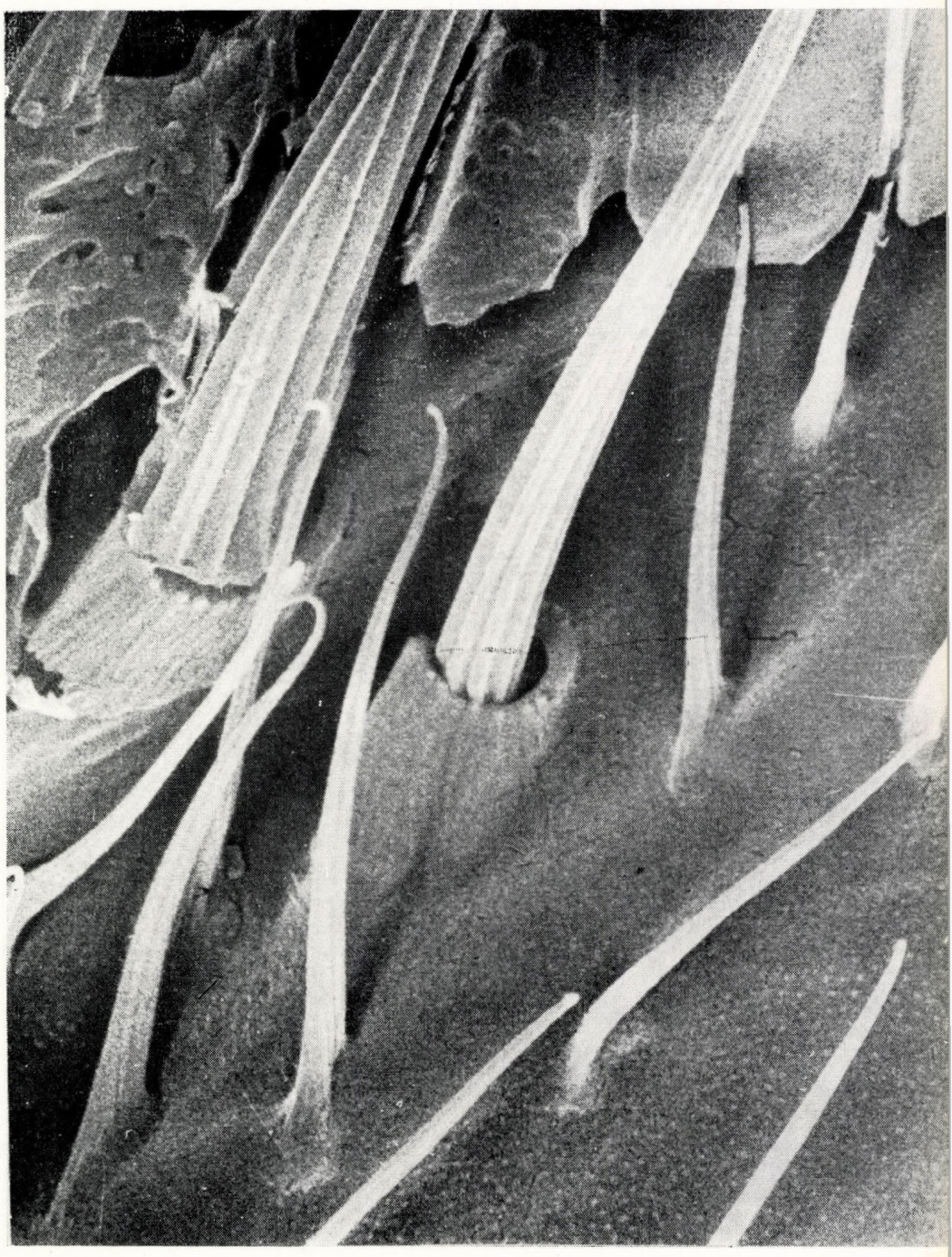
CENTER OF HUNGARIAN LITERATURE
4418 — 16th Avenue *BROOKLYN, N.Y. 11204*
HUNGARIAN BOOKS AND RECORDS,
11802 Buckeye Road *CLEVELAND, Ohio 44120*

VENEZUELA:

LOUIS TARCSAY,
Calle Iglesia Ed Villoria, Apt. 21-105. C. 24.
CARACAS

fizikai szemle

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat lapja



1976/5

A szerkesztő bizottság elnöke:

Marx György

A szerkesztésért felelős:

Turiné Frank Zsuzsa

A szerkesztő bizottság titkára:

Berényi Dénes

Szerkesztő bizottság:

Bałázs Béla, Barlai Katalin, Barta György, Bozóky László, Csekő Árpád, Dede Miklós, Fehér István, Flórián Endre, Gaal István, Groma Géza, Haiman Ottó, Hoffmann Tibor, Holics László, Károlyházy Frigyes, Keszthelyi Lajos, Kovács István, Mihály László, Schanda János, Soós Károly, Szigeti György, Tóth Eszter, Valkó I. Péter, Vermes Miklós

Címképünk:

Muslinca (Drosophila melanogaster) szárnyán lévő kitin-szőrök scanning elektronmikroszkópos felvételen. Nagyítás: x 4000. A felvétel a Szegedi Biológiai Központ Biofizikai Intézetében készült.

TARTALOMJEGYZÉK

I. Prigogine: Az élet termodinamikája 161 oldal
Szegő Károly—Tóth Kálmán: Multiperiferializmus, multiperiferialis modellek 170 oldal
Kovács István: Tudomány és művészet 181 oldal

A FIZIKA TANÍTÁSA

Csányi Vilmos—Kajtár Márton—Marx György: Szovjet iskolában 184 oldal
R. Karplus: Fizika kezdők számára 186 oldal
J. M. Ogborn: A második főtétel 193 oldal

ESEMÉNYEK 200 oldal

СОДЕРЖАНИЕ

И. Пригожин: Термодинамика жизни
К. Сеге—К. Тот: Мультипериферализм и мультипериферальные модели
И. Ковач: Наука и искусство

ПРЕПОДАВАНИЕ ФИЗИКИ

В. Чаньи—М. Кайтар—Г. Маркс: В средних школах СССР
Р. Карплюс: Физика для начинающих
Дж. М. Огборн: Второе начало Ньютона

СОБЫТИЯ

INHALT

I. Prigogine: Die Thermodynamik des Lebens
K. Szegő—K. Tólh: Multiperipherialismus und multiperipheriale Modelle
I. Kovács: Wissenschaft und Kunst

UNTERRICHT DER PHYSIK

V. Csányi—M. Kajtár—G. Marx: In den Mittelschulen der Sowjetunion
R. Karplus: Physik für Anfänger
J. M. Ogborn: Das zweite Gesetz der Mechanik

EREIGNISSE

CONTENTS

I. Prigogine: The thermodynamics of life
K. Szegő—K. Tóth: Multiperipherialism and multiperipherial models
I. Kovács: Science and the Fine Arts

THE TEACHING OF PHYSICS

V. Csányi—M. Kajtár—G. Marx: In the schools of the Soviet Union
R. Karplus: Physics for beginners
J. Ogborn: The second law of mechanics

EVENTS

fizikai szemle

AZ EÖTVÖS LORÁND FIZIKAI TÁRSULAT LAPJA

Alapította Eötvös Loránd 1891-ben Mathematikai és Physikai Lapok néven

XXVI. évfolyam 5. szám 1976. május

AZ ÉLET TERMODINAMIKÁJA

I. Prigogine

Gelyen

A biológia és a fizikai tudományok viszonyának minden elemzése előbb-utóbb a struktúrák fejlődését szabályozó fizikai alaptörvények és az élő szervezet kapcsolatának vitájába torkollik. Még pontosabban, a biológiai rend eredetének, fennmaradásának összeférhetősége a termodinamika egyes kijelentéseivel hosszú évek óta állandó viták tárgyát képezi. Bergsontól Monodig nagyszámú szerző érintette ezt a problémakört. Egyesek, mint Bergson és Polányi az élet eredendő önállóságát kívánták látni ebben a „paradoxonban". Mások, akik számára a természeti törvények egysége vitán felül állt, csak álproblémát láttak itt.

Látni fogjuk, hogy ma már jobban értjük a biológiai rend fogalmát csakúgy, mint a fizikai törvényektől való függését. A biológiai rendszerek egyik alapvető jellemzőjének tekintett rend és struktúra mai felfogása távolról sem olyan egyszerű, olyan egyöntetű, amint azt gondolnánk.

Mielőtt azonban a biológia és a fizika kapcsolatát vizsgálnánk, helyén való röviden áttekinteni a fizikának a fejlődésre és szerveződésre vonatkozó nagy törvényeit a mai fizikai közfelfogás alapján. Ezek között a termodinamikai törvények, főleg a második főtétel játszanak fontos szerepet.

1. A termodinamika II. főtétele (a Boltzmann-féle rendezettségi elv)

Vizsgáljunk egy makroszkopikus rendszert, amelyben igen nagyszámú (N) részecske vagy másféle alrendszer található. Tegyük fel, hogy ezek a részecskék egy a külvilágtól elkülönített térfogatrészben helyezkednek el oly módon, hogy az N/V viszonnyal (V = térfogat) jellemezhető részecskeszámsűrűség véges. Íme illusztrációként néhány példa az ilyen rendszerekre: szokásos nyomáson és hőmérsékleten 1 cm³ térfogatú gázban 10^{20} gyengén kölcsönható egységet találunk, amelyet a gáz molekuláinak hívunk. Egy baktérium kromoszómáját, amely néhányszor 10^6 molekulát tartalmaz, szintén makroszkopikus rendszernek tekinthetjük. Végül egészen más skálán, a 10^4 makro-molekulát tartalmazó élő sejtet is bizonyos tulajdonságainak leírása szempontjából olyan rendszernek tekinthetjük, amelyre a folytonos közegek mechanikája érvényes.

Mindezen rendszerekre a termodinamika néhány egészen általános törvény érvényességét állítja, amelyeket az itt következő definíciók után fogalmazunk meg.

Általában egy makroszkopikus rendszer környezetéhez (melyet néha külvilágnak hívunk) vagy belsejének minden pontjában ható erőkkel csatolódik (pl. a gravitáció vagy külső elektromágneses tér hatása), vagy pedig felületi erőkkel (pl. súrlódással). E l s z i g e t e l t rendszernek hívjuk azt a rendszert, amelynek sem anyag- sem energiacserére nincs módja a külvilággal. Z á r t rendszernek olyan rendszert nevezünk, amely csak energiacserére képes a külvilággal. Végül n y í l t rendszerről akkor beszélünk, amikor egy rendszer energiát és anyagot egyaránt cserélhet környezetével. Így a Föld, mint makroszkopikus rendszer z á r t-nak tekinthető, hiszen csak a napsugárzás energiáját képes felvenni (elhanyagolva a meteorhullásból stb. származó tömegcserét) és ezen energia egy részét képes visszasugározni. Ugyanakkor az E s c h e r i a c o l i sejt glukóz környezetben nyílt rendszerré válik.

A termodinamika első főtétele minden rendszerre érvényesen leszögezi az energia megmaradását. A rendszer energianövekedése egyenlő az általa felvett energiával.

A molekuláris káosz

A második főtétel egy új állapotfüggvényt értelmez, az entrópiát, amely a külvilággal történő hőcserével kapcsolatos. Az energiával ellentétben a teljes entrópia nem marad meg. Az entrópianövekedést két tag összegeként kell tekintenünk; az egyik, d_kS a külvilágból beáramló entrópia, míg a másik, d_bS magának a rendszernek az entrópiatermelése: $dS = d_kS + d_bS$. A második alapelv

Megjelent: La Recherche, 1972. június. Fordította Patkós András.

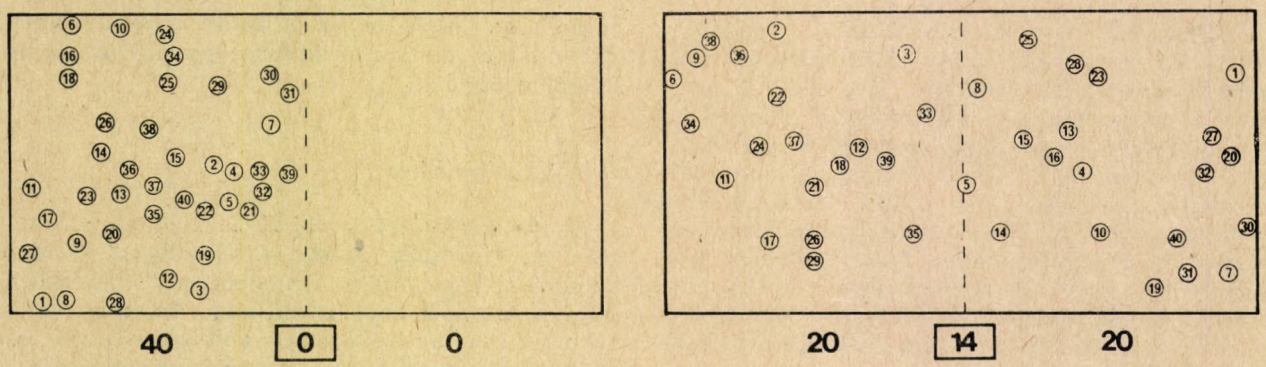
lényegét elszigetelt rendszer esetében a $dS \geq 0$ egyenlőtlenségben foglalhatjuk össze. Az egyenlőség csak egy különleges állapotban, a rendszer hosszú időbeli fejlődéssel elért egyensúlyi állapotában valósul meg.

Elszigetelt rendszerre a második főtétel azt jelenti, hogy létezik egy minden pillanatban értelmezhető állapotfüggvény, amely csak nőhet az idő múlásával. Ez a törvény a makroszkopikus fejlődés általános törvényszerűségét adja. Mit jelent mikroszkopikusan? Mit jelent molekuláris fogalmakkal kifejezve az entrópia növekedése? Ezt a kérdést Boltzmann klasszikus vizsgálatai nagymértékben tisztázták: az entrópia a „molekuláris káosz" mértékét jellemzi. Az entrópia növekedésének törvénye a rendezetlenség fokozatos növekedésének törvénye. Ez azt jelenti, hogy a rendszer csakhamar elfelejti azt a különleges kezdeti feltételt, (kezdő állapotot), amelyből időbeli fejlődését megindítottuk.

Vegyük illusztrációul a legegyszerűbb példát: Tekintsünk egy két egyenlő térfogatú részre osztott edényt, melynek részei között átjárás van. Elemi megfontolás szerint azon módozatok száma, ahogyan N molekulát szétoszthatunk a két részben úgy, hogy az egyikben N_1, a másikban N_2 legyen: $P = N!/N_1! \cdot N_2!$ Bármi is legyen a megfigyelés kezdetekor N_1 és N_2 értéke, elég nagy N esetén, elég hosszú idő elteltével azt várjuk, hogy egyensúlyi állapot áll be, amely kis fluktuációtól eltekintve a molekuláknak a két részben való egyenlő eloszlását jelenti $\left(N_1 \simeq N_2 \simeq \frac{N}{2}\right)$ (Az 1. ábrán az eloszlás időbeli fejlődését láthatjuk. Az ábra elektronikus számítógépen történt szimuláció eredménye.) Könnyen belátható, hogy az $N_1 = N_2$ egyenlő eloszlás P maximális értékéhez tartozik. Tehát a fejlődés során P is nő. Boltzmann zseniális intuíciója összekapcsolta a két mennyiséget. Az S entrópiát a P „valószínűséggel" a következő híres képlet kapcsolja össze: $S = k \log P$ ahol k a Boltzmann-féle állandó. Ez az összefüggés jól kifejezi, hogy az entrópiával az a molekuláris káosz is nő, amelyet a P számmal mérünk. Ez a fejlődés eltörli a kezdeti feltételek emlékét, amennyiben az „alacsonyabbrendű" szimmetriával rendelkezik, mint ami az egyensúlyi rendszer sajátja: Pl. elég hosszú idő elteltével az 1. ábra két szekciója teljesen azonos szerepet fog játszani. A rendszer spontán fejlődik a maximális entrópiájú állapot felé.

Az általunk vizsgált példa izolált (elszigetelt) rendszerre vonatkozott. Ha T hőmérsékletű zárt rendszert tekintünk (egy termosztátban elhelyezett rendszert), a helyzet analóg lesz az előzővel, de most az entrópia helyett egy másik állapotfüggvényt, az F szabad energiát kell tanulmányoznunk, amelyet az $F = E - TS$ összefüggés definiál, ahol E és S rendre a rendszer energiáját és entrópiáját jelölik. Egyensúlyban F értéke minimális. E képlet szerkezete az E energia és az S entrópia közötti versengést fejezi ki. Alacsony hőmérsékleten a második tag elhanyagolható, ezért itt a minimális energiájú és kis entrópiájú szerkezetek fognak realizálódni (minthogy az entrópia T-nek növekvő függvénye). A nagyobb hőmérsékleten létrejövő struktúrák entrópiája egyre nagyobb lesz. Erre utalnak megfigyeléseink is, hiszen alacsony hőmérsékleten szilárd állapotú, kristályos anyagokat találunk, míg magasabb hőmérsékleten a nagyobb entrópiájú gázhalmazállapot jön létre. Így látható, hogy a különböző rendezettségű fizikai struktúrák létrejöttét a nem szigetelt rendszerekre alkalmazott termodinamikai törvényekkel lehet magyarázni.

Ahhoz, hogy egy nemszigetelt rendszer egyensúlyi állapotát makroszkopikusan leírjuk, az F és S állapotfüggvények vizsgálata helyett egyenrangúan azt a kérdést is feltehetjük, mekkora annak a valószínűsége, hogy a rendszer egyensúlyi állapotában E_n energiával rendelkezzék? Erre a kérdésre még Boltzmann megadta a választ, amikor kimutatta, hogy a P valószínűség $exp(-E_n/kT)$-val arányos. Alacsony hőmérsékleten csak az „alacsony szintek" lesznek betöltve (azokban fordul elő nagy gyakorisággal a rendszer), míg elég magas hőmérsékleten az összes szint nagyjából egyenletesen telik meg. Ez az *egyensúlyi állapotok alapvető rendezettségének elve, amelyet Boltzmann-féle rendezettségi elvként fogunk emlegetni.* Ennek az elvnek az alapján dönthető el, hogy két folyadék



1. ábra. A számítógépen nyert ábrák egy 40, gyengén kölcsönható részből álló rendszer fejlődését mutatják az egyenletes eloszlás irányába. A 0. időpontban minden részecske a tartály bal oldalán helyezkedett el, sebességeik véletlenszerűek voltak. Bizonyos idő elteltével a (14. pillanatban) a jobboldali ábrán látható helyzet állt elő.

keveredik-e, hogy egy rendszer molekulái végül szilárd, folyékony vagy gáz halmazállapotú fázist alkotnak-e? Ez az elv képes a fázisátalakulások minden részletéről számot adni.

Vizsgáljuk meg befejezésül azt a kérdést, vajon a termodinamika második főtétele a részecskék között ható mindenféle erőtípus esetén érvényben marad-e? Igaz-e, hogy egy azonosságról van csak szó, amely a makroszkopikus rendszereket alkotó részecskék nagy számának következménye, vagy pedig teljesüléséhez a rendszernek szigorúbb feltételeket kell kielégítenie?

Ne feledjük el, hogy azokban a laboratóriumi kísérletekben, amelyekre a második alapelvet felépítették a molekulák között alapvetően rövid hatótávolságú erők működtek (van der Waals-típusú erők; ha ionokról van szó, akkor az árnyékolási jelenségek miatt válik az effektív erő rövid hatótávolságúvá). Ha azonban például csillagok közötti kölcsönhatást tekintünk, akkor azt a Newton-féle hosszú hatótávolságú gravitációs erő segítségével kell leírnunk. Vajon lehetséges-e akkor termodinamikáról és Boltzmann-féle rendezettségről beszélni? Nem túl régen jónéhány számítógép-kísérletet végeztek nagyszámú, gravitációval kölcsönható részecskét tartalmazó rendszerek fejlődésének tanulmányozására.[1] Semmiféle homogenitásra vezető tendencia nem volt megállapítható (vö. 2. ábra). A fejlődést nem lehet egy P-hez hasonló számmal jellemezni, így a termodinamikával történő leírás lehetősége kizártnak tűnik.

Újabb elméleti vizsgálatok szintén rámutattak a termodinamika gravitáló részecskékből álló rendszerekre való kiterjesztésének nehézségeire (Prigogine és Severne,[3] Thirring[4]). Azok a szokásos megfontolások, amelyek a termodinamika statisztikus mechanikai megalapozását teszik lehetővé, itt nem alkalmazhatók. Hogy létezik-e valamiféle általánosított termodinamika ebben az esetben, ez a kérdés egyelőre eldöntetlen.

Az is lehetséges, hogy az Univerzum egészét nem lehet homogén kozmikus gáznak tekinteni (de Vaucouleurs[5]) és ez az inhomogenitás, amelyet egyébként egyre bonyolultabb hierarchikus struktúrák megjelenése jellemez, a termodinamikai leírás alkalmazhatatlanságával függ össze (Haggerty[6]). Bármi is legyen a végkövetkeztetés, valószínűnek látszik, hogy a Boltzmann-féle rendezettségi feltevéssel leírható termodinamikai rendszerek mellett n e m t e r m o d i n a m i k a i rendszerek is léteznek, amelyekre az első, rögtön különösen izgalmas példát a csillagászati struktúrák szolgáltathatják. Ez esetben a termodinamikát, mint a rövid hatótávolságú erőkre és gravitációs esetben csak egy meghatározott, véges tartományra érvényes közelítést kell majd tekintenünk.

2. A biológiai rend és a termodinamika

Lehetséges-e környezetünk minden objektumának megértése a Boltzmann-féle rendezettség alapján? Ez az a központi kérdés, amelyet szeret-



2. ábra. Az ábra egy csillaghalmazt ábrázol. A csillagokat, mint hosszútávú, gravitációs erővel kölcsönható „részecskéket" tekinthetjük. Számos elvégzett számítógépes kísérlet arra utal, hogy az időbeli fejlődés nem mutat tendenciát a homogén eloszlásra.

nénk megvitatni. A kérdés jobb megértését néhány definícióval és általános érvényű megjegyzéssel kívánjuk elősegíteni. A biológiai rend fogalmának egyértelmű jellemzése különösen kényes kérdés. Ezt a fogalmat itt egy intuitív definícióval próbáljuk megragadni, ami visszatükrözi a legszembeötlőbb közös jellegzetességeket, amelyekkel az élő rendszerek tanulmányozása során találkozunk:

a) A legegyszerűbb sejtek anyagcseréje is több ezer kémiai reakció egymásba csatolt, összehangolt lejátszódását tételezi fel. A koordinációs mechanizmusok egy különösen összetett funkcionális rendet alkotnak.

b) Az anyagcsere folyamatai speciális katalizátorokat, enzimeket tételeznek fel, amelyek igen bonyolult térbeli struktúrával rendelkeznek.

Ezen anyagokat a szervezetnek kell létrehoznia; térbeli struktúrájuk egy architekturális rendet értelmez.

Rögtön hozzátesszük, hogy sejti vagy sejtfölötti szinten ez a rendezettség egyre növekvő bonyolultságú folyamatok és szerkezetek egymásba kapcsolt sorozataként jelenik meg. Ez a hierarchikus jelleg egyike a biológiai rend legfontosabb jellemzőinek. A következő kérdést kell tehát megvizsgálnunk: Melyek azok a tényezők, amelyek a biológiai rend létrejöttéről és fennmaradásáról számot tudnak adni? Vajon a biológiai szerkezeteket a Boltzmann-féle rendezettséggel le tudjuk-e írni?

Hogy ezekre a kérdésekre felelhessünk, első pontként a sejten belül fellépő erőket kell jellemeznünk. Elmondtuk, hogy a termodinamikai leírás gyengén kölcsönható alrendszerekből összetevődő rendszerekre érvényes, és nem tűnik alkalmazhatónak pl. hosszú hatótávú erőkkel kölcsönható részecskék rendszerére. Amennyire azonban az élőlények fizikai, kémiai összetételét ismerjük, kijelenthetjük, hogy a sejt (vagy fejlettebb szinten több sejt) belsejében a szokásos rövid hatótávolságú erők lépnek fel, amelyekre a termodinamikát a fizika által tanulmányozott rendszerek esetében eddig is alkalmazták. Az erők jellege alapján nincs okunk kételkedni a klasszikus termodinamika alkalmazhatóságában. A cikk további részében e kérdést fogjuk bővebben fejtegetni.

3. Disszipatív rendszerek. Rendezettség és fluktuációk

Figyelemre méltó, hogy a termodinamika megalapozása és a társadalmi és biológiai fejlődés elméleteinek megjelenése ugyanarra a történelmi pillanatra esik. De a termodinamikai fejlődés törvényeivel ellentétben, a biológiai és társadalmi fejlődés elmélete a szervezettség növekvő fokának elvét vallja, amely egyre bonyolultabb funkciók ellátását biztosítja, egyre bonyolultabb szerkezetek létrehozása révén. Spencer ennek alapján egészen a „homogenitás instabilitásának" elvéig is eljutott. Magas szinten szervezett struktúrák önreprodukálása azonban összeegyeztethetetlennek tűnik a termodinamika második főtételével. Így viszont a termodinamikából arra a következtetésre kell jutnunk, hogy egy rendszer fejlődésének az entrópia növekedésével, a jellemző rend fokának csökkenésével kell járnia.

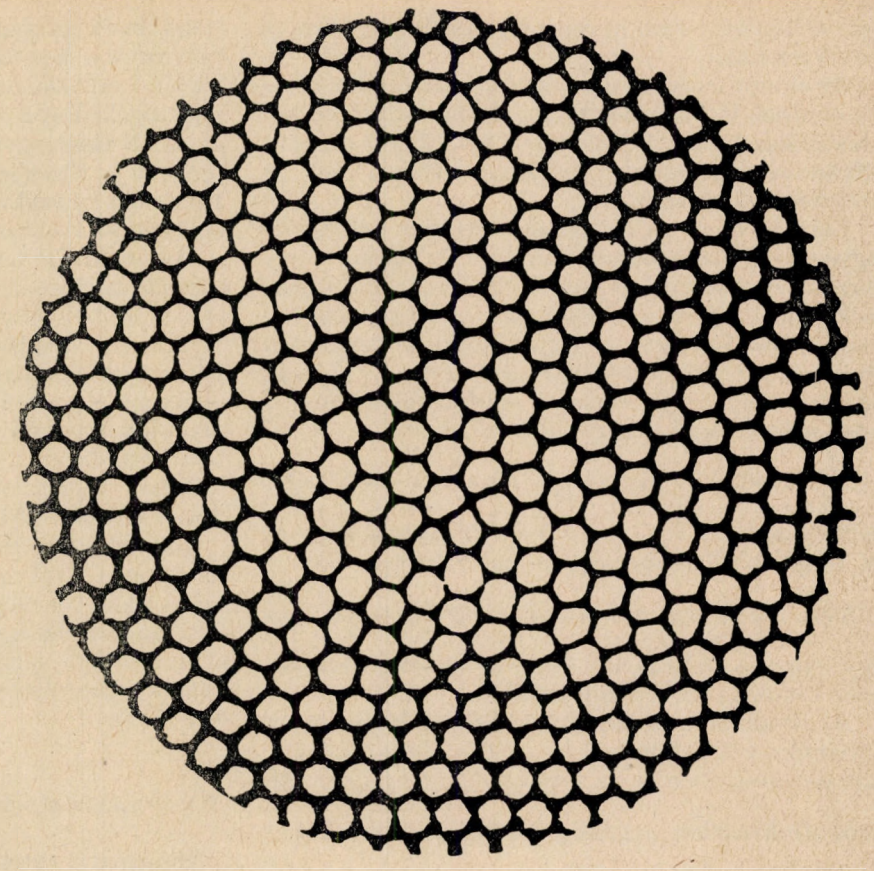
Igaz, hogy a biológusok ma már azt vallják, hogy az entrópia növekedésének elvét a teljes rendszerre, azaz az élőlényre és környezetére együtt kell alkalmazni. Más szavakkal az élő rendszert nem lehet elszigetelt-nek tekinteni, amelyre a $dS \geqslant 0$ egyenlőtlenség érvényes. Valóban egy nyílt rendszerről van szó, amely energiát és anyagot tud cserélni a külvilággal. Ezek után a teljes rendszer entrópiájának növekedése teljességgel összefér az élőlényen belül végbemenő entrópia csökkenéssel, amely a szervezetek létrejöttéhez elengedhetetlen. Ez a szemlélet azonban semmi segítséget nem nyújt az élőlény fejlődésének megértésében. Azokra a mechanizmusokra vonatkozóan, amelyek a szerveződés molekuláris szintjének megértésében elengedhetetlenek, nem ad felvilágosítást. Nem sok hasznunk van abból a megállapításból, hogy az élő rendszerek fejlődése összhangban áll az Univerzum entrópiájának növekedésével (az univerzumot izolált rendszernek tekintve). Arra kell törekednünk, hogy a magában az élőlényben lezajló fejlődési folyamat termodinamikai leírását tudjuk adni. Ezek viszont olyan folyamatok, amelyek feltétlenül nemegyensúlyi állapotokhoz kapcsolódnak (l. később).

Így kézenfekvő a nem egyensúlyi állapotok elemzésével kezdenünk. Elszigetelt rendszerben, mint láttuk, az entrópia maximumának eléréséig növekszik. A rendszer tehát átmeneti periódus után, egy állandó, egyértelműen jellemezhető állapotba kerül, amelyet termodinamikai egyensúlynak hívnak.

Elszigetelt rendszer helyett tekintsünk most egy nyílt rendszert, amely egyidejűleg energiát és anyagot is képes cserélni környezetével. Ekkor, feltéve, hogy a külvilág energia- és anyagtartalékai elegendően nagyok, a rendszer egy állandósult állapotban maradhat, amely azonban nem azonos az egyensúllyal. Ez egy stacionárius, nem egyensúlyi állapot. Amíg tehát az elszigetelt rendszer egyensúlyi állapotát egyensúlyi szerkezetekkel jellemezhetjük (pl. a kristályszerkezet), a nyílt rendszer nem egyensúlyi állapotát más, a következőkben ismertetendő szerkezetek megjelenése fogja jellemezni. Ezeket disszipatív struktúráknak hívják. A Boltzmann-féle rendezettségi elv, amely jó az egyensúlyi állapotok esetében, itt már nem lesz alkalmas eszköz a leíráshoz. A disszipatív struktúrákkal egészen másféle rendező elvet társítunk majd, amelyet a „fluktuációkkal megvalósuló rend" elnevezéssel illethetünk.

A Bénard-instabilitás

Mielőtt a disszipatív rendszerek termodinamikáját vázolnánk, lássuk egy különösen egyszerű példájukat a hidrodinamika köréből: a Bénard-instabilitást.



3. ábra. A Bénard-instabilitás. Egyik oldalról történő fűtéssel az egyensúlyi állapotából elmozdított folyadékrétegben egy kritikus hőmérsékletgradienstől kezdve fellép az áramlási hővezetés. A függőlegesen fényképezett rétegben kialakult vezetési cellákat látjuk az ábrán. Figyeljük meg ezek szabályos, hexagonális szimmetriát követő elrendeződését.

Egy folyadékréteget alulról fűtünk. A határfeltétel következtében a rendszer elmozdul egyensúlyi állapotból, amelyet a rétegbeli homogén hőmérsékleteloszlás jellemez. Kis hőmérsékleti gradiens esetén a hőt vezetéssel szállítja a folyadék, de egy kritikus gradiensértéktől kezdve az áramlással történő hőátadás is megjelenik. A 3. ábrán a függőlegesen fényképezett vezetési „sejtekről" készült felvételt láthatjuk. Vegyük észre a cellák szabályos elhelyezkedését, amely hexagonális szimmetriát mutat.

Itt egy, a molekuláris együttműködés (kooperáció) fejlett fokának megfelelő struktúrálódás tipikus jelenségével állunk szemben. A Bénard-instabilitás kialakulása előtt a rendszer energiája teljesen termikus jellegű volt (hőmozgás). Az instabilitás megjelenése után annak egy része rendezett makroszkopikus áramok energiájába transzformálódott, amely áramok a molekulák jelentős részét tartalmazzák. Figyelemre méltó, hogy ezt a szerkezetet a külvilággal történő energiacsere hozza létre és stabilizálja egy az egyensúlyi helyzettől távol eső állapotban. Ezen oknál fogva hívják az ilyen típusú rendszereket d i s s z i p a t í v e k n e k.

Nyilvánvaló, hogy a Boltzmann-elv itt nem alkalmazható, hiszen annak alapján makroszkopikus áramok a folyadékban praktikusan 0 valószínűséggel jöhetnek létre. A k o o p e r a t í v s t r u k t ú r a megjelenése csakis a külső kényszer — ez esetben a létrehozott hőmérsékleti gradiens — alkalmazásának köszönhető.

Láttuk, hogy ez a struktúra a termodinamikai egyensúlyi állapot instabillá válásával fejlődik ki. A fizikai körülmények a következőkben szemléltethetők: kis konvektív áramok állandóan létrejönnek, mint fluktuációk, azonban egy kritikus hőmérsékletgradiens alatt ezek a fluktuációk lecsengenek. Egy kritikus ponton túl bizonyos fluktuációk növekedni fognak és makroszkopikus áramot hoznak létre. Új rendezettség áll be, amely egy óriási fluktuáció stabilizálódásának felel meg. A stabilizálódást a külvilággal történő energiacsere biztosítja. Ez a „f l u k t u á c i ó k r é v é n m e g v a l ó s u l ó r e n d".

4. Az általánosított termodinamika

A Bénard-instabilitás példáján rámutattunk arra, hogy a nem egyensúlyi struktúrák születésének megértéséhez a fluktuációkat kell felhasználnunk. Ezek megléte teszi lehetővé az irreverzibilis termodinamikában a struktúrák létrejöttét. A továbbiakban részletesen vizsgáljuk majd a disszipatív rendszerek és a biológiai rend fenntartásáért felelős szerkezetek és működések kapcsolatát. De már itt megjegyezhetjük, hogy a szerkezetek és funkciók közötti differenciálódás arra utal, hogy

az élőlények nem egyensúlyi feltételek között funkcionálnak.

Az elmúlt években a szerző és brüsszeli csoportja (különösen P. Glansdorff) egy általánosított termodinamikai leírást fejlesztettek ki. Ennek alapjait kívánom most röviden kifejteni a fluktuációk elméletéből kiindulva.

Láttuk, hogy az elszigetelt rendszer entrópiája egyensúlyi állapotban maximális. De tudjuk, hogy a rendszer molekuláris szerkezete miatt mindig lesznek jelen fluktuációk. Egy makroszkopikusan homogén rendszerben a fluktuációk a maximális entrópia-értéktől való eltérésre vezetnek. Fejtsük sorba a rendszer entrópiáját egyensúlyi értéke körül: másodrendű tagig elmenve $S = S_0 + \delta S + \frac{1}{2}\delta^2 S$ adódik. Miután egy maximum-hely közelében vagyunk, $\delta S = 0$ és $\delta^2 S < 0$. Ahhoz, hogy az S_0 alaphelyzet stabil legyen, az szükséges, hogy a $\delta^2 S$ eltérés időben növekedjék: $\frac{d}{dt}\delta^2 S > 0$. Ha nem így lenne, a fluktuációk felerősödnének és a rendszer kimozdulna alapállapotából.

Az általunk megalapozott általánosított termodinamika ezt a feltételt az irreverzibilis folyamatok sebességeiben és az általánosított erőkben fellépő fluktuációk segítségével fejezi ki: $\frac{d}{dt}\delta^2 S = \sum_\varrho \delta J_\varrho \delta \chi_\varrho$, J_ϱ olyan típusú irreverzibilis folyamatok sebességeit jelöli, mint a kémiai reakciók, a diffúzió, míg χ_ϱ az ezekhez tartozó hajtóerőket adja, amit pl. a kémiai reakciók világában affinításnak hívnak.

Egyensúlyi helyzet közelében könnyű kimutatni, hogy a $\frac{d}{dt}\delta^2 S > 0$ egyenlőtlenség mindig fennáll. A rendszer stabil, a Boltzmann-féle rendezettség elve dominál, még akkor is, ha a rendszerben időlegesen felléphetnek perturbációk. A termodinamikai egyensúlytól távol azonban megváltozik a helyzet. Megfelelő *nonlinearitások* jelenlétében a $\frac{d}{dt}\delta^2 S > 0$ egyenlőtlenség érvényét veszti, és a rendszer egy új stacionárius állapotba fejlődhet át, pl. a rendezett szerkezetekkel rendelkező állapotok valamelyikébe.

Az elmúlt négy évben részletesen tanulmányoztuk matematikailag a kémiai és a transzport jelenségek körében a nyílt rendszerek viselkedését és annak lehetőségét, hogy ebben a körben nem egyensúlyi rendezett struktúrák jöhessenek létre. Ezekben az esetekben a n e m l i n e á r i s termodinamika lesz az az eszköz amely a jelenségek leírására alkalmas. Az egyensúlyi állapottól távoli rendszerekre már nem áll fenn lineáris kapcsolat az áramok és erők között.

Ezen rendszerek kiválasztását az indokolta, hogy az élő szervezet viselkedése nagy mértékben függ n e m l i n e á r i s k é m i a i reakcióktól (amilyenek pl. azok a reakciók, amelyek enzimekkel történő katalízist, tehát az aktivitás ezekkel történő ellenőrzését tartalmazzák) és transzport jelenségektől (pl. az ionok áthaladása membránon, az RNS-messenger diffúziója a riboszómák mentén stb.). Elsőként nemlineáris lépéseket tartalmazó kémiai reakciókra mutattuk ki, hogy a nem egyensúlyi viselkedés valóban létrejöhet.

Míg tehát a termodinamikai egyensúly körüli gyenge ingadozások esetén (lineáris közelítésben) tér és időbeli homogenitás figyelhető meg, addig ugyanezen rendszerekben nagyobb fluktuációk felléptével elképzelhető egy instabilitási küszöb elérése (amely a kinetikus paraméterek, diffúzióállandók függvénye). Ezt átlépve a rendszer időben periodikus viselkedést mutat, spontán megszünteti térbeli homogén voltát, esetleg még ezeknél is összetettebb viselkedésre képes.

Vegyük észre, hogy az ilyen típusú viselkedés az egyensúlytól távol sem általános. A koherens viselkedés ezen fajtájának létrejöttéhez különleges feltételek szükségesek, míg a Boltzmann-elv az egyensúly közelében mindig igaz (a termodinamika hatáskörébe tartozó erőkkel történő kölcsönhatás esetében).

A disszipatív struktúrák létezéséről

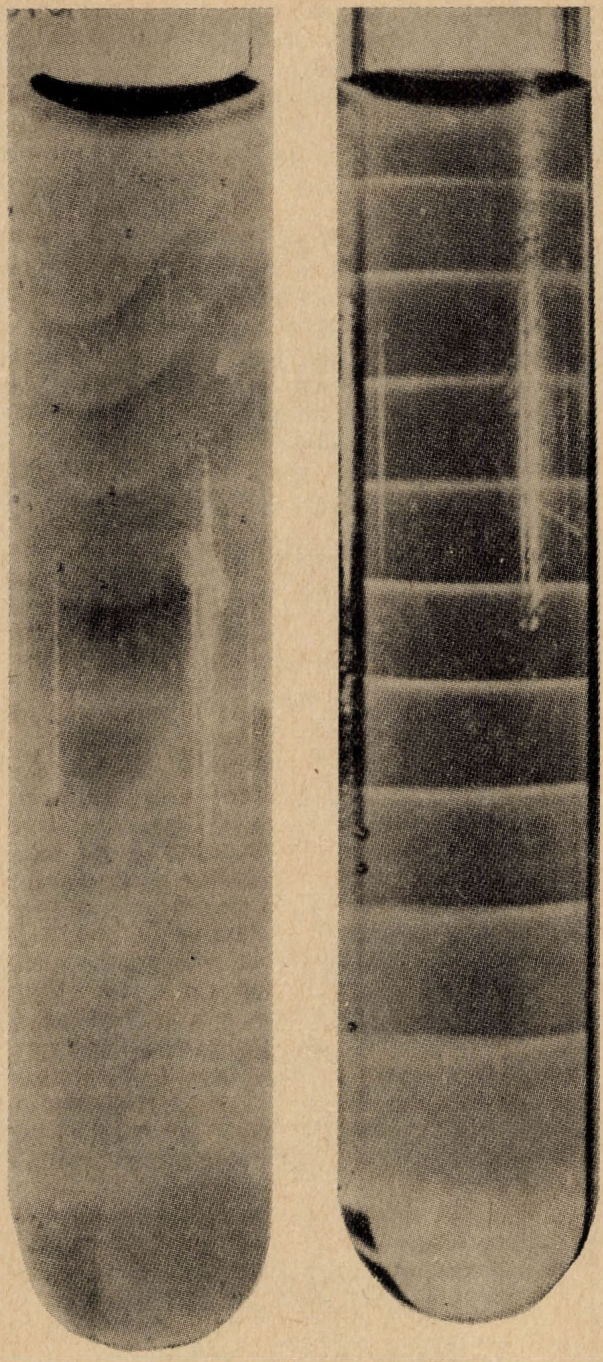
Disszipatív struktúrák megjelenését nemlineáris közegben az egyensúlytól távol nemcsak modellrendszereken végzett számítógép-kísérletekkel lehet tanulmányozni. Újabban több laboratóriumi kísérlet is rámutatott ilyen rendszerek létezésére. Mielőtt a biológiai aspektusokra rátérnénk, érdekes lehet egy, a nem biológiai kémiából származó példát bemutatni.

Egy különösen jól ismert eset a Zsabotyinszkij-féle reakció, amely során káliumbromáttal cériumionok jelenlétében oxidálják a malonsavat. A 4. és 5. ábra a rendszer fejlődésének két stádiumát mutatják. A sötét vonalak a Ce^{3+} ionok túlsúlyára, a világosak a Ce^{4+} ionokéra utalnak. A koncentráció bizonyos értékére először oszcillációk jönnek létre, pulzálások, majd egy térbeli szerkezet alakul ki, amely órák hosszat fennmarad.

A kísérletet zárt rendszerben végzik el, ez szükségszerűen a termodinamikai egyensúly felé fejlődik, amelynek a homogenitás alapvető jellemzője. Egy későbbi pillanatban tehát a rendszer néhány másodperc alatt elveszti strukturált jellegét. Ez tehát a koherens viselkedésnek egy kiváló példája, amelyet a termodinamikai egyensúlytól történt elég nagyméretű eltérítés tett lehetővé.

5. Disszipatív rendszerek a biológiában

Most már látjuk, mi lehet a biológiai rend és a disszipatív rendszerek kapcsolata. Valóban, önreprodukáló rendszernek környezetével anyag- és energia-cserét kell végeznie, tehát nyílt rendszer-



4—5. ábra. A kémiai disszipatív struktúrák egy példája: a Zsabotyinszkij féle reakció. A 4. ábra a térbeli struktúra kialakulását megelőző időbeli oszcillációk egy pillanatát mutatja. Az 5. ábrán a bizonyos idő elteltével létrejövő térbeli struktúra látható, amely több órán át fennmarad.

ként viselkedik. Másrészt, mint már hangsúlyoztuk, az élet fenntartásához és a növekedéshez igen nagyszámú kémiai reakcióra és transzport jelenségre van szükség, amelyek ellenőrzése nagymértékben nemlineáris elemeket (mint aktiváció, inhibició, direkt autokatalízis stb.) tartalmaz. Végül pedig az anyag és az energia cseréje a környezettel nyilvánvalóan nemegyensúlyi körülmények között megy végbe, minthogy a reakciótermékeket az élőlény kiveti magából, vagy pedig a sejt egy más részére szállítja más feladatok elvégzésére (differenciálódás). A fentieket összegezve úgy tűnik, hogy az élő szervezetek kielégítik a disszipatív rendszerek megjelenéséhez szükséges feltételeket. Ennek az elképzelésnek érdekességét növeli, hogy kísérletileg ellenőrizhető.

Két kérdés-típust érdemes itt megkülönböztetnünk: — Vajon van-e szerepük a disszipatív rendszereknek az élőlények valamely aktuális életjelenségében? Ez a kérdés tehát a disszipatív struktúráknak az élet fenntartásában betöltött szerepét érinti.

— Vajon töltöttek-e be lényeges szerepet a disszipatív rendszerek a fejlődés prebiológiai fokán? Ez a kérdés az élet *eredetére* vonatkozik. Egyelőre mindkét esetre vonatkozóan csak szerény jelzésekkel rendelkezünk. Az alábbiakban néhányat tömören ismertetünk.

Az anyagcsere és a disszipatív rendszerek

Néhány enzimes reakciót részletesen tanulmányoztak reakciókinetikai szempontból, különösen a glükolizist. A felvett kísérleti adatok azt jelzik, hogy a reakciókban résztvevő kémiai reagensek koncentrációi oszcillációkat mutatnak időben. Másrészt ez utóbbi rendszer enzimjeinek tulajdonságai és a reakció mechanizmusa elég jól ismertek ahhoz, hogy a glükolízis matematikai modelljének felállításával kísérletezhessünk. Ezen modellek részletes vizsgálata arra utal, hogy a megfigyelt oszcillációkat, mint időben stabil ciklusokat értelmezhetjük (azaz frekvenciájuk és amplitúdójuk időben állandó), amelyek egy nem egyensúlyi stacionárius állapot instabillá válásával jönnek létre. Más szavakkal kifejezve: a glükolízis egy időbeli disszipatív struktúra. Minthogy a sejtek energiaellátása szempontjából lényeges jelenségről van szó, az eredmény alapvető jelentőségű.

Jelenleg több olyan oszcilláció jelenlétére utaló adattal rendelkezünk, amelyek vagy más anyagcsere folyamatokra vagy a proteinnek a sejten belül történő szintézisére vonatkoznak. Itt nem részletezzük ezeket, minthogy reakció-mechanizmusuk a glükolízisnél jóval kevésbé ismert.

Az idegrendszer és a disszipatív rendszerek

Két különböző területen jutottak a kutatók érdekes eredményekre: a membránok gerjeszthetőségében alapszinten lezajló jelenségeknek és a ritmikus aktivitások sejtfeletti szintű jelenségének értelmezésében.

Egy gerjeszthető membrán, amilyenek az idegrendszeri membránok is, legalább kétféle stacionárius állapotban létezhet: egy polarizált állapotban (amely különböző előjelű ion-töltés megjelenését jelenti két oldalán) és egy polarizálatlanban, amely az elsőből a permeabilitás megváltozása

eredményeként jön létre. Újabban Blumenthal, Changeux és Lefever[9] megmutatták, hogy a depolarizált állapot időben diszkontinuus jelenségnek tűnik, amely egy nem egyensúlyi állapot (a polarizált állapot) instabillá válása révén alakul ki. A polarizált állapotban a membrán két oldala között fellépő ionkoncentráció-különbség játssza a rendszert egyensúlyi állapotától távol tartó kényszer szerepét: miatta jöhet létre olyan instabilitás, amely ciklikus depolarizációt eredményezhet.

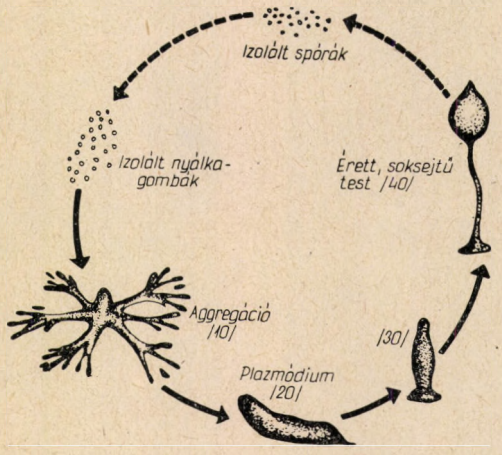
A szervezet általános viselkedését tekintve már régóta tudott, hogy a központi idegrendszer ritmikus tevékenységet is végez, melynek frekvenciája reprodukálható. Ezt a ritmikus aktivitást Boyarsky[10] vizsgálata a legmélyebben. Újabban Cowan és Wilson[11] levezettek egy, az egyidejűleg gerjesztő és inhibáló sejteket is tartalmazó lokalizált neuronok közötti csatolásra és a létrejövő rendszer dinamikájára vonatkozó differenciálegyenlet-rendszert. Kimutatták, hogy ez a rendszer ritmikus jelenségekre képes, amelyek alapfrekvenciája függ az alkalmazott külső stimulustól. Ezek a következtetések, valamint az az elméleti megállapítás, miszerint egy nem egyensúlyi állapot instabilitása szükségszerűen vezet időben periodikus jelenségekre, arra utalnak, hogy az agyhullámok analízisét is időbeli disszipatív rendszerek segítségével kell megkísérelni. Itt említjük Moore[12] munkáját is, aki kimutatta a nem egyensúlyi anyagcserefolyamatok hatását a neuronhalmaz ritmikus aktivitásának modulációjára.

Növekedő és fejlődő disszipatív struktúrák

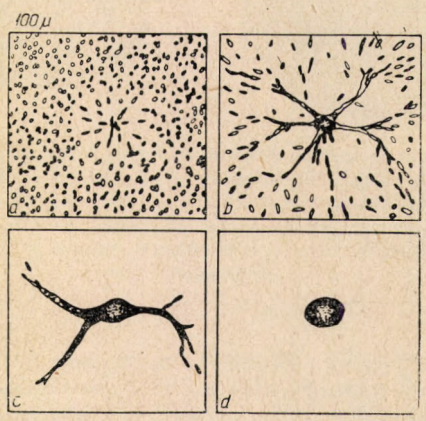
A modern biológia egyik leglelkesítőbb kérdése a fejlődési mechanizmusok megértése. A jelenség bonyolultsága azonban már egy csak viszonylagosan fejlett élőlény esetében is óriási. Mi az a speciális mechanizmus, amely megindítja és amely befejezi az egyed fejlődését? Hogyan koordinálódik a szervezet térben és időben a legkisebb részletekig a fejlődés minden egyes fokán? Hogyan lehet megérteni a sejtek, szövetek, szervek differenciálódását, amelyek a legkülönbözőbb alakban válnak képessé jól meghatározott funkciókra (morfogenezis)? A probléma megoldása nagyrészt a sejtek közötti kommunikáció és a sejtcsoportosulások létrejötte kérdéseinek megértését tételezi fel. Valóban, sejtközötti kapcsolatok híján a magasabb rendű szervezetek önálló sejtekre esnének szét és az egysejtű életformából nem vezetne tovább út. E kapcsolatok specifikusságának és szelektivitásának hiánya pedig a speciális feladatot betöltő szövetek és szervek hiányát okozná (csak sejtek amorf halmaza jöhetne létre). A jelenlegi helyzetben annak megértése, hogyan kooperálnak sejtek milliói és milliárdjai pl. egy emlős központi idegrendszerében lehetetlenül bonyolult, megoldhatatlan feladatnak tűnik. Szerencsére néhány egysejtű lény élete során olyan fejlettségi szintre jut el, amikor az egyes sejtek kolóniákat alkotnak, ahol a sejtek között primitív differenciálódás figyelhető meg. Ilyen szervezettségi fokot találtak egy nyálkagomba-családnál (az Acrasiomycetes osztálynál). Életciklusuk során ezek a nyálkagombák spontán módon kacsolódnak és soksejtes testet alkotnak (6. és 7. ábra). Jelenleg már ismert, hogy ezt a folyamatot egy kémiai anyag, az akrazin idézi elő, amely valójában egy ciklikus adenozin-mono-foszfát (AMP).

Újabban Keller és Segel[13] kimutatták, hogy ennek az aggregációnak a megindulását a sejtek egyenletes eloszlásában fellépő instabilitás okozza (a homogenitás felel meg az aggregáció hiányának). Erre az eredményre úgy jutottak, hogy megállapították: a sejtek akrazintermelése irreverzibilis, az egyensúlytól távoli állapotban lezajló folyamatokat tartalmazó reakció. Más terminológiával élve az aggregációnak legalábbis ezeket az első lépéseit, mint térbeli disszipatív struktúrákat lehet értelmezni.

Csábító ezen következtetések érvényességét kiterjeszteni, feltéve, hogy az Acrasiomycetes osz-



6. ábra. Az Acrasiomycetes-osztálybeli nyálkagombák életciklusa. (A zárójelbe tett számok a fejlődés megindulása után eltelt időt jelzik órában.)



7. ábra. A D. discodeum agregációja folyadék közegben a) a centrum kialakulása b) A nyálkagombák sugár irányú kondenzációja a centrum felé. c) és d) a végső fejlődési szakasz és a pszeudo-plazmodium kialakulása. (Megjegyezzük, hogy a sejtek osztódása az aggregáció után megszűnik.)

tályban megfigyelt jelenségek általában tartalmaznak jelzéseket a magasabb rendű szervezetek kialakulására. Ha ez így lenne, akkor a disszipatív struktúrák koncepciójával lehetne egységbe foglalni a fejlődés elképzelhetetlenül változatos, különböző folyamatait. Összefoglalva az eddigieket, úgy tűnik, hogy a fontos biológiai folyamatok tartalmaznak olyan instabilitásokat, amelyek csak egyensúlytól távol lépnek fel.

Térjünk át a prebiotikus szakasz kérdéseire. A polipeptidek nem biológiai, katalitikus felületeken kondenzációval történő szintézisében a disszipatív rendszerek esetleges szerepét már Katchalsky[14] és munkatársai hangsúlyozták. De a legalapvetőbbnek tűnő kérdést bizonyára Eigen[15] tanulmányozta a biológiai szempontból érdekes molekulák „népesség"-fejlődésének és a genetikus kód spontán, instabilitások során keresztül történő kialakulásának kérdését vizsgálva.

Ezzel kapcsolatban legalább két kérdés merül fel:

— A biológiailag érdekes polimerek keletkezése, amelyek konkrét funkciók betöltésére alkalmasak, olyanokra amelyekre a monomerek semmiképpen sem képesek. Egy jól ismert példa a saját vagy más makromolekulák reprodukálásához szükséges „templát" szerepét betölteni képes polimerek szintézise.

— Feltéve, hogy a biológiai szempontból érdekes molekulák reprodukciója megoldott kérdés, hogyan fejlődik tovább egy ilyen típusú molekulákból álló rendszer?

Az első kérdés talán egyszerűbben közelíthető meg. Legalábbis modelleken kimutatható (Goldbeter, Nicolis, Babloyantz[16]), hogy a másolással történő szintézis (pl. a nukleinsavaké templáton) csak az egyensúlytól egy kritikus távolságra válik dominánssá a lineáris polimerizáció szokásos mechanizmusával szemben, és ez a pont éppen az első instabilitás bekövetkezésével egyezik.

Az Eigen által végzett vizsgálatok a 2. kérdéskörre vonatkoznak. Ez a kérdés nagyon összetett: a hibákra vezető másolási jelenségek termodinamikai szempontból lényegében új típusú fluktuációt jelentenek. Ezek a fluktuációk kihalhatnak vagy felerősödhetnek. A fejlődés instabilitási „katasztrófák" sorozatának tekinthető: a fluktuációk addig erősödnek, amíg létre nem jön egy bizonyos típusú makromolekulákkal jellemezhető állapot, amely már elég stabil az önmagához képest létrejövő fluktuációkkal szemben. Eigen cikkében kimutatja, hogy a csak proteinekből (polinukleotidok nélkül) felépülő rendszerben az instabilitások a végtelenségig jellemzők maradnak. A proteinek kölcsönhatása a polinukleotidokkal azonban lehetővé teszi, hogy a rendszer genetikus kóddal jellemezhető állapotba kerüljön, amely igen nagy stabilitást mutat a kinetikai hibákkal szemben, különösen a templáton történő replikáció folyamatát tekintve.

Ha Eigen elmélete igaznak bizonyulna, akkor ez az alapkutatás egy lényeges területévé válnék, mivel először látnánk konkrét példát egy magasan szervezett rendszernek a fizika törvényei alapján (azok segítségével és nemcsak azokkal konzisztensen) történő létrejöttére. Lehetséges, hogy agyunk „legnemesebb" funkcióinak eredetét is, mint pl. a nyelvét, az Eigen-elmélet alapján lehet felvázolni. Ez az eredmény egy váratlan szintézisét adná a molekuláris biológia megszokott strukturalista statikájának és a termodinamikának. Boltzmann-féle rendezettség, disszipatív rendszerek, kód; ezek azok a láncszemek amelyek a termodinamikai egyensúlytól elvezetnek a biológiai rendig.

6. Összhang a véletlen és szükségszerű között

Foglaljuk össze következtetéseinket. Az életben többé nem a fizikai törvényekkel mit sem törődő jelenséget vagy a második főtétel ellen küzdő Maxwell-démonok művét látjuk, hanem egy olyan folyamat eredményét, amely az élő anyag kémiai összetétele és az abból származtatható reakciókinetikai szabályok révén extrém rugalmassággal követi a fizika törvényeit. A megértésnek többé nem akadálya az a tény, hogy a biológiai struktúrák megértéséhez lényegesnek tűnik a Boltzmann-féle rendezettség feladása, hiszen a jellemző biológiai folyamatok az egyensúlyi állapotoktól távol folynak le. Nem egyetlen instabilitás, hanem instabilitások sora tette lehetővé az áthatolást az élő és élettelen között elterülő senkiföldjén. Ezek egyes lépcsőfokainak megértése még csak napjainkban kezdődött el.

A biológiai rendnek ez a koncepciója automatikusan vezet el a véletlen és a szükségszerű szerepének még árnyaltabb megértéséhez, hogy Jacques Monod jól ismert művének címével jelezzük a kérdéskört. A fluktuációk, amelyek a rendszer számára lehetővé teszik az egyensúlyi környezet elhagyását, véletlenszerű elemet képviselnek. Ugyanakkor szükségszerűen megjelenik a közegben fellépő instabilitás, amely lehetővé teszi ennek a fluktuációnak a felnövekedését. A véletlen és a szükségszerű kooperációja valósul meg itt az ellentétük helyett.

Hogy egy Monod által megfogalmazott példán mutassuk ezt be, „tekintsünk egy kavicsot, amelyet a kezemben tartok". Ami struktúráját tekintve lényeges, az levezethető a termodinamikai és a deformálható közeget jellemző mechanikai elvekből, azaz a Boltzmann-féle rendezettségi elvből. Az igaz, hogy ezek az elvek a kavicsot alkotó atomok adott pillanatban elfoglalt helyének kiszámítására nem alkalmasak, de mi értelme lenne egy ilyen számításnak?

Azt hiszem, a bioszférával analóg a helyzet. A disszipatív rendszerek fogalmának bevezetése, azok az instabilitások, amelyeket ez magával von, arra ad reményt, hogy az élet lényegét kevés számú „premissza" segítségével meg lehet ragadni.

Természetesen más bolygókon az élet lényegesen más lehet, mivel a disszipatív rendszerek őrzik annak a fluktuációnak az emlékét, amely azokat létrehozza. De nem látszik teljesen elrugaszkodott-

nak az a gondolat, hogy az élet jelensége éppúgy előrelátható, mint az anyag kristályos vagy folyékony állapota.

HIVATKOZÁSOK

1. R. H. Miller, K. H. Prendergast Astrophys. J. *151*, 699, (1968)
2. R. H. Miller, K. H. Prendergast, W. J. Quirk University of Chicago Report- COO – 614 – 72
3. I. Prigogine, G. Severne Physica *32*, 1376, (1966)
4. W. E. Thirring Ann. Phys. *16*, 96 (1961)
5. G. de Vaucouleurs Science *167*, 1203 (1970)
6. M. Haggerty Physica *50* 391 (1970)
7. S. Chandrasekhar Hydrodinamic and Hydromagnetic Stability, Clarendon Press, Oxford (1961)
8. M. Herchkowitz – Kaufman C. R. Acad. Sc. *270* (1970) A. M. Zsabotyinszkij, Oszcilláló folyamatok biológiai és kémiai rendszerekben (oroszul) Moszkva, 1967
9. R. Blumenthal, J. R. Changeux, R. Lefever J. Membrane Biol. *2* 351 (1970)
11. L. L. Boyarsky Curr. Mod. Biol. *1* 39 (1967)
11. H. R. Wilson, J. D. Cowan Excitatory and Inhibitory Interactions in Localized Populations of Model Neurons, Univ. of Chicago preprint 1971
12. W. J. Moore, Univ. of Indiana preprint, 1971
13. E. F. Keller, L. A. Segel, J. Theor. Biol. *26*, 399 (1970)
14. M. Pächt-Horwitz, J. Berger, A. Katchalsky, Nature, *228* 636, (1970)
15. M. Eigen, Selforganization of Matter and the Evolution of Biological Macromolecules, Naturwissenschaften *58*, 465 (1971)
16. A. Goldbeter, G. Nicolis, A. Babloyantz (közlés alatt)

MULTIPERIFERALIZMUS, MULTIPERIFERIÁLIS MODELLEK

Szegő Károly, Tóth Kálmán
Központi Fizikai Kutató Intézet, Budapest

1. *Bevezetés*

„E cikkben a nagyenergiás (GeV feletti tartomány) szórási folyamatok egy elméleti modelljét tárgyaljuk. A kísérleti információk néhány karakterisztikus vonása:

a) A teljes hatáskeresztmetszet energiafüggetlen, vagy legalábbis lassan változik az energia függvényében;
b) A keletkezett részecskék száma lassan nő az energiával;
c) A keletkezett részecskék túlnyomó része pion;
d) A keletkezett részecskék átlagos transzverzális impulzusa kicsi (300 MeV), és energiafüggetlen."

E mondatokkal kezdődik Amati, Fubini és Stanghellini alapvető cikke 1962-ben a multiperiferiális modellekről. Azóta eltelt 10 év és az energiatartomány két nagyságrenddel nagyobb, de a szórási kép kvalitatív tulajdonságai nem változtak. Mivel ezeket a multiperiferiális modell (MPM) képes reprodukálni, érthető a modell iránt ma is meglevő érdeklődés.

Az erős kölcsönhatási szórás-folyamatok leírását célul kitűző elméleti próbálkozások között a MPM-ek alapvetően azzal jellemezhetők, hogy feltevéseik között első helyen az unitaritás áll. A MPM-ek formálisan mindig egy integrálegyenletet jelentenek a kvázielasztikus szórási amplitudó A(s, t) abszorptív részére vonatkozóan. Az integrálegyenlet leszármaztatásához legfőbb segédeszköz az unitaritási reláció:

$$A(s,t) = \sum_{n=2}^{\infty} \langle p_1, p_2 | T | q_1, q_2, \ldots q_n \rangle \langle q_1, \ldots | T^* | p_3, p_4 \rangle \qquad \text{(I.1.1)}$$

ahol $s = (p_1+p_2)^2$, $t = (p_1-p_3)^2$. Az A(s, t)-re leszármaztatott integrálegyenlet $t = 0$-nál magát a teljes hatáskeresztmetszetet adja:

$$\sigma_{tot}(s) = \frac{1}{2q\sqrt{s}} A(s,0) \qquad \text{(I.1.2)}$$

A multiperiferiális dinamika természetesen további, jóval bizonytalanabb feltevésekre épül.

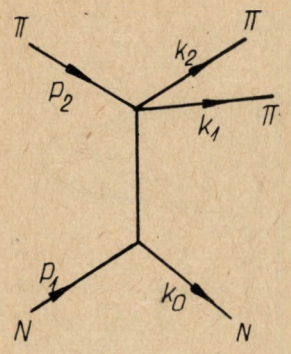
Az első MPM kidolgozása Amati, Bertocchi, Fubini, Stanghellini és Tonin nevéhez fűződik (ABFST modell). Ez az egyszerű periferiális modell általánosítása, amely szerint nagyenergián az egy-pion cserével járó folyamatok dominálnak. Így pl. a $\pi N \to \pi\pi N$ szórásfolyamat amplitúdója nagyenergián közelítőleg:

$$T(p_1, p_2, k_0, k_1, k_2,) \sim g_{NN\pi} \frac{T_{\pi\pi\to\pi\pi}(p_2, q, k_1 k_2)}{q^2 - \mu^2} \qquad \text{(I.1.3)}$$

ahol μ a pion tömeg, $g_{NN\pi}$ az (off-shell) pion-nukleon csatolási állandó, $T_{\pi\pi\to\pi\pi}$ pedig (off-shell) $\pi\pi$ szórási amplitúdó.

Az MPM-ek másik változata a multi-Regge típusú modellek. Ezekben a kicserélt elemi objektum nem részecske, hanem reggeon, így pl. az (I.1.3) amplitúdóban $g_{NN\pi}$ helyét NN-reggeon vertex, $T_{\pi\pi\to\pi\pi}$ helyét pedig π + reggeon $\to \pi\pi$ szórási amplitúdó foglalja el.

A XI. Elméleti Fizikai Iskolán tartott előadás, 1975.



1. ábra

A két fő típuson belül a MPM-ek számtalan válfaja létezik, sőt, vannak részecske és reggeon cserét egyaránt feltételező modellek is.

II. 1. *Az ABFST —modell* [1]

A MPM-t először pion-szórásra fogalmazzuk meg. A G-paritás megmaradása miatt csak páros számú pion keletkezhet a kölcsönhatás után. Két alapvető feltevést használunk:

* az egy-pion cserék nagyenergián dominálnak,

** elhanyagolhatjuk az amplitúdóknak a kicserélt virtuális részecske tömegétől való függését.

A * feltevés alapján az $1 + 2 \to 1 + \ldots + (2n+2)$ amplitúdót ún. „$n-ed$ rendű multiperiferiális gráffal" helyettesítjük:

$$T(p_1, p_2, k_i) \sim \qquad (II.1.1)$$

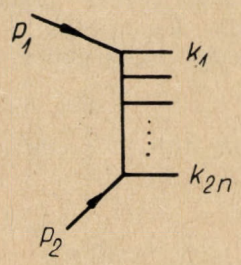
$$\sim \frac{T^R(p_1, q_1, k_{0i})\, T^R(q_1, q_2, k_{1i}) \ldots T^R(q_n\, q_2, k_{ni})}{\prod\limits_i (q_i^2 - \mu^2)}$$

ahol T^R off-shell $2\pi \to 2\pi$ szórási amplitúdók. Az $s = (p_1+p_2)^2$ teljes energia és az $s_{ij} = (k_i + k_j)^2$ szubenergiák közötti $\sqrt{s} \geq \sqrt{s_{ij}} + \sqrt{s_{kl}}$ összefüggés azt mutatja, hogy T^R-hez tartozó szubenergiák kicsik a teljes energiához képest a szórt részecskék impulzusának legvalószínűbb eloszlása (l. III. 2. rész) esetén.

$A_n(s,t)$-re (II. 1.1) segítségével a következő kifejezést írhatjuk fel (a jelöléseket a 2. ábra mutatja):

$$A_n(s,t) = \int \Big[\prod_{i=1}^{2n} d^4k_i\, \delta(k_i^2 - \mu^2)\, \Theta(k_{i0}) \Big] \cdot$$

$$\cdot |T|^2\, \delta^4(p_1 + p_2 - \Sigma k_i) \qquad (II.1.2)$$



2. ábra

Bevezetve az

$$A^R(s,t) = \int d^4k_1 \delta(k_1^2 - \mu^2)\, \Theta(k_{10})\, d^4k_2 \delta(k_2^2 - \mu^2) \cdot$$

$$\cdot \Theta(k_{20})\, \delta^4(p_1 + p_2 - k_1 - k_2)\, |T^R|^2 \qquad (II.1.3)$$

jelölést és felhasználva a

$$\delta^4(p_1 + p_2 - \Sigma k_i) = \int \prod_i d^4q_i \delta^4(p_1 + q_1 - k_1 - k_2) \cdot$$

$$\cdot \delta^4(-q_1 + q_2 - k_3 - k_4) \ldots \delta^4(-q_4 + p_2 - k_{2n-1} - k_{2n}) \qquad (II.1.4)$$

azonosságot, (II. 1.2)-t átírhatjuk:

$$A_n(p_1\, p_2\, p_1'\, p_2') = \int \Pi\, d^4q_i \cdot$$

$$\cdot \frac{1}{(q_i^2 - \mu^2)\big((q_i - \Delta)^2 - \mu^2\big)} A^R\big((p_1 + q_1)^2, t\big) \cdot$$

$$A^R\big((q_2 - q_1)^2, t\big) \ldots A^R\big((q_n - p_2)^2, t\big) =$$

$$= \int \Pi\, d^4q_i \frac{1}{(q_i^2 - \mu^2)\big((q_i - \Delta)^2 - \mu^2\big)} \cdot$$

$$ds_0 \delta\big(s_0 - (p_1 + q_1)^2\big) \ldots ds_n \delta\big(s_n - (p_2 - q_n)^2\big) \cdot$$

$$\cdot A^R(s_0, t) \ldots A^R(s_n, t) \qquad (II.1.5)$$

A teljes hatáskeresztmetszet ennek alapján:

$$\sigma(s) = \frac{1}{2q\sqrt{s}} \sum_n A_n(s,0) = \frac{1}{2q\sqrt{s}} \sum_n \int \Pi\, d^4q_i \cdot$$

$$\cdot \frac{1}{(q_i^2 - \mu^2)} \Pi\, ds_j\, \delta\big(s_j - (\ldots)\big) \frac{\sigma^R(s_j)}{\Phi_j}$$

$$(II.1.6)$$

ahol Φ_i az s_i energiákhoz tartozó fluxus faktor.

Mielőtt tovább vizsgálnánk a modell tulajdonságait, foglalkozzunk avval, hogy az alapfeltevések milyen korlátozásokat jelentenek. Az */ feltevés egyrészt az egyéb részecske cserék elhagyását jelenti, másrészt az ún. diffraktív szórás elhanyagolását jelenti. (Diffraktív a kölcsönhatás, ha azt nem rezonanciák közvetítik, hanem valamilyen értelemben az objektum „egésze" részt vesz benne. Regge-pólus nyelven a diffraktív kölcsönhatást Pomeron csere, a nem diffraktivot az egyéb Regge-pólusok cseréje írja le.) Megjegyezzük azonban, hogy a modell a kvázielasztikus szórási amplitúdóhoz ad diffraktív járulékot is, valamint azt, hogy a modell általánosítható úgy, hogy a diffraktív járulékot is figyelembe vegye [1, 2]. E kérdésekkel e cikkben nem foglalkozunk.

A **/ feltevést enyhíthetnénk Valójában csak arra van szükségünk, hogy A^R ne növekedjen növekvő q^2 esetén, l. alább

Most az A_n mennyiségre rekurziós egyenletet és annak segítségével A-ra integrálegyenletet vezetünk le, a $t = 0$ azaz $p_1 = p_1'$, $p_2 = p_2'$ esetre

szorítkozva. A (II. 1.6) egyenlet segítségével látható, hogy

$$A_n(p_1\,p_2) = \int ds_0\, A^R(s_0, 0) \int d^4q \cdot$$
$$\cdot \frac{1}{(q^2 - \mu^2)^2} A_{n-1}(p_1, q) \cdot \delta\big((q - p_2)^2 - s_0\big) \qquad (II.1.7)$$

E rekurrencia — reláció szépséghibája, hogy — mivel az integrálás q^2 minden értékére kiterjed — off-shell amplitúdók szerepelnek benne. Definiáljuk $A(s,u)$ off-shell amplitúdókat (u az elfolytatott tömeg négyzete) a következő módon:

$$A(p,p') = \int A(s, u)\, ds \delta\big(s - (p + p')^2\big)\, du \delta(u + p'^2) \qquad (II.1.8)$$

A (II. 1.7) képlet segítségével felírhatjuk:

$$A_n(s, u) = \int ds_0\, A^R(s_0) \int ds' du' \cdot$$
$$\cdot \frac{1}{(u' + \mu^2)^2} A_{n-1}(s', u') \cdot Q(s, u, s', u', s_0) \qquad (II.1.9)$$

ahol

$$Q(s, u, s', u', s_0) = \int d^4q\, \delta(q^2 + u)\, \delta\big((p_1 - q)^2 - s_0\big) \cdot$$
$$\cdot \delta\big((q + p_2)^2 - s'\big) = \frac{\pi}{2\sqrt{S^2 + 4\mu^2 u}} \cdot$$
$$\cdot \Theta(uS'^{12} + uS^2 - \mu^2 S_0^2 - SS'S_0 - 4\mu^2 uu'),$$
$$S = s + u - \mu^2,\ S' = s' + u' - \mu^2,\ S_0 = s_0 + u + u' \qquad (II.1.10)$$

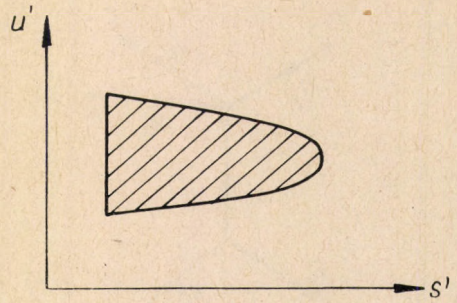
Felhasználva az $A(s,u) = \sum_n A_n(s, u)$ összefüggést (II. 1.9)-ből $A(s,u)$-ra az alábbi integrálegyenlet adódik:

$$A(s, u) = A^R(s) + \int ds_0 A^R(s_0) \int ds' du'$$
$$\cdot \frac{1}{(u' + \mu')} \cdot A(s', u') Q(s', u', s, u, s_0) \qquad (II.1.11)$$

II. 2. *Nagyenergiájú viselkedés az ABFST modellben*

A (II.1.9) rekurziós reláció és a (II.1.11) integrálegyenlet tulajdonságainak vizsgálatával csak nagyenergiás közelítésben foglalkozunk, azaz ha $s >> u$ és $s >> \mu^2$.

A Q függvény által megengedett integrálási tartományt a 3. ábra mutatja.



3. ábra

Mint (II.1.10)-ből leolvasható $S'_{\max} = s - 2\sqrt{ss_0}$,

(II.2.1)

$$u'_{\substack{\max\\\min}} = \frac{s \cdot s'}{2} \pm \sqrt{\frac{s - s'}{2} - s's_0 - \frac{s'}{s} u(s - s')} =$$
$$= \begin{matrix} \nearrow \\ \searrow \end{matrix} \frac{s - s'}{s'} \left(u + \frac{s_0}{1 - s'/s}\right) \qquad (II.2.2)$$

A közelítésnél s mellett s_0-t elhagytuk, feltételezve, hogy $A^R(s_0)\,\frac{1}{s_0}$ -nál gyorsabban csökken és így ha $s \sim s_0$, az integrál értéke A^R miatt kicsi. A (II.1.10)-ben szereplő második Θ-függvény miatt $s\text{-}s' = (\sqrt{s} - \sqrt{s'})(\sqrt{s} + \sqrt{s'}) > \sqrt{ss_0}$.

A fentiek szerint (II.1.11) s nagy értékeire így alakul:

$$A_n(s, u) = \frac{1}{s} \int ds_0 A^R(s_0) \int_{S'_{\min}}^{S'_{\max}} ds'' \int_{u'_{\min}}^{u'_{\max}} du'' \frac{A_{n-1}(s'', u'')}{(u'' + \mu^2)^2} \qquad (II.2.3)$$

A képletből látható, hogy A_n u-nak csökkenő függvénye (ellenkező esetben az integrál divergens) ezért az u-ra vonatkozó integrál a felső határ értékére érzéketlen.

Feltéve, hogy $A_0 = A^R$, a (II.2.3) képlet szerint

$$A_1(s) \approx \frac{\lambda^2}{s} + \sigma\left(\frac{1}{s^2}\right)$$

illetve

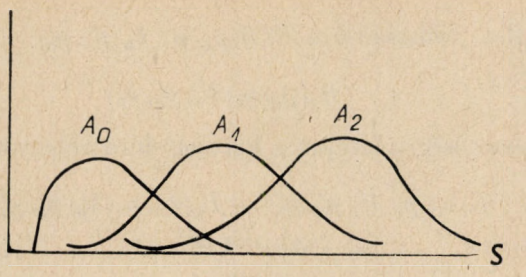
$$A_n(s) \sim \frac{\lambda^2}{s} \frac{(\lambda \log s)^{n-1}}{(n-1)!}$$

ahol $$\lambda = \int ds_0 A^R(s_0) \qquad (II.2.4)$$

Mint a 4. ábra is mutatja, s növekvő értékei mellett egymás után jutnak nagyobb súlyhoz a $2\pi \to 2\pi n$ parciális amplitúdók.

A (II.1.11) egyenlet ugyanebben a limitben az

$$A(s, u) = \frac{1}{s} \int ds_0 A^R(s_0) \int_{s_{\min}}^{s - 2\sqrt{ss_0}} ds' \int_{\frac{s'}{s}\left(u + \frac{s_0}{1 + s'/s}\right)}^{s - s'} \cdot$$
$$\cdot\, du' \frac{A(s', u')}{(u' + \mu^2)^2} \qquad (II.2.5)$$



4. ábra

alakot ölti, hiszen $A^R(s) \to 0$, ha a $s \to \infty$. Megjegyezzük, hogy az integrálegyenlet a határok változtatására érzékenyebb, mint a (II.1.9) képlet. Megmutatható (a konkrét megoldás segítségével), hogy esetünkben a különbség elhanyagolható. Ugyanezért változtathatjuk (II.2.5)-ben az s' integrál határait $s_{\min} = 0$-ra, $s_{\max} = s$-re; $u'_{\max} = \infty$-re. Így azonban az integrál invariáns az $s \to cs, s' \to cs'$ helyettesítésre, és emiatt a megoldás

$$A(s,u) = s^{\alpha}\varphi(u) \qquad \text{(II.2.6)}$$

alakban kereshető. Ezt visszaírva, a

$$\varphi(u) = \int ds_0 A^R(s_0) \int_0^1 x^{\alpha} dx \int_{x\left(u+\frac{s_0}{1-x}\right)}^{\infty} \cdot$$

$$\cdot du' \frac{\varphi_\alpha(u')}{(u'+\mu^2)^2} \qquad (II.2.7)$$

egyenlethez jutunk, ahol $x = s'/s$.
Az egyenlet Fredholm típusú, megoldása diszkrét $\alpha\left(A^R(s)\right)$ sajátértékek mellett van, így (II.2.6) megoldás a teljes megoldás s-ben vezető aszimptotikus tagjának tekinthető.

A $\varphi_\alpha(u)$ függvények meghatározásával nem foglalkozunk. A modellnek két lényeges tanulsága van:

— a hatáskeresztmetszetre s^α típusú viselkedést ad;

— az α paramétert az $\alpha\left(A^R(s)\right)$ megoldáson keresztül az A^R alacsonyenergiás adatok határozzák meg.

A $\varphi_\alpha(u)$ függvény fizikai jelentésével kapcsolatban [1]-re utalunk.

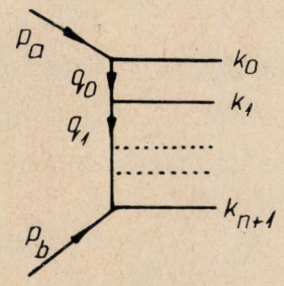
Az ABFST modell részletes ismertetése után a multiperiferalizmus általános programjának leírásával foglalkozunk. Chew, Goldberger és Low nyomán az összes MPM-re jellemző alapfeltevéseket mondjuk ki, amelyek egy igen általános integrálegyenlethez vezetnek. A konkrét MPM-ek ennek speciális esetei. Megvizsgáljuk az alapfeltevésekből a szórásfolyamatok eredményeire vonatkozó legfontosabb jóslatokat, egyúttal kritikáját is adva a MPM-eknek.

III. 1. *A Chew—Goldberger-Low (CGL) egyenlet* [3]

A leírni kívánt folyamat legyen (spintelen) nukleon-nukleon szórás. A végállapotban a két nukleonon kívül pionokat engedünk meg.

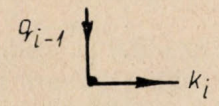
a) A multiperiferiális szórási amplitúdó megalkotásához a folyamathoz egy tipikus diagrammot rendelünk:

$$p_a^2 = p_b^2 = k_0^2 = k_{n+1}^2 = m^2$$



5. ábra

A lánc két szélétől eltekintve, ahol a bejövő illetve kimenő nukleonok helyezkednek el, *egymással azonos láncszemeket képzelünk el.* Az i-edik láncszem



6. ábra

A végállapotbeli $k_1 \ldots, k_n$ impulzusok egy, esetleg több pionhoz tartoznak. (Az ABFST modellben pl. két pion együttes impulzusa volt.) A q_{i-1} impulzus lehet egy részecske, egy reggeon vagy még általánosabb objektum impulzusa.

b) A szórási amplitúdó megalkotásakor feltételezzük, hogy a *láncszemek csak közeli*, például csak a közvetlen, *szomszédokkal vannak korrelálva.* Azaz az i-edik láncszemet a $G(q_{i-1}, q_i, q_{i+1})$ függvénnyel írjuk le. A G függvény alakja i-től független, a láncszem helyzetét a láncon belül csak q_i impulzusok jellemzik, A lánc két végéhez az a, illetve b részecskét a $G_a(p_a, q_0)$ és $G_b(q_{n-1}, q_n, p_b)$ függvényekkel csatoljuk. A rugalmas szórási amplitúdót $G_a(p_a, q_0) \cdot G_b,(p_a, q_0, p_b)$ adja.

c) Az n láncszemet tartalmazó amplitúdót így írjuk le:

$$M(p_a, p_b; k_0 \ldots k_{n+1}) = G_a(p_a, q_0) \ldots$$

$$G(q_{i-1}, q, q_{i+1}) \ldots G_b(q_{n-1}, q_n, p_b) \qquad \text{(III.1.1)}$$

Feltevésünk szerint a $k_1, \ldots k_n$ impulzusokhoz azonos objektumok tartoznak, úgyhogy az (III.1.1) amplitúdót ki kellene egészítenünk az ezek permutációiból eredő tagokkal. Az (III.1.1) amplitúdó csak akkor jó közelítés, ha egy bizonyos permutációnak megfelelő tag sokkal nagyobb — és ez éppen (III.1.1) — mint az összes többi. Az előző pontban feltételezett rövid távú korrelációkkal együtt az (III.1.1) amplitúdó elfogadása a multiperiferalizmus két legfontosabb feltételezése.

A $p_a + p_b \to p'_a + p'_b$ rugalmas amplitúdójának abszorptív része az unitaritás és (III.1.1) felhasználásával:

$$\sum_{n=0}^{\infty} A_n(p_a, p_b, p'_a, p'_b) = \sum_{n=0}^{\infty} \int d^4k_0 \delta^{(+)}(k_0^2 - m^2) \cdot$$

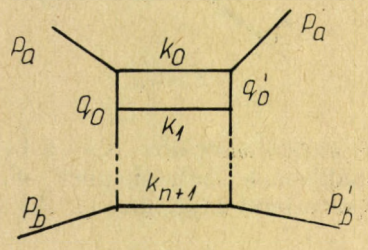
$$\cdot \int d^4k_{n+1} \delta^{(+)}(k_{n+1}^2 - m^2) \cdot \prod_i \int d^4k_i \delta^{(+)}(k_i^2 - \mu^2) \cdot$$

$$\cdot \delta^4(p_a + p_b - \sum_{j=0}^{n+1} k_j). \qquad \text{(III.1.2)}$$

$$G_a^*(p'_a, q'_0) G_a(p_a, q_0) \ldots G^*(q'_{i-1}, q'_i, q'_{i+1}) \cdot$$

$$G(q_{i-1}, q_i, q_{i+1}) \ldots G_b^*(\ \ ) G_b(\ \ )$$

ahol az összeg egy tagjához rendelhető tipikus unitaritási diagramm:



7. ábra

(Fogalmazásunk itt kissé nagyvonalú. A (III.1.2 egyenlőség csak akkor jelenti minden további nélkül az unitaritási összefüggést, ha a végállapotbeli objektumok egyszerű részecskék. Egyéb esetek általános vizsgálata helyett konkrét modellekre utalunk.)

Az eddigiek alapján egyszerű technikai feladat a CGL integrál egyenlet levezetése. Először is egy $B_n(p_a, p_b, k_0; p'_a, p'_b)$ segédmennyiséget vezetünk be a következő defínicióval:

$$B_n(p_a, p_b; k_0; p'_b, p'_b) = \Pi \int d^4k_i \delta^{(+)}(k_i^2 - \mu^2) \cdot$$

$$\delta^{(+)}(k_{n+1}^2 - m^2).$$

$$G^*(q'_{i-1}, q'_i, q'_{i+1}) G(q_{i-1}, q_i, q_{i+1}) G_b^*(q'_{n-1}, q'_n, p'_b) \cdot$$

$$\cdot G(q_{n-1}, q_n, p_b)$$

ahol

$$k_0 = p_a - q_0 - p'_a - q'_0$$

$$k_i = q_{i-1} - q_i = q'_{i-1} - q'_i$$

$$k_{n+1} = q_n + p_b = q'_n + p'_b$$

Nyilvánvaló, hogy

$$A_n(p_a, p_b; p'_a, p'_b) = \int d^4k_0 \delta^{(+)}(k_0^2 - m^2) G_a^*(p'_a, q_0) \cdot$$

$$\cdot G_a(p_a, q_0) \cdot B_n(p_a, p_b; k_0; p'_a, p'_b)$$

Nem okoz nehézséget a B_n mennyiségekre rekurziós összefüggést készíteni:

$$B_0(p_a, p_b; k_0; p'_a, p'_b) = G_b^*(p'_a, q'_0, p'_b) G_b(p_a, q_0, p_b) \cdot$$

$$\cdot \delta^+\left((p_a + p_b - q_0)^2 - m^2\right);$$

$$B_n(p_a, p_b; k_0; p'_a, p'_b) = \int d^4k_1 \delta^{(+)}(k_1^2 - \mu^2) \cdot$$

$$G^*(p'_a, q'_1, q'_2) G(p_a, p_1, q_2) \cdot B_{n-1}(q_1, p_b; k_1; q'_1, p_b^1),$$

$$n = 1,2 \ldots$$

Ezt felhasználva a $B(p_a, p_b; k_0, p'_a, p'_b) = \sum_{n=0}^{\infty} \cdot$

$$\cdot B_n(p_a, p_b; k_0; p'_a, p'_b)$$

mennyiségre kapjuk a keresett integrálegyenletet:

$$B(p_a, p_b; k_0, p'_a, p'_b) = B_0(p_a, p_b; k_0; p'_a, p'_b) +$$

$$+ \int d^4k_1 \delta^{(+)}(k_1^2 - \mu^2). \qquad \text{(III.1.3)}$$

$$G^*(p'_a, q'_1, q'_2) G(p_a, q_1, q_2) B(q_1, p_b; k_1; q'_1, p'_b)$$

Ha a q_i impulzusú objektumokat (off-shell) pionoknak gondoljuk, a $k_1, \ldots, k_n$ impulzusokhoz pion-párokat rendelünk, akkor a G függvények lényegében (off-shell) $\pi\pi$ szórási amplitudókat jelentenek:

$$G(q_{i-1}, q_i, q_{i+1}) = \frac{T_{\pi\pi \to \pi\pi}}{q_{i-1}^2 - \mu^2}, \quad i = 0,1 \ldots n$$

$$G_a(p_a, q_0) = g_{NN\pi} \quad G_b(q_{n-1}, q_n, p_b) = \frac{g_{NN\pi}}{q_n^2 - \mu^2}$$

és ABFST típusú modellhez jutunk.

Ha q_i reggeon impulzus, k_i, $i = 1, \ldots n$, pedig egyszerű pion impulzus, akkor multi-Regge típusú modellt kapunk, amelyben

$$G(q_{i-1}, q_i, q_{i+1},) = \beta\,(q_i, q_{i+1})(q_{i-1} - q_{i+1})^{2\alpha(q_i^2)}$$

$$G_a(p_a, q_0) = \beta_a(p_a, q_0), \; G_b(q_{n-1}, q_n, p_b) =$$

$$\beta_b(q_n, p_b)(q_{n-1} - p_b)^{2\alpha(q_n^2)}$$

ahol β reggeon-reggeon-részecske, β_a és β_b pedig részecske-részecske-reggeon vertexet jelöl, α pedig Regge-trajektória.

A multiperiferiális dinamika „modell-független" következményeinek azokat szokás tekinteni, amelyek az (III.1.3) integrál egyenlet általános struktúrájából, a G függvények specifikálása nélkül adódnak. Ezek közé tartozik pl. a két-részecske szórási amplitúdó Regge-viselkedése, az egyrészecske inkluzív spektrumban megfigyelt limiting fragmentáció és pionizáció jelensége, amelyeket a technikailag egyszerűbben kezelhető ABFST integrál egyenlet segítségével meg fogunk mutatni.

A következőkben a *b*, és *c*, pontban tett feltevéseket vizsgáljuk meg részletesebben.

III.2. *Strong ordering* [4, 5]

A III.1. *c*, alapfeltevéssel foglalkozunk, amelynek következtében az unitaritási összegből elhagyhattuk az interferencia tagokat. A feltevést a következő módon fogalmazzuk meg:

Az $M(p_a, p_b; k_0, \ldots, k_{n+1})$ mátrixelem a fázistér azon tartományában a legnagyobb, ahol

III. 2 a, A multiperiferiális láncszemek közötti $t_i = q_i^2$, $i = o, 1, \ldots, n$, impulzusátadások kicsik;

III. 2 b, Az összes $s_{i,i+1} = (k_i + k_{i+1})^2$ szubenergiák nagyok.

Belátjuk, hogy ezekből a szekunderek impulzusaira a következő megszorítások adódnak:

III.2 c, Az összes $|\underset{\sim}{k}_i|$ transzverzális impulzus kicsi:

III.2 ii, A $k_i^+ = k_i^0 + k_i^3$ longitudinális impulzusokra igaz, hogy

$$\frac{k_i^+}{k_{i+1}^+} \gg 1 .$$

Ez utóbbi tulajdonság azt jelenti, hogy az (III.1.1) amplitúdónak megfelelő multiperiferiális lánc (5. ábra) mentén a k_i^+ impulzusok szigorú nagyság szerinti sorba rendezhetők. Erre vonatkozik a strong ordering elnevezés.

Megmutatjuk, hogy III. 2 a, b,-ből következik a $|\underset{\sim}{k}_i|$ transzverzális impulzusok korlátossága.

Az impulzuskomponensekre a következő jelölés lesz célszerű:

$$p^\mu = (p^0, p^1, p^2, p^3) \equiv (p^+, \underset{\sim}{p}, p^-)$$

ahol $p^\pm = p^0 \pm p^3$, $\underset{\sim}{p} = (p^1, p^2)$. Nyilvánvalóan $p_\mu p^\mu = p^+ p^- - \underset{\sim}{p}^2$, z-tengely irányú Lorentz-transzformációknál $\underset{\sim}{p}$ invariáns, míg $p^+ \to e^\pm \xi p^+$.

Legyen $p_a^2 = p_b^2 = k_0^2 = k_{n+1}^2 = m^2$, $k_i^2 = M^2$, $i = 1,2, \ldots, n$, $m > M$,

és legyen $(p_a + p_b)^2 = s$ nagy.

Tömegközépponti rendszerben, z-tengellyel párhuzamosan bejövő részecskék esetén

$$p_a \sim \left(\sqrt{s}, \underset{\sim}{0}, \frac{m^2}{\sqrt{s}}\right),$$

$$p_c \sim \left(\frac{m^2}{\sqrt{s}}, \underset{\sim}{0}, \sqrt{s}\right).$$

Legyen i tetszőleges, $Q_1 = \sum_{r=0}^{i} k_r$, $Q_2 = \sum_{r=1}^{n+1-i}$ $\cdot k_{i+r}$. Mivel Q_1, Q_2 pozitív időszerű vektorok, biztos, hogy $Q_{1,2}^\pm > 0$. Az impulzusmegmaradásból következik, hogy

$$\underset{\sim}{Q}_1 + \underset{\sim}{Q}_2 = 0$$

$$\sqrt{s} \simeq p_a^\pm + p_b^\pm = Q_1^\pm + Q_2^\pm .$$

Definíció szerint

$$q_i^2 = t_i = (Q_1 - p_a)^2 = Q_1^2, + m^2 - p_a^+ Q_1^- - p_a^- Q_1^+ \sim$$

$$\sim m^2 \left(1 - \frac{Q_1^+}{\sqrt{s}}\right) + Q_1^2 \left(1 - \frac{\sqrt{s}}{Q_1^+}\right) - \frac{\sqrt{s}}{Q_1^+} Q_1^2 .$$

Az előzőekből következik, hogy $\frac{\sqrt{s}}{Q_i^+} \approx 1 + \frac{Q_2^+}{Q_1^+} > 1$. ezért az első tag t_i kifejezésének jobboldalán pozitív. A második és harmadikkal együtt negatív, és ha, mint feltettük, t_i korlátos, mindkettő különkülön is korlátos. Így t_i korlátosságából Q_1^2 korlátossága, azaz végül is $|k_i|$-re vonatkozó III.2 i, állításunk következik. Másrészt az is látható, hogy ha $\underset{\sim}{Q}_i^2$ nagy, t_i értéke is nagy.

A t_i impulzus-átadások korlátosságát a kétrészecske ütközésekben látott kép sugallja: a rugalmas szórási hatáskeresztmetszetek t függését

$$\frac{d\sigma}{dt} = f(s) \exp(at)$$

függvényhez szokták illeszteni, a értéke tipikusan 6 – 8 GeV/c^{-2}.

Kézenfekvő ezt a multiperiferiális láncszemek közötti impulzusátadásoktól való függésre is kiterjeszteni. Az a végeredmény, amely szerint a szekunderek kis $|\underset{\sim}{k}_i|$ transzverzális impulzussal keletkeznek, megegyezik a tapasztalattal.

A fejezet hátralevő részében azt a feltevést vizsgáljuk, mely szerint az $s_{i,i+1}$ szubenergiák nagyok.

$$s_{i,i+1} = (k_i + k_j)^2 = 2m^2 - 2k_i k_{i+1} + (m^2 + k_{i+1}^2) \cdot$$

$$\cdot \frac{k_i^+}{k_{i+1}^+} + (m^2 + k_i^2) \frac{k_{i+1}^+}{k_i^+} .$$

Mivel a transzverzális impulzusok kicsik, $s_{i,i+1}$ csak úgy lehet nagy, ha vagy k_i^+/k_{i+1}^+ vagy k_{i+1}^+/k_i^+ nagy. Korábban már láttuk, hogy ha s igen nagy, akkor $k_0^+ \sim \sqrt{s}$, ezért $\frac{k_1^+}{k_0^+}$ és általában k_{i+1}^+/k_i^+ nem lehet nagy. Végeredményben tehát azt kaptuk, hogy $k_i^+/k_{i+1}^+ > > 1$, amint állítottuk.

Mielőtt empirikus bizonyítékot keresnénk arra, hogy az $s_{i,i+1}$ mennyiségeket tényleg jogos nagynak feltételezni, azaz, hogy végeredményben jó a „strong ordering" hipotézis, megmutatjuk, hogy az ABFST modellben az III. 2. a, b impulzus konfiguráció tényleg ki van tüntetve.

Az egyszerűség kedvéért a $\pi\pi$ szórási amplitúdókat s-hullám rezonanciával, azaz egyszerűen konstanssal helyettesítjük:

$$M(p_a, p_b, k_0 \ldots k_{n+1}) = \frac{\text{const}}{(q_0^2 - \mu^2) \ldots (q_n^2 - \mu^2)} \qquad (III.2.1)$$

Az a kérdés, hogy adott $(p_a + p_b)^2 = s$-nél milyen $k_0, k_1, \ldots, k_{n+1}$ végállapotbeli impulzusokra minimális a nevező.

Emlékeztetünk, hogy

$$k_0 = p_a - q_0,$$

$$k_i = q_{i-1} - q_i,$$

$$k_{n+1} = q_n + p_b . \qquad (III.2.2)$$

Először is vegyük észre, hogy az összes $q_i^2 - \mu^2$, $i = o, \ldots, n$, tényező negatív. Könnyen látható ugyanis (III.2.2)-ből, hogy az a illetve b részecske nyugalmi rendszerében az összes q_i vektor időkomponense $q_i^0 < 0$, illetve $q_i^0 > 0$. A két eset azonban Lorentz-transzformációval köthető össze, ezért az összes q_i térszerű, $q_i^2 = t_i < 0$. Az amplitúdó maximuma ezért várhatóan kis abszolút értékű q_i^2-eknek felel meg.

A k_i változókra vonatkozó szélsőérték feladatot a q_i-re fogalmazzuk át. Feltételes szélsőérték feladattá, mivel a $4(n+1)$ darab q_i komponensből a k_i impulzusokra vonatkozó $n+2$ tömeghéjfeltétel miatt csak $3n+2$ független. Az (III. 2.1) függvényt célszerűen a $2(n+1)$ darab q_i transzverzális komponens, és az $n+1$ darab $v_i = q_i^+ q_i^-$ mennyiség függvényének tekintjük. A mellékfeltétel egyszerű megfogalmazása érdekében a következő segédváltozókat vezetjük be:

$$y_a = \frac{p_a^+}{q_b^+}\sqrt{\frac{v_0}{m^2}}, \qquad y_b = \frac{q_n^+}{p_b^+}\sqrt{\frac{m^2}{v_n}},$$

$$x_{i=1,i} = \sqrt{\frac{q_{i-1}}{q_i^+}}, \quad i = 1, 2, \ldots n \qquad (III.2.3)$$

Természetesen a q_i^+, $p_{a,b}^+$ komponenseket ki kell küszöbölnünk, ami a k_i impulzusokra vonatkozó tömeghéjfeltételek segítségével egyszerű feladat. A végeredmény:

$$y_{a,b} = F_{a,b} \pm \sqrt{F_{a,b}^2 - 1}$$

$$x_{i-1,i} = G_{i-1,i} \pm \sqrt{G_{i-1,i}^2 - 1} \qquad (III.2.4)$$

ahol

$$F_a = \frac{v_0 - q_0^2}{2m\sqrt{v_0}} \quad F_b = -\frac{v_n - q_n^2}{2m\sqrt{v_n}} \qquad (III.2.5)$$

$$G_{i-1,i} = \frac{-M^2 + v_{i-1} + v_i - (q_{i-1} - q_i)^2}{2\sqrt{v_{i-1} \cdot v_i}}.$$

A (III.2.3) definíció alapján nyilvánvaló, hogy a q_i, v_i változók között a következő összefüggés áll fenn:

$$P(v_i, q_i) \equiv y_a \cdot x_{0,1} \cdot \ldots x_{i-1,i} \cdot y_b = \frac{p_a^+}{p_b^+} \sim \frac{s}{m^2}. \qquad (III.2.6)$$

Egyszerű számolás mutatja, hogy

$$\frac{\partial P}{\partial q_i} = a_i q_i + b_i q_{i+1}$$

azaz, a szélsőérték-helynél minden transzverzális impulzusátadás nulla, $q_i = 0$, $i = 0, 1, \ldots n$.
A továbbiakban a szélsőértéket a fázistér azon részében keressük, ahol

$$0 < -v_i \ll m^2, M^2 \quad i = 0,1 \ldots n,$$

azaz, ahol

$$|x_{i-1,i}| \sim \left|\frac{M^2}{\sqrt{v_{i-1}}}\right| \gg 1,$$

és

$$y_a y_b \sim 1$$

Így a szélsőértékfeladat hátralevő része az

$$M(p_a, p_b; k_0, \ldots k_n) \sim c \prod_{i=0}^{n} (|v_i| + \mu^2)^{-1}$$

függvényre, és a

$$P \sim M^{2n} \frac{1}{\sqrt{v_0 v_n}} \prod_{i=1}^{n-1} |v_i|^{-1} \sim \frac{s}{m^2}$$

mellékfeltételre vonatkozik. A két kifejezés szorzat alakja miatt a szélsőértékhelynél

$$v_0 \sim v_1 \sim \ldots v_n \sim -M^2 \left(\frac{m^2}{s}\right)^{1/n}.$$

Az a kikötésünk, mely szerint a $-v_i \ll M^2$. feltétel mellett keressük a szélsőértéket, megköveteli, hogy

$$(s/m^2)^{1/n} \gg 1$$

legyen. Ez helyettesíti az $s_{i,i+1}$ szubenergiákra vonatkozó korábbi feltételünket. Másrészt, könnyű belátni, hogy a $-v_i \ll M^2$ megszorítás automatikusan a korábbi $k_i^+/k_{i+1}^+ \gg 1$ feltételre vezet. Ezzel beláttuk, hogy legalábbis az ABFST típusú modellekben tényleg a strong ordering kinematika valósul meg a végállapotban.

IV. *Kísérleti következmények*

A továbbiakban azt vizsgáljuk, hogy a MP modell milyen eredményeket jósol. Először a speciális ABFST modell (melyet a II. fejezetben vizsgáltunk) jóslatait ismertetjük, majd megmutatjuk, hogy az általános modell is hasonló eredményeket ad.

IV. 1. *Multiplicitáseloszlás* [1]

Az n-d rendű multiperifális amplitudó (II.1.1) $2n+1$ rész keletkezését írja le. A keletkezett részecskék átlagos száma:

$$\langle N \rangle = 2 \left.\frac{\Sigma(n+1) A_n(s,u)}{\Sigma A_n(s,u)}\right|_{u=-\mu^2} \qquad (IV.1.1)$$

ahol $A_n(s,u)$-t a (II.1.8) képlet definiálja. Mint (II.1.5)-ből látható, A_n-ben A^R épp $(n+1)$-szer szerepel, és így

$$(n+1) A_n(s, -\mu^2) = \int \frac{\delta A_n(s, -\mu^2)}{\delta A^R(s_0)} A^R(s_0)\, ds_0 \qquad (IV.1.2)$$

és így

$$\langle N \rangle \sim \frac{1}{A(s, -\mu^2)} \int \frac{\delta A(s, -\mu^2)}{\delta A^R(s_0)} A^R(s_0)\, ds_0 \qquad (IV.1.3)$$

Ha a fenti képletben behelyettesítjük az $A(s,u)$ amplitudó (II.2.6) aszimptotikus alakját, megkapjuk, hogyan viselkedik a multiplicitás aszimptotikus energiákon:

$$\langle N \rangle = \log s \int A^R(s_0) \frac{\delta \alpha}{\delta A^R(s_0)} + \int \frac{\delta}{\delta A^R(s_0)} \cdot \log \varphi_\alpha(-\mu^2)\, ds_0 = c_1 \log s + c_2 \qquad (IV.1.4)$$

IV. 2. *Egyrészecske-eloszlások* [1]

Az ABFST modellben tulajdonképpen csak 2π-rendszerek eloszlásáról beszélhetünk.

Ezeket úgy kapjuk meg, hogy (II. 1.2)-ben nem integrálunk ki egy adott k végállapot-impulzusra, amely általában természetesen bármelyik 2π rendszer teljes impulzusa lehet, és ezután összegezzük csak n-re. Két esetet fogunk külön megvizsgálni:

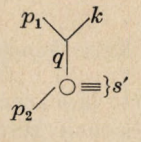
a) ha a kiszemelt rendszer a lánc felső végén van,

b) a kiszemelt rendszer nincs a lánc végein.

(Megjegyezzük, hogy ha a modellt úgy módosítjuk, hogy egy vertexben 3 részecske legyen csak, akkor valóban egyrészecske-eloszlásokat kapunk. Könnyen meggyőződhetünk arról, hogy a 2π-rendszerekre levont tapasztalatok érvényben maradnak.)

a) Ebben az esetben azonnal belátható, hogy a 6. ábrán látható gráfnak megfelelően — a kiszemelt 2π-rendszer eloszlása

$$\frac{dN(k)}{dk} = A^R(k^2)\frac{A(s', u')}{(u' + \mu^2)^2} \qquad (IV.2.1)$$



ahol $s' = (p_2+q)^2$, $u' = -q^2$;
k a 2π rendszer teljes impulzusa. Az (IV. 2.1) képletet k-ra kiintegrálva (II.1.11)-höz jutunk vissza, leszámítva az elasztikus tagot. Számítsuk ki az elvitt átlagos energiát:

$$\bar{E} = \frac{\int E(k)\,dN(k)}{\int dN(k)} = \frac{1}{2\mu A(s, -\mu^2)\,2\pi^2}\int ds_0 A^R(s_0)\cdot$$

$$\cdot \iint \frac{ds'\,du'}{(u' + \mu^2)^2} A(s, u')(s - s'' - u' - \mu^2)\cdot$$

$$\cdot Q(s, -\mu^2, s', u', s_0) \qquad (IV.2.2)$$

ahol

$$E(k) = \frac{p_2 k}{\mu} = \frac{s - s' - u' - \mu^2}{2\mu}$$

a laborrendszerben.

Ismét az $A = s^\alpha\varphi(u)$ aszimptotikus alakot használva, $x = s'/s$ jelöléssel

$$\bar{E} = \frac{s}{3\,2\pi^2\mu\varphi(-\mu^2)}\int ds_0 A^R(s_0)\int_0^1 dx(1-x)\,x^\alpha\cdot$$

$$\cdot \int_{x\left(-\mu^2 + \frac{s_0}{1-x}\right)}^{\infty} du' \frac{\varphi_a(u')}{(u' + \mu^2)^2} = \text{const}\cdot s$$

(IV.2.3)

azaz a bombázó részecskéhez tartozó 2π-rendszer által elvitt átlagos energia a bombázó részecske energiájával arányosan növekszik.

b) Ha a kiszemelt 2π-rendszer nem a lánc végein helyezkedik el, akkor egy n-d rendű diagramban (n-1) különböző helyen lehet. Így az eloszlása (II.1.5) és (II.1.6) alapján

$$N(k) = \sum_{n=2}^{\infty}\sum_{i=2}^{n}\int \prod_j d^n q_j \frac{1}{(q_j^2 - \mu^2)^2}\cdot$$

$$\cdot ds_0\,\delta(s_0 - (p_1 + q_1)^2)\ldots ds_n\,\delta(s_n - (p_2 - q_n)^2)\cdot$$

$$\cdot A^R(s_n)\,\delta^4(k - q_i + q_{i+1}). \qquad (IV.2.4)$$

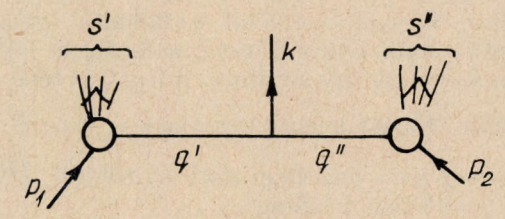
A

$$\sum_{n=2}^{\infty}\sum_{i=2}^{n} = \sum_{n-i=0}^{\infty}\sum_{i-2=0}^{\infty}$$

azonosságot felhasználva a fenti képletet az alábbi alakra hozhatjuk:

$$N(k) = A^R(k^2)\iint \frac{d^4q'\,d^4q''\,\delta^4(q' - q'' - k)}{(q'^2 - \mu^2)^2(q''^2 - \mu^2)^2}\cdot$$

$$\cdot A(q', p_1)\,A(-q'', p_2).$$



7. ábra

A 7. ábra alapján is ezt az alakot várhattuk. Ha (IV. 2.9)-t az off-shell (II.8.) amplitúdókkal fejezzük ki:

$$N(k) = A^R(k^2)\iint du'\,du''\,\frac{1}{(u' + \mu^2)^2}\,\frac{1}{(u'' + \mu^2)^2}\cdot$$

$$\cdot \int ds'\,ds''\,A(s', u')\,A(s'', u'')\,I,$$

ahol

$$I = \int dq'dq''\delta^4(q' - q'' - k)\,\delta(u' + q'^2)\,\delta(u'' + q''^2)\cdot$$

$$\cdot \delta(s' - (p_1 - q)^2)\,\delta(s'' - (p_2 + q'')^2) = \frac{1}{8s}T(a, b, c);$$

$$T(a, b, c) = \frac{\Theta(-a^2 - b^2 - c^2 + 2ab + 2ac + 2bc)}{\sqrt{-a^2 - b^2 - c^2 + 2ab + 2ac + 2bc}},$$

(IV.2.5)

$$a = k_T^2,\quad b = u'' - (k^2 + k_T^2)\frac{s''}{s_2}\left(1 + \frac{s'}{s_1}\right),\quad c = b^{(1\leftrightarrow 2)}$$

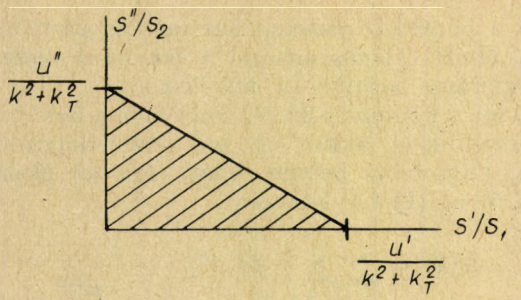
$$s_1 = (p_1 + k)^2,\quad s_2 = (p_2 + k)^2.$$

A T függvény csak a 8. ábrán látható Δ tartományon belül különbözik zérustól.

Az a, b, c változók kielégítik a

$$\sqrt{a} - \sqrt{b} \leqslant \sqrt{c} \leqslant \sqrt{a} + \sqrt{b} \quad \text{(cycl.)}$$

összefüggést.



8. ábra

Kiszámoljuk az (IV. 2.10) eloszlást abban az esetben, ha s′ és s″ is nagy a tömegekhez képest. Ha $s\to\infty$ és u véges, $A\sim s^{\alpha}\varphi(u)$.
Ezt beírva, az $x=s'/s_1$, $y=s''/s_2$ jelölésekkel

$$N(k)=s^{\alpha}A^{R}(k^2)(k^2+k_T^2)^{1+\alpha}\int\frac{du'du''\,\varphi(u')\,\varphi(u'')}{(u'+\mu^2)^2(u''+\mu^2)^2}\cdot$$
$$\cdot\int dx\,dy\,T(u',u'',k^2,k_T^2;x,y)\qquad(IV.2.6)$$

A fenti képletben az x és y-ra vonatkozó integrálás határai s-től függnek. Megmutatható azonban, hogy ha $k_0<\sqrt{s}/n$, ahol n alkalmas egész, az integrálás határai kívül esnek a 8. ábrán látható tartományon, és így az utolsó integrál értéke s-től független. Ez azt jelenti, hogy ha $\alpha=1$, az $E\,\dfrac{d\sigma}{dk}$ mennyiség s-től nem függ, csak k_T^2-től (ill. k^2-től). Ez a *pionizáció* jelensége.

V. *Modellfüggetlen következmények*

Megmutatjuk, hogy a IV. fejezetben felsorolt jóslatok az ABFST modell részleteitől függetlenek, a multiperiferalizmus III. fejezetben felsorolt általános feltevéseiből következnek.

V. 1. *Multiplicitáseloszlás* [4]

Láttuk, hogy

$$\sqrt{s}\sim k_0^+\sim k_{n+1}^-$$

azaz, az energia nagy részét a lánc két végén levő részecske hordozza. Ez kísérletileg általában jól látható, ez az ún. ,,leading particle'' effektus.

Feltételezzük, hogy a multiperiferiális lánc mentén a láncszemek között csak gyenge, rövid korrelációk vannak. Ezért a k_l^+/k_{l+1}^+ hányados a lánc mentén nagyjából állandónak vehető: $k_l^+/k_{l+1}^+=r$. Ugyancsak a gyenge korreláltság miatt r függetlennek tekinthető s-től, hiszen s a szélső részecske impulzusát szabja meg elsősorban. A kinematikából tudjuk, hogy

$$s\sim m^2\frac{p_a^+}{p_b^+}\equiv m^2\frac{p_a^+}{k_0^+}\cdot\frac{k_0^+}{k_1^+}\cdot\ldots\cdot\frac{k_{n+1}^+}{p_b^+}\sim$$
$$\sim m^2\frac{p_a^+}{k_0^+}\cdot\frac{p_b^-}{k_{k+1}^-}\cdot r^{n+1},$$

és

$$\frac{p_a^+}{k_a^+}=\frac{\sqrt{s}}{k_0^+}=\frac{k_0^+ +\ldots+k_{n+1}^+}{k_0^+}\sim\frac{r}{r-1}.$$

hasonlóan

$$\frac{p_b^-}{k_{n+1}^-}\sim\frac{r}{r-1}.$$

Végeredményben

$$s\sim m^2r^{n+1}\left(1-\frac{1}{r}\right)^{-2}.$$

Nem várhatjuk, hogy adott s mellett minden n esetén teljesülnek feltételeink, de azt reméljük, hogy átlagos részecskeszám esetén jó a leírásunk. Így az átlagos részecske-multiplicitás a végállapotban:

$$\langle n\rangle\sim\frac{\log s}{\log r}+\text{const}.$$

A jelenlegi kísérleti helyzettel a logs típusú függés összefér, de megemlítjük, hogy a k_i, $i=1,\ldots,n$ impulzusokhoz π mezonokat rendelve a mérések szerint $r\approx 3$, ami nem kifejezetten nagy.

V. 2. *A korrelációs hossz hipotézis* [6, 7]

A multiperiferiális láncszemek közötti gyenge korrelációk hipotézisének részletesebb megértése érdekében fogalmazzuk át röviden az előző fejezet tartalmát.

A teljes hatáskeresztmetszethez az $n+2$ részecskés végállapot járuléka:

$$\sigma_n(s)\sim\frac{1}{s}\int|M(p_a,p_b,k_0\ldots k_{n+1})|^2\,d\Phi_n$$

ahol $d\Phi_n$ a fázistérfogat-elem:

$$d\Phi_n=\frac{1}{2}\delta\left(\sum_{i=0}^{n+1}m_i ch y_i-2mch\frac{Y}{2}\right)\cdot$$
$$\cdot\delta\left(\sum_{i=0}^{n+1}m_i sh y_i\right)\prod_{i=0}^{n+1}dy_i d^2k_i\delta^2\left(\sum_{i=0}^{n+1}k_i\right),$$

és bevezettük a következő jelölést:

$$p_a=\left(m\,ch\frac{Y}{2},o,o,m\,sh\frac{Y}{2}\right),$$
$$p_b=\left(mch\frac{Y}{2},o,\;o,\;-m\,sh\frac{Y}{2}\right),$$
$$k_i=(m_i\,ch\,y_i,k_i,\underset{\sim}{k},\underset{\sim}{k}_i,m_i\,shy_i),$$

ahol $i=o,\;1,\ldots,\;n+1$; $m_0=m_{n+1}$; $m_i=M$, ha $i=1,\ldots,n$, és y_i,y az úgynevezett rapiditás-változók:

$$y_i=\log\frac{k_i^+}{M_i}$$

és nagy energián

$$Y \approx \log \frac{s}{m^2}$$

Abban a kinematikai tartományban, ahol $|M(p_a, p_b,; k_0, \ldots k_{n+1})|^2$ maximális, a részecskék szigorúan rendezhetők a rapiditásuk szerint:

$$y_b = -\frac{Y}{2} \lesssim y_{n+1} < y_n < \ldots < y_0 \lesssim \frac{Y}{2} = y_a$$

A multiperiferiális lánc két szélső részecskéje az $\pm y/2$ határok közelében van, és a lánc belsejében a részecskék egyenletesen oszlanak el, azaz adott s-nél a tipikus $<n>$ részecskeszám esetén $y_i - y_{i-1} = \log r$, nagyjából s és i-től független állandó.

Az M amplitúdót felépítő láncszemeket most y függvényeiként írhatjuk le. Például, elhanyagolva a transzverzális impulzusoktól való függést, egy szélsőséges, teljesen korrelálatlan láncszemeket jelentő esetben:

$$|M|^2 = f_a(Y, y_0) f_1(y_1) \ldots f_n(y_n) f_b(y_{n+1}, Y).$$

A „strong ordering" hipotézis azt vonja maga után, hogy $f_a(Y, y_0)$ olyan függvénye y_0-nak, amely $\frac{Y}{2}$ közvetlen közelében nagy, aztán gyorsan csökken. (Hasonló függvénye y_{n+1}-nek f_b is $-\frac{Y}{2}$ közelében.) Azt mondhatjuk továbbá, hogy a korrelálatlanság miatt a lánc belseje teljesen homogén, úgyhogy

$$f_i(y_i) \sim f_{i+1}(y_{i+1})$$

A „strong ordering" limitben a fázistér is faktorizálódik közelítőleg:

$$d\Phi_n \sim \frac{1}{2m^2} e^{-Y} \delta\left(y_0 - \frac{Y}{2}\right) \prod_{i=0}^{n+1} dy_i.$$

Ebben az igen egyszerű esetben

$$\sigma_n(s) \sim \frac{1}{s^2} f_a\left(Y, \frac{Y}{2}\right) f_b\left(Y, \frac{-Y}{2}\right) \prod_{i=1}^{n} \int dy_i f_i(y_i),$$

és a teljes hatáskeresztmetszet a szokásos módon $\sigma_{tot}(s) = \Sigma\, \sigma_n(s)$.
Nem okoz nehézséget az egy-részecske inkluzív hatáskeresztmetszet kiszámolása sem:

$$\frac{1}{\sigma_{tot}(s)} \cdot k_0 \frac{d\sigma(s, y)}{dy} \sim \frac{1}{\sigma_{tot}(s)} \sum_{n,j} \frac{1}{s} \int |M|^2 d\Phi_{n,j} \sim$$

$$\sim \delta\left(y - \frac{Y}{2}\right) + \delta\left(y + \frac{Y}{2}\right) + \text{konstans};$$

ahol a

$$d\Phi_{n,j} = \frac{1}{2s} \delta\left(y_0 - \frac{Y}{2}\right) \delta\left(q_{n+1} + \frac{Y}{2}\right) \prod_{i=0, i \neq j}^{n+1} dy_i$$

jelölést használtuk. Az $i \neq j$ szimbólum azt jelenti, hogy a szorzatból ki kell hagyni az $i = j$-edik tényezőt.

Példánk természetesen nem realisztikus: a multiperiferiális láncszemek között lehet korreláció, és szigorúan véve az impulzus megmaradást biztosító Dirac-delta is okoz kinematikai korrelációt. Mégis, szemléletessé teszi a multiperiferális dinamika által sugallt korrelációs hossz hipotézist, amely szerint:

Nincs korreláció olyan részecskék között, amelyek y_i rapiditásai közötti távolság nagy egy karakterisztikus L hosszúsághoz képest.

Ennek közvetlenül ellenőrizhető következményei vannak az inkluzív spektrumokra, multiplicitás-eloszlásokra stb. vonatkozóan. Például, az egyrészecske inkluzív spektrumra várható kép a következő:

$$\frac{1}{\sigma_{tot}(s)} k_0 \frac{d^3\sigma_{ab}(k, y, Y)}{d^2k\,dy} =$$

$$= \begin{cases} A_a\left(k, \frac{Y}{2} - y\right), & \text{ha } y \lesssim \frac{Y}{2} \\ B_b\left(k, \frac{Y}{2} + y\right), & \text{ha } -\frac{Y}{2} \lesssim y \\ f(k) & \text{ha } -\Delta < y < \Delta. \end{cases}$$

Vagyis a lánc szélénél mérve a látott spektrum nem függ külön-külön Y és y-tól, hanem csak a lánc szélétől mért távolságtól, és nem függ a lánc túlsó szélén, tehát nagyon távol levő részecskétől. A lánc közepén, egy $|-\Delta, \Delta|$ intervallumban, amelyben mind az a, mind a b részecske nagyon távoli, a és b-től és természetesen y-tól is független spektrumot látunk. A lánc belseje homogén, ezért y-tól sincs függés. A három eset a szokásos terminológia szerint a target, illetve bombázó részecske fragmentációs tartományának, valamint a pionizációnak felel meg. Mindhárom létezésére kísérleti evidencia van.

V. 3. *Az MPM egy kiterjesztése nagy transzverzális impulzusokra*

A továbbiakban Amati et al. [8] nyomán azt vizsgáljuk, milyen spektrumot ad (IV. 2.10) nagy transzverzális impulzusokra. Bár — mint látni fogjuk — az eredmény kvalitatíve megegyezik a jelenlegi mérési eredményekkel, az (IV. 2.10) egyenlet érvényessége nagy k_T^2 értékekre nem magától értetődő. Levezetésénél ugyanis (II.1.5)-ben elhagytuk a keresztezett multiperiferiális gráfokat és csak a legvalószínűbb impulzuseloszlást vettük figyelembe. Mint korábban láttuk, ez esetben mind q^2, mind k_T^2 kicsi. Véleményünk szerint (IV. 2. 10) kiterjesztését nagy k_T^2 értékekre csak a kísérletekkel való kvalitatív egyezés igazolja. A kiterjesztés során annyiban általánosítjuk a (IV. 2.10) képletet, hogy az $(u + \mu^2)^{-1}$ propagátor helyett $P(u)$ ismeretlen függvényt is megengedünk.

$$P(u) \to u^{-\lambda} \quad \text{ha} \quad u \to \infty$$

aszimptotikával.

Az előző fejezetekben azt is láttuk, hogy ha k_T^2 nagy, akkor q^2 is nagy. Ebben az esetben tehát az $A(s,u)$ amplitúdónak az $s \to \infty$, $u \to \infty$ viselkedése érdekes.

Tegyük fel, hogy közben $\frac{s}{u} + 1 = \omega$ értéke állandó marad (Björken limit), ekkor

$$A(s,u) \xrightarrow[\substack{s\to\infty \\ u\to\infty \\ \omega \text{ fix}}]{} \frac{1}{u}\psi(\omega) \qquad \text{(V.1.2)}$$

Az MPM-ben a Regge és Björken-limit felcserélhető, így $\varphi(u) \to cu^{-1-\alpha}$.
Egybevetve ezt $A \sim s^\alpha \varphi(u)$ alakkal, $\psi(\omega) \to c\omega^\alpha$ $\chi(\omega)$ adódik, ahol $\lim_{\omega\to\infty} \chi(\omega) = 1$.
A $T(a,b,c)$ függvény tulajdonságaiból látható, hogy ha $a = k_T^2$ értéke nagy, akkor vagy b nagy és c kicsi, vagy fordítva.

Ha $$u'' - (k^2 + k_T^2)\frac{s''}{s_2}\left(1 + \frac{s'}{s_1}\right) \sim k_T^2, \text{ és}$$

$$u' - (k^2 + k_T^2)\frac{s'}{s_1}\left(1 + \frac{s''}{s_2}\right) \sim 0,$$

$$k^2 = \mu^2 = \text{fix} \qquad \text{(V.1.3)}$$

akkor $\omega'' < s_2/k_T^2$, $s' \sim \frac{u' s_1}{u''}$, $u' \sim \frac{s' u''}{s_1}$.

Az (VI. 1.3) képlet segítségével (IV. 2.10) így írható:

$$N \sim \frac{1}{s}\int_0^{s_2/k_T^2} du'' \int_{\frac{s'u''}{s_1}} du' P^2(u') \int ds'\, A(s',u') \cdot$$

$$\cdot \left[\frac{1}{k_T^2}\left(1 - \frac{\omega'' k_T^2}{s_2}\right)\right]^{2\lambda-1} \psi(\omega'') + \{u' \to u''\}$$

A (II.2.5) egyenlet közelítőleg

$$A(s,u) \sim \frac{1}{s}\int ds_0 A^R(s_0) \int_0^s ds' \int_{s'/\omega}^{\infty} du'\, P^2(u')\, A(s',u')$$

alakú. Björken-limitben, felhasználva, hogy s_0-ra kiintegrálhatunk:

$$\omega\psi(\omega) = \int ds' \int_{s'/\omega} du' P^2(u)\, A(u',s').$$

Visszahelyettesítve ezt (V.1.4)-be:

$$N \sim s \int_0^{s_2/k_T^2} dw \left[\frac{1}{k_T^2}\left(1 - \frac{\omega k_T^2}{s_2}\right)\right]^{2\lambda-1} \psi(\omega) \cdot$$

$$\cdot \left[\frac{s_1}{k_T^2}\left(1 - \frac{\omega k_T^2}{s^2}\right)\right] \cdot \psi\left[\frac{s_1}{k_T^2}\left(1 - \frac{\omega k_T^2}{s_2}\right)\right] +$$

$$+ \{u' \leftrightarrow u''\} \sim (k_T^2)^{-2\lambda-\alpha}\, G$$

és a G függvényről kimutatható, hogy $s_1/k_T^2 \to \infty$, $s_2/k_T^2 \to \infty$, esetben 1-hez tart, azaz (V.1.5) nagy k_T^2-re hatványviselkedést jósol. A fenti képlet további vizsgálata [8]-ban megtalálható.

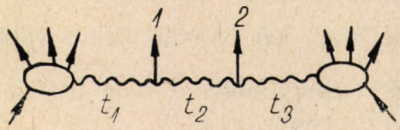
V. 4. *Kétrészecske eloszlások*

Az MPM-ben tapasztalt viselkedéshez hasonlót jósol sok más modell is a multiplicitás és egyrészecske-eloszlásra. A modellek között azonban már különbséget tesznek a kétrészecske-eloszlások. A keletkezett részecskék különféle adatai között vizsgálhatunk korrelációt.

A két részecske $\vec{q}$ transzverzális impulzusa közötti szög

$\varphi = \arccos\frac{\vec{q}_1\vec{q}_2}{|q_1|\,|q_2|}$ viselkedését vizsgálta az MPM-ben és egy ún. pionizációs modellben [9] a $pp \to pp\pi^+\pi^+\pi^-\pi^-$ reakcióban. Egyszerű közelítésében azt találta, hogy a pionok közötti korreláció mindkét modellnél a kísérletekkel összhangban van, és pp és a p valamint a leggyorsabb pion közötti korrelációt a pionizációs modell a kísérletekkel egyezően adta, az *MPM* nem.

A két részecske rapiditása közötti korrelációt vizsgálta Mak és Tan [10], a CGL modellben. A 2 pionnak a láncon elfoglalt helye alapján 8-féle gráfot kell tekinteni. Ezek közül azonban csak az ad korrelációt, ha a 2 pion közvetlenül egymás mellett van:



9. ábra

Ebből az

$$\exp\left\{-c\left[q_{1T}^2 + q_{2T}^2 + q_{1T}q_{2T}\left(\frac{3}{2}e^{-y} + \cos\varphi\right)\right]\right\}$$

korreláció adódik, ahol y a két pion relatív rapiditása és φ a transzverzális impulzusok közötti szög. Ez a modell a q_{iT}, q_{2T} transzverzális impulzusokra exponenciális levágást jósol, feltéve, hogy a számításba bejövő alakfaktorok exponenciálisan csökkennek t_i függvényében.

IRODALOM

1. *E. Amati, A. Stanghellini, S. Fubini*, Nuovo Cim. *26*, 896 1962.
2. *S. Auerbach* et al, Phys. Rev. Lett., *29*, 522, 1972.
3. *G.F. Chew, M. Goldberger, F. Low*, Phys. Rev. Letters *22*, 208, 1969.
4. *S. Gasiorowicz*, Multiparticle Production Processes, Előadás az 1971-es Erice-i nyári iskolán.
5. *S. Fubini*, Előadás az 1963-as nyári iskolán (''Strong Interactions and High Energy Physics, Edinburgh, 1964.)
6. *C. E. De Tar*, Phys. Rev. *D3*, 128 1971,
7. *W.R. Frazer* et al, Rev. Mod. Phys., *44*, 284 1972.
8. *D. Amati, L. Caneschi, M. Testa*, CERN preprint, 1597/1972.
9. *J.H. Friedmann* et al., Phys. Rev. Lett., *28*, 191, 1972.
10. *S. Mak, C. Tan*, Phys. Rev., *D6*, 351, 1972.

TUDOMÁNY ÉS MŰVÉSZET

Kovács István
BME Fizikai Intézet
Atomfizika Tanszék

Sokan a tudományt és a művészetet az emberi alkotó tevékenység két egymástól teljesen különböző ágának tartják, melyeknek módszere, célja merőben különböző. Pedig a művészetnek is ugyanaz a lelki forrása, mint a tudománynak: az örök változásban az állandó, az el nem múló, a végtelen után való sóvárgás. A tudós az abszolút igazságok rendszerét, a művész a szépértékeket akarja megragadni: mindkettő azt, ami a dolgokban állandóan jellegzetes, tipikus, lényeges. Erre a célra a tudós eszköze elsősorban a fogalom, a művészé a szemlélet. A tudós a különöst az általánosnak, a törvényszerűnek, vagyis a fogalomnak formájában, a művész az általánost, a jellegzetest a különösnek alakjában ábrázolja. A tudós a világ egyedi jelenségeiből és tárgyaiból általában az egyetemest, a törvényszerűt, a változatlant szívja ki gondolkodásának logikai eszközeivel. A művész ellenben egyedi jelenségeket és tárgyakat ábrázol, de úgy, hogy az egyedit, a különöst az egyetemes, a tipikus hatja át, alkotásában az egyedit mindig az egész típus képviselőjeként állítja elénk. A művész alkotása örök jelent képvisel éppúgy, mint a tudós fölfedezett törvénye: a személyfölötti, változatlan, időtlen lényeg jelentkezik benne. A legenda szerint a fáról leeső alma mozgásának törvényszerűségében Newton az egész világegyetemben uralkodó mechanikai törvényszerűséget fedezett fel. Kirchhoff és Bunsen spektroszkópja nemcsak az egyes anyagok színképeit állította elő, hanem az egész Világegyetem anyagi egységének adta döntő bizonyítékát. Leonardo da Vinci „Mona Lisá"-ja nemcsak Francesco del Giocondo, firenzei polgár csodálatos szépségű feleségének titokzatosan mosolygó arcképe, hanem az örök asszonyi szépség utólérhetetlen szimbóluma; Raffael „Athéni iskolá"-jának alakjaiban nemcsak a görög tudósokat szemléljük, hanem az igazságszomjazó és kutató örök embertípus lelki alkatának kifejezését is, amilyen az antik világban, a reneszanszban, s amilyen ma és mindenkoron.

A kutató tudós és a teremtő művész lelki feszültségben él s ezt objektív alkotásban törekszik levezetni. Amaz a gondolatok összefüggő rendszerében, föltevéseiben és elméleteiben, emez ritmusban, szimmetriában, táncban, énekben, dalban, zenében, színekben és formákban. A tudósban is, a művészben is fokozott élményképesség lakozik. Mindkettő befogad is, cselekszik is: az egyik gondolatösszefüggéseket lát meg, a másik esztétikai műveket alkot. A tudós tárgyi érdeklődésének iránya szerint különbözőképp látja és fogja fel a világot. Teremtő gondolkodási élményének más és más a kiinduló pontja, aszerint, hogy a valóság fizikai vagy biológiai szempontból érdekli; a filológust a szövegek hitelessége, a történészt az események összefüggése vonzza. A művész is a maga élményeiben a világot más meg más alakban látja, aszerint, hogy költő, festő, szobrász vagy zenész. A festő fényt és árnyékot, színt és körvonalakat lát a síkban, míg a szobrász azt a dolgot, amely élményének és alakításának tárgya, minden oldalról szemléli.

A tudós és a művész alkotása sok hasonlóságot mutat. A tudós a jelenségek *sokféleségében egységet* iparkodik fölfedezni. A *rend* és a *harmónia*, amelyet a jelenségek káoszából kidolgoz a természeti törvények által, már maga a legmélyebb esztétikai érzést kelti. A csillagászat, az első törvénymegállapító tudomány, a kald pásztoroknál a végtelen csillagos égbolt szemléletéből fakadt, amely csupa rendet és harmóniát éreztet. Pythagoras a szférák zenéjében kötőjelet tett a tudomány és a művészet közé. Az egzakt gondolkodás logikai alkotásában az esztétikai ízlés törvényeinek is hódol. „Még a matematikának is — mondja Rados Gusztáv — megvan a maga esztétikája. Ebben is az épülő rendszer mivolta határozza meg az építő anyagot; itt is minden pillér, minden oszlop, minden bolthajtás csak úgy elégít ki, ha rendeltetésének megfelelve, egyszersmind az ész statikai törvényének hódol. Az össze nem tartozó gondolatok és eszmék erőszakos egyesítése disszonáns gondolatokkordot szolgáltat, csak úgy, mint az össze nem illő hangok kakofóniája a zenében." (Emlékbeszéd Kronecker Lipótról, 1898). A speciális relativitás elmélet belső harmóniája akkor tárult fel, amikor az Einstein által adott fenomenologikus beállítás geometriai hátterét, a tér és idő egységét, a négydimenziós tér-idő kontinuumot Minskowski felismerte. A kvantummechanika harmóniája akkor bontakozott ki, mikor Born felismerte, hogy a Heisenberg által megfogalmazott gondolatok a mátrixok törvényszerűségeit mutatják és amikor kiderült, hogy az elmélet a Schrödinger-féle hullámmechanikával teljesen egyenértékű. A tudósnak is, meg a művésznek is közös tárgya a mérhetetlen, hatalmas, fönséges, a folytonos változás közepette is mindig rendet és harmóniát mutató természet: tehát a közös tárgy keltette esztétikai érzelem is közös akár a tudós fogalmi hálójába akarja a valóságot fogni, akár a művész ecsetjével, vésőjével, zenei harmóniáival, vagy költői nyelvével megrögzíteni.

A tudós és a művész alkotásaiban azonban látszólag bizonyos ellentétek is mutatkoznak. A tudós *objektív* igyekszik lenni, a tárgyat a maga sajátszerű alkatában akarja megragadni, s ezért lehetőleg iparkodik magából kiiktatni minden olyan érzelmet és indulatot, amely szemét a tárgyilagos látásban elhomályosítaná. A művész ilyen értelemben *nem is akar objektív* lenni: inkább szeret és gyűlöl, gyönyörködik és utálkozik, szenvedéllyel követ vagy utasít el bizonyos művészi felfogásokat és stílusokat, és politikai állásfoglalása, világnézete fokozza a maga személyes teremtő erejének és egyéni stílusának eredetiségét.

Mindennek ellenére a tudósok közt is van *szubjektív* és *objektív* gondolkodó típus, meg a művészek

között is. A szubjektív típushoz tartozó gondolkodó a problémaélménytől izzik, a megoldás intuíciószerűen lövell ki belőle, kutatása a lélek erős érzelmi szférájában megy végbe; az objektív típus képviselője hideg, módszeres gondolkodó, tudatos léptű, hűvösen számító tudós. Így van ez a művészek világában is: az egyiknél az élethangulat az uralkodó, mindig mindenestül én-jét adja és fejezi ki, nem keresi a tárgyat: ez ő maga. Ezzel a szubjektív típusú, ú.n. kifejező művészettel szemben a másik objektív, ú.n. alakító művésztípus viszont előbb találja meg tárgyát s ezt, ha alkalmasnak tartja, utólag itatja át élményeivel; tudatos művészi reflexióval alakít s számítja ki a hatást. Ennél az objektív típusnál nem a művész személye, hanem maga a mű van előtérben. A tudósok közt is éppúgy van szubjektív lírikus és objektív epikus, mint a költők között. A tudományos gondolkodás sem a szubjektivitás teljes kiirtása, hanem csak magas fokon való fegyelmezése. A személytelen tudósmunka csak absztrakció és csak a tévutak elhallgatása és az izzadtság szag letörlése után logikus rendbe szedett munkák közzététele kelti a személytelen elvonatkozás látszatát. Ha viszont az elvont viszonyokat a tudományos kutató a stílus plasztikus hatalmával szemléletesen és képszerűen is ki tudja fejezni, akkor már nemcsak tudós, hanem művész is.

Az igazi művész azonban minden forró szubjektivitása ellenére, bizonyos értelemben mégis objektív s egy végső eszményi síkon találkozik is a tudóssal. A látás és alakítás a művész teremtő munkájában feloldhatatlanul egybeforr. A művész a tárgyi világot nem úgy látja, mint amilyen, hanem úgy, amilyennek az ő személyes lelki alkatánál fogva látnia kell. A művész világnézete szemlélő alakítása a világnak, amelyet lelke éppen a maga egyéni alkatán keresztülszűrve fogad be. És mégis: az igazi művész mindig *objektív*, bármely korban és társadalomban él, mert az ábrázolt személyekben vagy tárgyakban bennrejlő magasabb igazságot, lényegüket munkálja ki: a korra, a társadalomra jellemző lényeget, a jellegzetest, a fajszerűt. Az igazi művész aláveti magát önkéntelenül — s ez éppen sajátszerű művészi tehetsége — a dolgok benső igazságának: a jellegzetest, a jelenben objektív módon, lényegszerűen ábrázolja. Egy történész sem rajzolta meg tollával II. Fülöp spanyol király jellemét oly híven, mint Tizian ecsetjével, vagy jellemezte jobban a XVI. századvég angol illetve a XIV. Lajos korabeli francia társadalom szellemét, mint Shakespeare drámáiban illetve, Moliére vígjátékaiban.

Végső fokon tehát a tudós és a művész „objektivitása" találkozik, csak eszközük más: az egyiké a fogalom, a másiké a szemlélet. A tudós is, a művész is „lát", de ez a látás egymagában egyiküknél sem elég, alakítani is kell tudniok: a tudós a maga viszony-szemléletét rendszeres gondolatösszefüggéssé formálja, a művész meg élményét színészi alakítássá, szoborrá, festménnyé, költeménnyé, zeneművé alakítja. Minél nagyobb formátumú és eredetibb szellem a tudós és a művész, a dolgok természetének objektív ábrázolásában annál rokonibb lelkek.

Ez a rokonság szemléletesen nyilvánul meg olyankor, amikor a tudós és a művész kölcsönösen átrándulnak a másik területre: a történelem számos érdekes példát ismer erre. A népek ősi életében a tudomány és költészet még szorosan egybeforr. A görögök első természetkutatói és filozófusai a világ és az élet mivoltára vonatkozó tanításaikat versbe foglalták, amely akkoriban a könnyebb emlékezetbe vését szolgálta, mivel az írás még nem volt elterjedve. Későbbiekben ez megszűnt, de a reneszansz és barokk korában a tudomány és a költészet határai ismét elmosódnak. Bacon és Giordano Brunó versekben írják le tudományos gondolataikat. A modern természettudomány megindítója, Galilei nemcsak a platoni dialógus szellemes és eleven formájába önti számos tudományos művét, hanem szonetteket ír és egy vígjáték vázlatán is dolgozik. Newton fiatal korában verseket szerez, de ezek nem maradtak fenn. Pascal is vallásos érzelmeit versbe önti ki. Huyghens egy szellemes és műveltségével kitűnő kurtizánhoz négy verset intéz, de ezek költői értéke mélyen alatta marad fizikai kutatásai becsének. Leibniz tizenhároméves korában egyetlen délelőtt megír egy háromszáz hexameterből álló verset, amelyet tanítói, amikor nyilvánosan előadja, megcsodálnak, de attól is tartanak, hogy Leibniz költői sikerét látva, abbahagyja komoly tanulmányait s fejét egészen versírásra adja. Lavoisier, a nagy kémikus fiatal korában drámát kezd írni, de néhány jelenet után abbahagyja. A hatalmas képzeletű másik kémikus, Davy egész életén át írt verseket, melyeket kora igen magasra értékelt. Tyndall népszerű előadásaiban olyan szellemesen tárta fel a fizika problémáit és eredményeit, hogy a „tudomány költőjének" nevezték. Carnot, katonatiszt korában pihenő óráiban számos verset szerez, amelyből szelíd vidámság és igaz bajtársi érzés hangzik ki. Volta tizenkilenc éves, amikor nagyobb lélegzetű latin költeményt ír, amelyben az akkor leghíresebb kémiai kísérletek fölfedezéseit írja le és dicsőíti. A korszak nagy matematikusa és fizikusa, Ampère is vonzódik a költészethez. Amikor tanártársai figyelmeztetik, hogy térjen vissza az egzakt tudományok területére, így válaszol: „Mi okból kerüljek el egy virágokkal és élő vízekkel áldott földet, hagyjak el patakokat és ligeteket pusztákért, amelyeket a matematika napja leperzsel; ez legfényesebb világosságát a tárgyakra csak azért veti, hogy elhervassza és gyökeréig kiszárítsa!" (Arago idézi emlékbeszédében). Még öreg professzor létére is egy hosszú postakocsi utazáson százötvennyolc versből álló költeményt ír. A problématudat sikertelensége válik a költészet forrásává Bolyai Farkas estében. Amikor a párhuzamosokra vonatkozó euklideszi axiómával nem boldogul, poézisre adja fejét. De itt sem kíséri szerencse. Szomorúan írja nagy barátjának, Gaussnak: „Beesteledett: Te megkaptad méltó napszámodat, az enyém csak a belső megnyugvás, hogy a sorssal küzködve, jutalom nélkül is hű maradtam az igazság zászlójá-

hoz. Mindkettőnk számára a földi játék utolsó fölvonása folyik, de Neked, ha legördül a függöny, az örökkévalóság tapsol; én megelégszem azzal, ha még kő sem beszél rólam."

De a művészet más ágaiban is ott találhatjuk a tudósokat. Pasteur már tizenhároméves korában kitűnő képet rajzol édesanyjáról, amint fehér fejkötőben, kockás vállkendővel a piacra indul. Később is sok arcképet rajzol, képei még Amerikába is lejutnak s elismerésben részesülnek. Köztudott a matematikusok és természettudósok zene iránti érdeklődése. Sokan a nehéz szellemi munka után a klasszikus vagy akár a könnyűzene hallgatásában találnak pihenésre, felüdülésre. Mások meg aktívan zenélnek: ismeretes, hogy Einstein szabad idejében hegedült, a nagy humanista orvos, Schweitzer orgonajátékát egész Európa megcsodálhatta. E sorok írója pedig egy felejthetetlen estét töltött a világhírű kanadai fizikus, Herzberg társaságában, aki csodálatosan zengő baritonján Schubert és Mozart dalokat énekelt mély átérzéssel. Ismét mások komoly vagy akár könnyűzenei dalokat komponálnak, melyek néha nem várt sikert aratnak.

Jóval kevesebb példát találunk a fordított esetre, amikor a művész rándul át a tudomány birodalmába. Igazán jelentős alakok ezek között Leonardo da Vinci és Goethe. Az előbbi esetében alig választható el egymástól a festő, a szobrász, és a mérnök, a fizikus. Az utóbbi, bár színelmélete balsikeres volt, botanikai és osteológiai munkáiban olyan nagy érdemeket szerzett, hogy a legnagyobb természetbúvárok közé számítható.

A természet a tudós kutató kíváncsi szeme előtt egészen soha sem engedi magát mindenestül leleplezni. Az egzakt természettudományi kutatás éppen ezért tele van a fantáziát felajzó költőiséggel. A tudós is, a művész is szívében önzetlenül a végtelen után sóvárog, ami mindig titok marad előtte. „Talán — mondja Eötvös Loránd — megszűnnék a tudomány, megszűnnék a művészet, ha a rejtély kulcsát megtalálnók. Az észnek magában nincsen teremtő ereje, csak a szív adhatja ezt neki, nem az, amit az anatómus, hanem, amit a költő szívnek nevez. A titok honában többre megy a költő, mint a természettudós." (Akadémiai Értesítő, 1890, 344 l.). Ezért — folytathatjuk Eötvös gondolatmenetét — amikor a természettudós az ész logikai eszközeit a titok magyarázatában kimerítette, szívével gondolkodik tovább: gyakran költővé alakul át. Innen van az a nosztalgia, mely a tudósok részéről a művészetek felé megnyilvánul, olvassuk hát ezt stílszerűen versben:

MŰVÉSZET VAGY TUDOMÁNY?

Irigyled a magamutogatásukat?
Kik másnak, mint amik, mutatják magukat
Ezer arcot öltve mindig másét adják,
De mindenki másban magukét mutatják.

Mikor megalázták s összetörték lelkét,
Választani kellett: életét vagy elvét.
Tudományát dönti nekünk átmenteni,
Volt-e nagyobb színész, mint agg Galilei?

Irigyled, aki a szivárványt megosztja?
S színeit a vásznon égből Földre lopja,
Földieknek égi mását megteremti,
Képzeled ez csoda s nem vitázik senki.

De a szivárványnak titkát ki elleste
Üveghasábokkal színképeket festve
Nagy és kis világról fény, hogy ilyen úton
Hozzon majd hírt nékünk: ez volt a nagy Newton.

Ki elhiteti, hogy mi való csak látszik,
Igaz történetet kitaláltnak játszik,
Majd képzelet szárnyán messze elugorva
Elámulva látja: betelt minden, sorra.

A rúd hossza való vagy csak annak látszik?
Képzelet az ésszel vajh' fogócskát játszik?
Tér és idő együtt: külön-külön nincsen,
Volt-e olyan költő, mint a bűvös Einstein?

Irigyled, ki látja mi nem kell a kőben?
Feleslegest elvesz, térben és időben,
Megmutatja milyen a világ nekünk
És mi ebben, lám, a miénkre ismerünk.

Szobrot tán szebbet is lehet elképzelni,
Mint uránrudakat egymásra helyezni,
De Prometheusnak másodjára lenni,
Tüzet újra lopni: ez volt Szilárd s Fermi.

Irigyled lelkében, kinek zeng a világ?
Aki felénk szór sok csengő melódiát
S mi az ő lelkének hangja volt kezdetben
Együtt hangzik most egy világ orchesterben.

De nem ott zeng-e a csodás harmónia?
Mit megteremtett a kvantummechanika,
Részek káoszában vonz s tol a bősz inger,
„Legyen világosság" s lőn, hogy szólt Schrödinger.

Irigykedésre, lám, nincsen ok hát semmi,
Mit a művészet tud, tudomány is termi.
Színész, festő, költő, szobrász avagy zenész
Mind egyre megy akár tudós, akár művész.

SZOVJET ISKOLÁKBAN

Csányi Vilmos-Kajtár Márton-Marx György
ELTE-TTK, Budapest

Az általános képzés

A szovjet közoktatás fokozott munkát fordít a természettudományos és matematikai nevelés színvonalának emelésére. Az MTA Szovjetunióban járt oktatási küldöttsége számára bemutatott eredmények jelentős mértékben erre a területre estek. Azok a vezető szakemberek, akikkel a Közoktatási Minisztériumban, Szovjet Pedagógiai Akadémián, Szovjetunió Tudományos Akadémiájának intézeteiben, egyetemen és kísérleti iskolákban találkoztunk, többségükben a természettudományos, matematikai és pszichológiai képzettségűek voltak.

Az MTA Természettudományos Oktatási Bizottsága korábbról ismerte a szovjet közoktatás jelenleg általánosan kötelező tananyagát, azt munkájában eddig is felhasználta. (Dubnában dolgozó magyar fizikusok gyermekeinek tapasztalatai az ottani iskolában; a Bizottság vezetőjének elmúlt évben tett szovjet iskolalátogatása; a szovjet tankönyvek, tantervek és szemléltető anyag korábban beszerzett részleges sorozata; akadémiai oktatási kísérletünkben 10 osztály tanulója által használt 8. osztályos magyarnyelvű szovjet fizika tankönyv; vezető szovjet akadémikusok — Kapicza, Kolmagorov, Tamm stb — magyarul megjelentetett írásai; Kapiczával és másokkal folytatott személyes megbeszélések.) A jelen utazás megerősítette és teljessé tette a korábban levont következtetéseket. Ezen túlmenően a tanulmányút lehetőséget adott arra, hogy a legilletékesebbektől tájékozódjunk az új törekvésekre, a jövő szovjet iskolájára vonatkozóan.

A jelenlegi szovjet természettudományos nevelés a gyermekek 70%-át érintő 10 osztályos iskolában sok tekintetben magasabb színvonalú, mint a mai magyar 8 osztályos általánosban és 4 osztályos gimnáziumban. Ennek alapja a szovjet közoktatás és tudósok által a matematikai és természettudományos nevelésre fordított fokozott figyelem, valamint az a körülmény, hogy a 10 osztályos kémia, fizika és csillagászat óraszám eléri-meghaladja a mi 12 osztályunk megfelelő óraszámait. Zubov, a SzPA alelnöke szerint a mai és megmaradó arány: 50% természettudomány és matematika, 50% társadalomtudomány. Kiemelkedően magas a matematika és fizika óraszáma, a természetismeret és csillagászat külön tantárgy. (A természettudományok százalékos óraszámrészesedése messze túllépi a mai magyar értékeket, méginkább az 1978-as tervezet csökkentett értékeit. A szovjet tanterv óraszámait a függelékben közöljük.)

A természetismeret a 2, 3, 4 osztályban külön tantárgyként szerepel, de sikerült megszereznünk az 1. osztályosok által kísérletképpen használt természetismereti munkafüzetet is. A természetismeret jó alapot biztosít a szovjet természettudományos nevelésnek, különösen az UNESCO—IEA felmérés tanulsága szerint e téren határozottan elmaradt magyar alsótagozathoz viszonyítva.

A jelenleg lezáruló iskolareform

A mai tananyag kialakítása 1965-ben kezdődött, amikor a Minisztérium felkérte a SzUTÁ-t és a SzPÁ-t az új tanterv kidolgozására. Az egyes tárgyak tantervjavaslatát a SzUTA, SzPA és a Minisztérium által delegált tanárok vegyesbizottsága dolgozta ki. Így pl. a matematikához a SzUTA többek között Kolmogorov, a fizikához Kapicza, Kikoin, Zeldovics akadémikusokat delegálta, tárgyanként öt akadémikust. (A felsoroltakkal a delegáció egyes tagjai személyesen találkoztak és hosszabban tanácskoztak.) A 2—3 év alatt kidolgozott javaslatokat szakértők széles köre véleményezte. A vélemények figyelembevétele után született meg a végleges tanterv. Ezzel a közös minisztériumi—akadémiai bizottságok munkája hivatalosan végetért. Kitűnt azonban, hogy a modernizált tantervekhez illő könyvek megírására a korábbi tankönyvszerzők nem vállalkoznak, csak ismeret-hiány miatt sem. Így maguk az akadémikusok segítettek az új tankönyvek elkészítésében. Kolmogov akadémikus írta a 6. osztályos matematikát, Kikoin akadémikus a 8. osztályos fizikát. A tankönyvírás előtt az említett akadémikusok személyesen tanítottak a megfelelő osztályokban, hogy megismerjék a gyerekek életkori sajátságait és tudásszintjét. A kéziratokat iskolai kipróbálás után adták ki. Az új tankönyveket egyre több iskolában tanítják, de a tanároknak előzőleg továbbképzésen kell résztvenniök. A 8. osztályos fizikakönyv 1976-tól kezdve lesz kötelező minden szovjet iskolában. (Ezt az MTA természettudományos kísérletei során a II. gimnáziumban használjuk kárpát-ukrajnai magyar változatban. Lengyelre is lefordították, Lengyelországban bevezették.)

Nincs minden új tankönyv készen. Ezért a tankönyvek pillanatnyi színvonala egyenlőtlen. Kiemelkedően szépen megoldott a 8. osztályos fizika, amely a newtoni dinamikát tárgyalja a tiszta dinamikus erőforgalom alapján. Most készül az új 9. osztályos fizikakönyv, ezt még nem ismerjük; a 10. osztályos átdolgozásra kerül.

A 9. és 10. osztályban szintetizáló tárgyként oktatott biológia molekuláris biológiai, genetikai, evolúciós szemléletű. Erőteljes a szerves kémiai megalapozás. Meglepően igényes a 10. osztályban a genetika, sokkal magasabb szintű, mint a hazai tantervekben. Az emelt színvonalat az erős fizikai és kémiai megalapozás teszi lehetővé. A genetika fakultatív tankönyve nemrég készült el, messze meghaladja minden hazai elképzelésünket. A közoktatási miniszternek felvetettük, hogy a hazai akadémiai kísérleti természettudományos osztályokban szívesen használnánk egyes tankönyvnek Kárpátukrajna számára készült magyar fordításait.

Kémiát a négy utolsó osztályban tanítják 2—2—3—3 órában, kísérleti iskolában (Davidov) az 5. osztályban is. A 9. és 10. osztályban sok fakultatív tantárgy szerepel (pl. kémiai analízis, fémek kémiája, szerves vegyületek szerkezetének és tulajdonságainak kapcsolata, kémia és kozmosz, kémiai technológia stb.).

A Szovjet Oktatástechnikai Központ kötelessége, hogy kifejlessze az új tanterv kísérleti eszközeit. Ezen eszközöket az egyszerűség, tartósság és olcsóság jellemzi. A Központ az eszközöket saját iskolájában kipróbálja, ezután adja át sorozatgyártásra. Továbbképző tanfolyamokkal segíti ezek bevezetését. A felszerelések közül kiemelkedően jók a genetika szemléltető eszközei. Nagyon segítené az akadémiai iskolai kísérleteket ezek beszerzése. Izgatja a Központot a képmagnó várható iskolai szerepe. Miként nálunk, Moszkvában sincs még kiforrott vélemény erre vonatkozóan.

A jövő törekvések

Sokirányú kísérlet folyik az 1990—2000 évek iskoláinak kialakítására. Ezeket a küldöttség közös beszámolója részletesen ismerteti. Itt csak néhány szempontot emelünk ki.

Idézzük Prokofjev minisztert: „Az iskolai oktatásban formalizmus tapasztalható. Ennek pedig az a következménye, hogy szakadék tátong az ismeretek és ama képesség között, hogy ezeket az ismereteket reális élethelyzetek mérlegelésekor, feladatok megoldásakor alkalmazni tudják."

A megoldás útja Zubov, a SzPA alelnöke szerint: a tényszerű ismeretanyag csökkentése, az egyetemesen használható elvek készségszintű elsajátítása, sok önálló alkalmazáson történő begyakorlás, önálló tájékozódás.

Vlagyimir Turcsenko (SzTA Szibériai Részleg Kandidátusi Vizsgafelkészítő Intézet igazgatója): „Annak eredményeként, hogy a természettudománynak a technikai haladással összefüggő ágai rohamosan fejlődnek, előtérbe kerül

a fizikából, kémiából, biológiából, kibernetikából és matematikából álló tudománykomplexum."

Prokofjev miniszter szerint az új törekvések két jellegzetessége: „Az iskolai képzés tartalmának minél közelebb kell kerülnie a modern tudományokhoz. — Az ideológiai nevelésnek nemcsak a társadalom-, de a természettudományos nevelésben is erősödnie kell."

A legintenzívebb tantárgyi útkeresés, kezdeményezés a matematika, a természettudomány (talán elsősorban fizika), valamint a nyelvtudomány területén figyelhető meg. A kémiát és biológiát ezután szeretnék a fizikához hasonló szintre emelni. Külön foglalkoznak a nevelés pedagógiai, lélektani, egészségügyi vonatkozásaival.

Teljes egyetértés van abban, hogy az új iskola kialakítása elképzelhetetlen egyidejű iskolai kísérletek nélkül. (Ez igazolja az MTA, ezen belül a matematikai, természettudományi és nyelvtudományi bizottságaink munkamódszerét.) Nagyon előnyös, hogy egyfajta kísérletet egy egész iskolában valósítanak meg. (Ez kiküszöböli azokat a tantestületen belüli surlódásokat, amelyeknek a mi osztályra korlátozódó kísérleteink szenvedő részesei.) A kísérletező tanárokat helyszínen támogatják szakemberek, sőt azok órákat is tartanak. Tanár-tudós együttműködés, az új tartalom és módszer iskolai műhelymunkában való kiérlelése jelenti a munka menetét, nem csupán bizottsági ülések. Az új elterjedése 12—15 évet vesz igénybe. (Ebben az országban hatalmas méreteinek is szerepe van, valamint azon ténynek, hogy gyökeresen új tananyagot csak átképzett tanár taníthat.) Az iskolareform viszont nem egyszeri kampány. Egy periódus eredményeinek elterjedésével egyidőben folyik a következő periódus még modernebb tananyagának kikísérletezése.

A mi eredményeink közül a matematikai szemléltetés, matematikai eszközök keltettek érdeklődést (Varga Tamás), valamint a fizika és kémia egybehangolására kidolgozott anyagunk. (Kikoin a Szovjetunióban megoldatlannak érzi a kémia tantárgy anyagszerkezeti megalapozását, a fizika pedig csak a végén ad anyagszerkezetet). Az új fizikai törekvéseken végigvonul a részecske-modell és a hullám-modell, mint alapvető szemléltető formák (Beljajev akadémikus, a Novoszibirszki Állami Egyetem rektora).

A SzUTA részvételének egyik alapvető formája a természettudományos nevelésben, hogy 1970 óta a SzPA-val közösen kiadják a „Kvantum" című fizikai—matematikai diáklapot. (Szerkeszti Kikoin akadémikus, Kolmogorov akadémikus közreműködésével.) Ez havonta 64 oldalon jelenik meg 140 000 példányban, nagyon friss, meglepően szép, modern és színes kiállításban. A modern alkotó tudományt mutatja be gyerekekhez illő feldolgozásban. Nagyon sok a feladat. Közöl beszámolókat a tudósok és diákok találkozóiról, a kutatóintézetek munkájáról, a fiatal kutatók életéről. A KÖMÁL-t ismerik, de a Kvantum annál jóval sokoldalúbb folyóirat. A SzTU vállalkozását a lap kiadására a kutatóutánpótlás feletti gondoskodás indokolja. Ugyanez motiválta a tagozatos iskolák iránt mutatott érdeklődést.

Tagozatos iskolák

A küldetés legszebb élménye a novoszibirszki látogatás, ezen belül a novoszibirszki Fizikai—Matematikai Iskola megtekintése volt. A delegációból többen teljes napot töltöttünk az iskolában.

1961-ben a Novoszibirszki Állami Egyetem kezdeményezésére létesült ez az iskola, az épületet a SzUTA építette. Azóta Moszkva, Kiev, Leningrád és Tbiliszi létesített hasonló iskolát. Tanulmányi versenyek és nyári tábor alapján választják ki az évente idekerülő 200 diákot. (A verseny célja nem csak felvételi kiválasztás, de az érdeklődés felkeltése a modern tudomány iránt.) A diákok többsége a 9. és 10. osztályt járja itt. A kiválasztottak zöme határozottan gyenge falusi iskolából kerül ki, így a szociális összetétel kedvező. A kiválasztás szempontja a tehetség és nem a tanulmányi előmenetel. (Sok diák eredeti iskolájában komoly beilleszkedési gondokkal küzdött.) A novoszibirszki egyetemre felvettek 25%-a ebben az iskolában végzett.

Az iskolában heti 8 óra a matematika, 9 óra a fizika. A kémia és biológia óraszáma a szokásos, a társadalomtudományi tárgyaké csökkentett. (A teljes társadalomtudományi anyagot elvégzik; erre a szakfelügyelők igen kritikusan ügyelnek. A diákok orosz tanulmányi versenyt is nyernek.) A matematika és fizika „főelőadásait" kutatók tartják (így pl. egyes években Beljajev fizikus akadémikus, az egyetem rektora is). A szemináriumokat és laboratóriumokat tanársegédek, tanárok vezetik. A diákoknak nem az egész tananyagot „magyarázzák el", azt azok kijelölt egyetemi tankönyvekből, segédkönyvekből, népszerű könyvekből tanulják meg. Ilyen módszer mellett érthető,

A szovjet iskolák órafelosztása

Tantárgyak	Heti órák száma									
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
1. Orosz nyelv	12	11	10	6	6	4	3	2	—	1
2. Irodalom	—	—	—	2	2	2	2	3	4	3
3. Matematika	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
4. Történelem	—	—	—	2	2	2	2	3	4	3
5. Társadalomtudomány	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2
6. Természetismeret	—	1	2	2	—	—	—	—	—	—
7. Földrajz	—	—	—	—	2	3	2	2	2	—
8. Biológia	—	—	—	—	2	2	2	2	1	2
9. Fizika	—	—	—	—	—	2	2	3	4	5
10. Csillagászat	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1
11. Műszaki rajz	—	—	—	—	—	—	1	1	—	—
12. Kémia	—	—	—	—	—	—	2	2	3	3
13. Idegen nyelv	—	—	—	—	4	3	3	2	2	2
14. Képzőművészet	1	1	1	1	1	1	—	—	—	—
15. Ének	1	1	1	1	1	1	1	—	—	—
16. Testnevelés	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
17. Gyakorlati foglalkozás	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
18. Honvédelmi ismeretek	—	—	—	—	—	—	—	—	2	2
Összesen	24	24	24	24	30	30	30	30	32	34
19. Felvehető tárgyak (óra)	—	—	—	—	—	—	2	2	4	4
20. Gyakorlati foglalkozás (napokban)	—	—	—	—	5	5	5	—	22	—

hogy a 10. osztályos gyermekek kémiából is (amiből nincs felemelt óraszám) olyan színvonalú tájékozottságot mutatnak (a vegyületek makroszkópikus tulajdonságainak és reakcióinak önálló értelmezése a molekulák elektronszerkezete alapján), amely kb. a mi egyetemeinken a kémiaszakos tanárjelöltek tájékozódóképességének felel meg. (Erről a küldöttség tagjai különböző osztályokat meglátogatva győződhettek meg.) Hasonló mondható el az egzakt megalapozású biológiáról is. A gyerekek ezekben a csatlakozó tárgyakban is igénylik a logikus megértést, egzakt megalapozást. Most építik ki az egzakt megalapozású földtudományi tantárgyat.

A képzést fakultatív kollégiumok rendszere egészíti ki. Ezek nem kötelezőek, de a gyerekek szívesen választják. A második félévtől kezdve a novoszibirszki akadémiai kutatóintézetekbe járhatnak dolgozni. A csütörtök a tanrendben „kutatónap", ilyenkor nincs iskolán belüli elfoglaltság.

A fizikai—matematikai iskolában végzettek főleg fizikus (közel 50%), matematikus, kémikus, biológus, mérnök, geológus, közgazdász szakokra kerülnek. Erős pozitív átvitel van a fizikáról-matematikáról a kémia, biológia, közgazdaságtan felé, mindegyik területen jól használhatóak az itt képzett fiatalok. Az egyetemen az évfolyamok tagozatos iskolából kikerülő hányada nagyon pozitív nevelő szerepet játszik. Az öntevékeny tanulásban, kutatásban mutatott jártasságuk magával ragadja a többi egyetemi hallgatót is. A meggyőző novoszibirszki példa alapján szociális, pedagógiai és tudományos szempontból igen fontosnak látjuk (kis számban) természettudományos tagozatú gimnáziumi osztályok létesítését Magyarországon, a novoszibirszkihez hasonló módszerrel.

A novoszibirszki fizikai-matematikai iskola diákjai vetették fel, azóta megvalósult az ottani iskola és a mi akadémiai kísérletünk természettudományos osztályai között a baráti levélkapcsolat. Az iskola igazgatója és a Szovjetunió közoktatási minisztere ezt a kezdeményezést melegen támogatja.

A szovjet műszaki és természettudományos eredmények láttán az itthoni iskolatervezésben érdemes figyelembevenni a szovjet oktatás tanulságait. Az iskola megújításának munkájában az MTA — saját kutatóutánpótlása érdekében is — aktív részt vállalhat, amely túlmegy az eddigi bizottsági tevékenységen. Ez nem minisztériumi igazgatási funkciók átvállalását jelentené, hanem tényleges és példamutató tudományos nevelést.

FIZIKA KEZDŐK SZÁMÁRA

R. Karplus
University of California, Berkeley

Vegyünk egy rugót, nyújtsuk meg egy vagy két hüvelykkel, és vizsgáljuk a rugó által kifejtett erőt. A probléma nem okoz nehézséget a gyermeknek vagy a laikusnak sem főként, ha erő helyett rántást vagy húzást mondunk. Vegyünk egy másik ugyanilyen hosszú rugót és kapcsoljuk hozzá az elsőhöz. Húzzuk meg, amíg mindkét rugó annyit nyúlik, mint előbb az egyik. Ha most megkérdezzük, hogy mekkora a húzóerő, akkor a legtöbb nem fizikus azt fogja mondani, hogy nyilván kétszeres, hiszen egy helyett két rugónk van. Hogyan tudnánk megmagyarázni, hogy az erő ugyanakkora, mert mindkét rugó ugyanannyival nyúlt?

Egy rokon fogalmi probléma vált világossá számomra, mikor egy lelkes első osztályos tanítónő elmondta tapasztalatait, melyeket „húzás" és „tolás" tanítása közben szerzett az általam készített gondolatmenet alkalmazásakor. A program használhatóságának demonstrálására elmondta, hogyan alkalmazta két tanuló az óra után a hallott gondolatokat veszekedés közben. Jimmyt sikerült kiütni, Tom büszkén magyarázta, hogy ez azért ment olyan könnyen, mert ő erősebben lökte meg Jimmyt, mint ahogyan Jimmy lökte Tomot. Eredmény: Jimmy elesett.

Ilyen és hasonló tapasztalatok meggyőztek arról, hogy a klasszikus fizikában alapvetően fontos erőfogalom — mely éppen ezért a fizikatanítás folyamán korán kerül bevezetésre — nehézségeket okoz, ha kezdőknél akarjuk felhasználni jelenségek magyarázására. Ez még akkor is igaz, ha mellőzük a kinematikai hátteret, a sebesség, valamint a gyorsulás tárgyalásánál a matematikai határérték eljárást, és az erő bevezetésénél közvetlenül rugalmas tárgyakon végzett megfigyelésekre támaszkodunk. Az első említett példa esetében a megfigyelő ösztönszerűen a két rugóból álló rendszerben tárolt energiára gondolhat, ami valóban kétszerese az egy rugó által tárolt energiának. A második példa esetében a gyermekek nem ismerték fel következetesen az erőhatást kifejtő és erőhatást szenvedő testeket és inkább az energiaátadás érzése élt bennük.

A kérdés már most az, hogy milyen tudományos fogalmat lehet használni, ha az erőfogalom közvetlenül nem alkalmazható? Kvantumelméleti tanulmányaim arra a meggyőződésre vezettek, hogy a „kölcsönhatás" sokkal általánosabb fogalom, mint az erő vagy akár az energia. Hasznos olyan nem klasszikus problémák tárgyalásánál, melyeket az erőfogalom segítségével nem sikerül leírnunk, és felhasználható termodinamikai, elektromos, kémiai és biológiai jelenségek esetében is. Rámutathatunk kölcsönhatásokra hőmérsékletváltozásoknál, színváltozásnál, mozgásnál, fázisváltozásnál és más, közvetlenül észlelhető hatásoknál, melyeket könnyen felismer az is, aki a természettudományok tanulásában kezdő, de a haladottabb tanuló is. Ha a mozgásváltozások kvantitatív módon leírhatók, a kölcsönható erő mérhető és felhasználható a jelenségek elemzésére, megjóslására. Hőmérséklet- és fázisváltozások esetében a beadott és kivett hő (energiaátadás) hasznosabb mérték a kölcsönhatás erősségére, a munka (energiaátadás) fogalom viszont gyakran jobban felhasználható a mozgásváltozás megértéséhez.

A kölcsönhatásból kiinduló szemlélet igazi pedagógiai előnye abban rejlik, hogy sikerrel lehet felhasználni kvalitatív tárgyalásnál. El kell ismernünk, hogy a pontos mérés és a kvantitatív leírás nem tartozik a legtöbb ember (szülő, tanító, gyermek) hétköznapi környező világának értékei közé. A természettudományok, főleg a fizika világán kívül érzések, benyomások, a külső látszat sokkal lényegesebb szerepet játszanak, mint a számoláson alapuló okoskodás. Véleményem szerint

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulatban 1973-ban tartott előadás. Megjelent: Physics Today, 1972 június. Fordította Kunfalvi Rezső.

ez a nehézség áthidalható, ha az erőt és az energiaátadást csak akkor vezetjük be, mikor a kölcsönhatást már megértették. A természettudományok tanításánál egész koncepciónk nem függhet ezen kvantitatív fogalmak korai megértésétől.

Ezzel a megjegyzéssel szeretnénk bevezetni a Science Curriculum Improvement Study (SCIS) fizikai szemléletének alapgondolatát. Az utóbbi 10 évben a SCIS kidolgozott egy programot az elemi iskolai tanítás számára. A programnak az a célja, hogy a tanulók és ezen keresztül az egész népesség alapismereteit magasabb szintre, mintegy a „természettudományos alfabetizmus" szintjére emelje. A program általános stratégiája abban áll, hogy az elemi iskolás gyermeket első kézből szerzett kísérleti tapasztalatok, természeti tünemények megfigyelése elé állítjuk, és ösztönző feladatokkal irányítjuk további szellemi fejlődését. Ez azt jelenti, hogy az osztálytermet lényegében laboratóriummá kell átalakítani, ahol a gyermek eszközöket vehet kézbe, feladott kérdésekre maga keresi a választ, és megfigyeli saját tényked̈ésének eredményét. A megfigyelések értelmezéséhez vezető kulcsgondolatok jöhetnek a tanártól, vagy maguktól a gyermekektől. Vonatkozik ez a használt eszköz és anyag *tulajdonságaira*, a *kölcsönhatás* fogalmára, az *energiaforrásra* ill. *energiaátvevőre*, a *változókra*, melyek felelősek az egyes kísérletek eredményében észlelhető különbségekért, az észleltek magyarázatához felhasználható *modellekre*. A biológiai tudományok fogalmai az *organizmusokhoz* vezetnek és azok kölcsönhatásához a *környezettel*. Ezek a szempontok bármilyen korú kezdők tanításánál felhasználhatók.

Miért kell természettudomány az elemi iskolában?

Csak a legutóbbi 10 évben ismerték fel, hogy milyen fontos a természettudományok tanításának szerepe az elemi iskolákban. Azelőtt általában azt hitték, hogy a gyermek szellemi képessége csak az olvasás, írás és számolás alapismereteinek elsajátítására elég. Ezért az elemi iskolák tanterve ezen készségek kialakítására koncentrált, és egyéb területek, pl. természettudományi és társadalmi ismeretek legfeljebb ezekbe beépítve szerepeltek. Azt várták, hogy a gyermekek gondolkodása magától fejlődik, míg a felsőbb iskolában az egyes tantárgyak a tanterv lényeges részeivé válhatnak. A gyermekek zömének fejlődése azonban nem tartott lépést az iskola várakozásával. Csalódtak a tanulásban és elvesztették érdeklődésüket.

A gyermek fejlődése a korai stádiumban a régi nézet szerint nagyrészt csak várakozás az érettségre. Ma már sokfelé elismerik, hogy az intellektuális ösztönzés a fejlődés éveiben éppen olyan fontos, mint a vele született képesség. A kettő együtt határozza meg a gyermek későbbi teljesítményeit. Ezért az elemi iskola feladata sokkal nagyobb, nem elégedhet meg az írás, olvasás, számolás mechanikus tanításával.

Meg szeretném röviden magyarázni, hogyan járul hozzá a természettudomány az értelmi fejlődéshez. A természettudomány mai tartalma szerint fogalmakból és kapcsolatokból áll, melyeket az emberiség a természet jelenségeinek évszázadokon át végzett megfigyeléséből szűrt le. Ez az ismeretanyag hosszú és lassú folyamat eredménye. Az elemi iskolában eltöltött évek alatt fiúk és lányok ugyanilyen absztraháló processzusokat csinálnak végig a saját természetes környezetükben. Tapasztalatokat gyűjtenek, és gondolkodásuk folytonosan átmegy a konkrétról az absztraktra. A tapasztalat szerint azonban az ilyen spontán kifejlődő megértésnél sok a hiányos és hibás fogalomalkotás.

Az iskola egyik feladata éppen az, hogy a gyermek fejlődését megfelelő tapasztalatszerzési lehetőségekről gondoskodva irányítsa, olyan ösztönző és információt tartalmazó lehetőségekről, amelyek azután az absztraháláshoz alapul szolgálhatnak. A gyermeknek egyidejűleg bizonyos fogalmi keretet kell nyújtani, mely az értelmes megfigyelést teszi lehetővé. A fogalmi szerkezet segít a következtetések általánosításában, ezáltal általánosabb, értékesebb ismeretekhez jutnak, mint azt a maguk erejéből tehették volna.

Az itt leírt lelki folyamat felismerése nagyrészt a híres svájci pszichológusnak, Piagetnek[1] köszönhető. Az ő gondolatait azután amerikai szakemberek, pl. Millie Almy,[2] Jerome Bruner,[3] J. Mc V. Hunt,[4] Celia Stendler Lavatelli[5] és mások továbbfejtegették és oktatási problémákra alkalmazták. A Piaget-féle iskola két alapgondolatra épül: a gyermek szellemi kapacitása a felnőtt kor előtt több minőségileg különböző és ellentétes szakaszon megy át; és a gyermek kölcsönhatása a környezettel döntő szerepet játszik az egyes szakaszok közti átmenetnél. [L. Piaget cikkét a Physics Today jelen számában.]

Az egyes szakaszok jellemzői szerzőnként változnak, de abban mindenki megegyezik, hogy a gyermek gondolkodási módja erősen eltér a felnőttétől. Pl. Piaget[1] a fejlődés négy szakaszát különbözteti meg. Csak a negyedik, *formális műveletek*nek nevezett szakaszban ismeri fel az egyén a relációkat, a hipotézisek és a tények implikációját. Az utolsó előtti, a *konkrét műveletek* szakaszában az egyén olyan műveleteket végez az okoskodásban, mint pl. az osztályozás, besorolás, időrendi sorrend, de nem tudja még felhasználni ezeket a műveleteket hipotézisek szavakkal történő kifejezésére. Ezt megelőzi a preoperatív (pre-operational) szakasz: a gyermek számára a tárgyak és tények léteznek, azokat külső megjelenésük szerint le tudja írni, de az időbeli változásokat mint fizikai átalakulás eredményét nem érti. Csecsemő korban létezik egy *szenzoros-motoros preverbális szakasz*, melyben tárgyak létezését, azok egyszerű térbeli viszonyát vizuális és kinesztetikus felfedezések kombinációja segítségével állapítja meg.

Ezt a vázlatos elképzelést néhány egyszerű példával illusztrálhatjuk. Könnyen igazolhatók is gyermekekkel foglalkozva. Gyermekek a preoperatív korszakban nem képesek megmaradási

elveken alapuló okoskodásra: pl. ugyanannyi folyadékot öntve különböző alakú edényekbe, azt mondják, hogy az egyik edényben több van, a másikban kevesebb; ha pénzdarabokat sorba rakunk vagy körbe, vagy egy halomba, akkor azt mondják, hogy az egyik elrendezésben több van, mint a másikban.

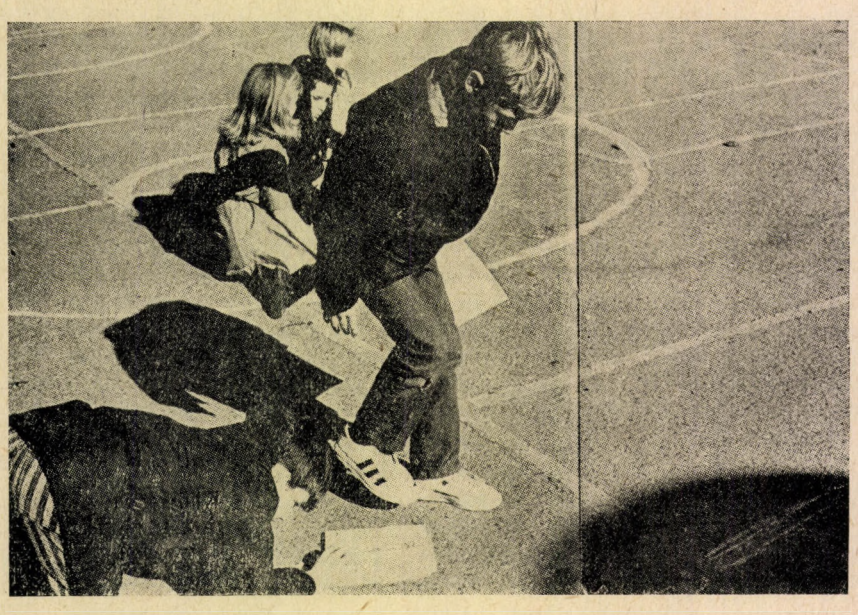
Megmaradási elv alapján okoskodó gyermekek már a konkrét művelet fokán vannak. Felismerik, hogy egy mennyiség ugyanannyi marad, ha nem veszünk el vagy nem adunk hozzá semmit, a külső megjelenési forma változhat. Más szóval felismerik, hogy a folyadék magasságát a keskeny edényben helyettesíti a szélesség, a széles edényben. Sorba tudnak rendezni tárgyakat adott tulajdonság szerint, tudják, hogy ha A tárgy nagyobb B-nél és B tárgy nagyobb C-nél, akkor A nagyobb C-nél (tranzitivitás). De még nem képesek absztrakt okoskodásokra, csak konkrétekre. Egészeket fel tudnak osztani részekre $\left(1 : 4 = \frac{1}{4}\right)$, de nem tudnak osztani törtekkel $\left(1 : \frac{1}{4} = 4\right)$, mert ennek a műveletnek nincs konkrét megfelelője. Hasonlóképpen nem tudják összehasonlítani két olyan tárgy energiáját, amelyek közül az egyik nehéz és közel van a padlóhoz, a másik könnyű, de magasan van. Más szóval, nem ismerik fel, hogy az energia a magasság és a nehézség együttes függvénye; bár felismerik, hogy az edényben levő folyadék mennyisége a magassággal és a keresztmetszettel van összefüggésben.

Az egyes szakaszok eléréséhez szükséges életkor egyénenként különbözik. A preoperatív szakasz kb. 2 éves korban kezdődik; a konkrét műveletek kora 5 és 10 év között; a formális műveletek szakasza 10 és 15 év között. Azt is tudjuk, hogy az átlépés az egyes szakaszok között nem hirtelenül következik be. A fejlődés egyes területeken korábban, más területeken később történik. Így előfordulhat az, hogy egy 15 éves tanuló a konkrét műveletek fokán van az arány fogalmával kapcsolatban,[7] de már a kombinációs gondolkodásban formálisan tud okoskodni (pl. hányféleképpen lehet felöltözni, ha két szoknyánk és három blúzunk van?).

Gyermekek értelmi fejlődését előmozdító program elkészítéséhez tudnunk kell, hogy milyen tényezők vannak rá befolyással. A fiziológiai fejlettségen kívül — melyre az iskola nem tud befolyást gyakorolni — a két legjelentősebb tényező az önszántából végzett fizikai és értelmi tapasztalatgyűjtés egy arra alkalmas, gazdag környezetben, és a kölcsönhatás szülőkkel, tanítókkal, társakkal. Az első gazdagítja a gyermek élményeit tárgyakkal, jelenségekkel és azok befolyásolásával kapcsolatban. Az utóbbi a tapasztalatok és azok értelmezésének szóbeli vagy jelekkel történő kifejezésére ösztönöz, — mindkettő lényeges lépés az absztrahálás felé. Természetesen a másokkal való kommunikáció szintje meg kell hogy feleljen a gyermek fejlődési fokának. Hunt a helyzetet a következő módon foglalja össze:

„A gyermeki fejlődés irányításának problémája abból áll, hogy megtaláljuk azokat a módokat, ahogyan a gyermek a környezetével találkozik. A cél optimális ütemű szellemi fejlődés útján megelégedett életformát kialakítani."[8]

Mit mondjunk arra a gyakran hallott érvre, hogy a természettudományok tanítását a tízes évek közepének értelmileg fejlett korára kell halasztani? Ezen a fokon, sajnos, az iskola törekvése a tanulóknak csak azt a kis hányadát befolyásolhatja, amelyik kedvező otthoni vagy iskolai hatás alatt megszerette a természettudományt. A tanulók nagy része esetében már elkéstünk, mert közben megutálták. Értelmi fejlődésük nem tart lépést az iskola várakozásával vagy nem a modern természettudomány felé irányul. Az utóbbi évek egyetemi jelentkezései azt bizonyítják, hogy a fizika iránt érdeklődő és alkalmas csoport kicsiny.



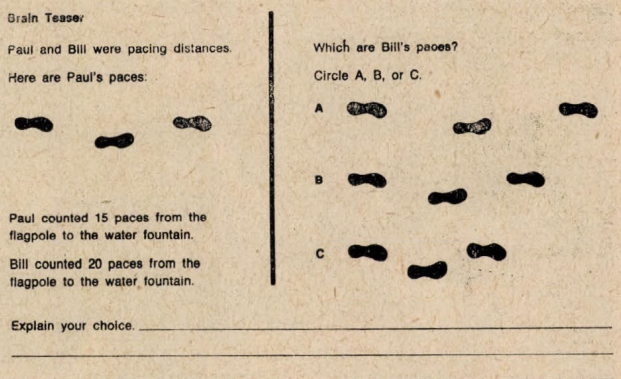
Ezek a negyedik osztályos tanulók a játéktér egyik pontján elhelyezett zászló távolságát mérik le feladatként a „Relatív hely és mozgás" c. egység feldolgozása közben. Az egyik fiú egy irányzékkal az irányt adja meg, a másik lépeget a kiindulási ponttól.

Az elemi természettudományi program potenciális értékét sok olyan pedagógus kiemelte, aki a természettudományok tantervének tágabb célkitűzésével foglalkozott. Mégis mindenki egyetért abban, hogy a tanítási gyakorlat nem tart lépést a tanulók igényével. Charles Silbermann szerint[9] a legtöbb iskola többet és szívesebben foglalkozik szervezési és ellenőrzési kérdésekkel, mint a tanulók képességeinek fejlesztésével, vagy a tanulók által kezdeményezett és tervezett aktivitások elősegítésével. A mai gyakorlat egyik nagy gyengéje, melyet államunk törvényei is elősegítenek, az, hogy túlságosan támaszkodik tankönyvekre és más tekintélyt jelentő forrásokra. Ezek a források egyáltalán nem érnek fel hatásukban a tanulók közvetlen tapasztalatával, melyek az iskolán kívül józan valóságukkal hozzájárulnak a tanuló értelmi fejlődéséhez. A mai iskolai tanítás ahelyett, hogy ezt a fejlődést irányítaná a modern tudományos érdeklődés felé, egy másik, ettől elszigetelt, absztrakt struktúrát, valamint könyvműveltséget teremt, mely az iskola padjain kívül sokra nem használható fel és elsorvad.

A mondottakat nem szabad úgy értelmezni, hogy a tanuló csak azt tudja megtanulni, amit saját maga tapasztal; a világ túl bonyolult ahhoz, hogy ezt a luxust megengedhesse. Azt jelenti azonban, hogy a fiatalkori tanulóévekben az iskolának gondoskodnia kell változatos programról, minél több konkrét tapasztalat szerzésére. Nehézséget okoz, hogy a konkrét tapasztalatot olyan kontextusban kell nyújtani, amely segít a fogalmak építményének kialakításában. Erről sajnos gyakran megfeledkeznek. Ilyen fogalmak a kölcsönhatás és annak változatos szerepe fizikai, kémiai és biológiai rendszerekben. Ebben az esetben és csak ebben az esetben képeznek a fiatal korban tanultak alkalmas alapot a későbbi tapasztalatok teljes értékű asszimilálásához, olyan tapasztalatokéhoz, melyek vagy közvetlen észlelésből vagy szóbeli, esetleg kép útján történő közlésből, mások tapasztalataiból származnak. SCIS erre a funkcionális megértésre használja a „természettudományos alfabetizmus" kifejezést („scientific literacy"). Ez az elemi természettudományos műveltség a SCIS elemi iskolai programjának fő célkitűzése.

Példák a SCIS programjából

Már említettem, hogy a tananyag tényleges alakja a hatás szempontjából legalább épp olyan fontos, mint az elméleti alap. A SCIS elemi iskolai program 12 egységre oszlik, melyek egy fizika-természettudományi és egy biológiai sorozatot alkotnak.[10] Minden egyes egység kb. féléves programot tartalmaz, de csökkenthető vagy hosszabbítható a rendelkezésre álló idő szerint (rendszerint heti 2 óra). Alkalmazkodhat a gyermekek érdeklődéséhez és bővíthető nem kötelező aktivitások beiktatásával. Az egy-egy egységhez rendelkezésre álló anyag tartalmazza a tanár számára készült kézikönyvet, a szükséges felszerelést, a tanulók munkafüzeteit és a szemléltető eszközöket. (További információt nyújt a kiadó[10] vagy a cikk írója.)



Fejtörő 9—11 éves gyermekek részére, akik a "Relatív helyzet és mozgás" c egységgel foglalkoznak. A feladat előtt a tanulók távolságokat mérnek az osztályban és a játszótéren.

Fejtörő

Paul és Bill távolságot mértek lépéssel

Paul 15 lépést számolt a zászlótól a csapig

Bill 20 lépést számolt a zászlótól a csapig

Melyik Bill lábnyoma? Karikázd be A-t, B-t vagy C-t.

A

B

C

Magyarázd meg, miért választottad.

Az elemi iskolai egységben a tanulók aktivitása konkrét műveletekben való gondolkodásra ösztönöz. Így pl. az első osztályosok osztályoznak különböző gombokat, kísérleteznek úszó és elmerülő tárgyakkal. A másodikosok törési jelenséget („Schliere") figyelnek meg, mikor rézklorid oldódik vízben, majd visszanyerik a szilárd anyagot a víz elpárologtatása után (az anyag megmaradása). Harmadik osztályosok hisztogramokat készítenek víz—jég rendszer hőmérsékletére kapott adatokból, később gumiszalaggal forgásba hozott rendszerek forgásában észlelhető különbségek okait kutatják.

A 9—12 éves tanulók számára készített haladó egységeknél a cél a formális gondolkodásra irányul. Az elején a tanár abba a kísértésbe eshet, hogy túl sokat vár a tanulótól. A SCIS program készítői nehéz helyzetben voltak, amikor meg kellett határozniuk, hogy ez a korosztály milyen szintet érhet el, ugyanígy a középiskolai tanár is nehéz helyzetben van a követelmények reális megítélésénél. Részletesen ismertetek négy, ebben a korban végzett tevékenységet, melyek éppen a fizikatanulásnál lesznek fontosak később. A cél az okoskodás ösztönzése formális szinten, de úgy, hogy ne rettentse el a preoperatív vagy a konkrét műveletek szakaszában levő tanulókat sem, akik a többséget képviselik ebben a korosztályban.

1. A 2. ábrán látható fejtörőt a „Relatív helyzet és mozgás" c. egységből vettük. Ez előtt a feladat előtt a tanulók lépésekkel mértek már távolságokat különféle tárgyak között az iskola játszóterén és egyszerű térképet készítettek a te-



Jégolvasztás. A két fiú jég és meleg víz kölcsönhatását vizsgálja műanyag pohárban. Meghatározzák a hőmérsékletet és hengerpohár segítségével az olvadt jég mennyiségét. Összehasonlítják egy és két kanna meleg víz hatását.

repről. Vegyük észre, hogy a fejtörő nemcsak a feleletet, hanem annak indokolását is megkívánja, továbbá annak leírását, hogyan jutott a tanuló a válaszhoz. Az indokolás a logikus gondolkodás fejlesztésében két szempontból is lényeges: a gyermek megszokja a magyarázat fogalmát, — hogy semmi sem történik ok nélkül, ötletszerűen, előre nem láthatóan; másodszor, a tanulóban tudatosodik a gondolkodás, az a folyamat, melyet tudatosan kell végeznie és irányítania, ha formálisan gondolkodni akar. Egyik negyedikes osztályban a tanulóknak kb. a fele helyesen választotta a C választ, de csak kevesen magyarázták meg, hogy ugyanazon a távolságon több lépés, kisebb lépéshosszat jelent. Más tanulók az A-t választották, a magyarázatban összetévesztve a „több lépést" a „hosszabb" lépéssel. Néhányan magyarázat nélkül a B-t választották, nyilván olyan jellegű összehasonlító feladatnak képzelték, amilyen az iskolai munkában gyakran előfordul. Az összehasonlítás itt persze fogalmi feladat, melynek végrehajtásához az ábrán nem látható egész távolságra kell következtetni. Ha az egész távolság és a két fiú lábnyoma látható lenne, akkor egyszerű percipiálásról (lépések számlálásáról) lenne szó.

2. Laboratórium orientációjú programnál a pontos kísérlet fontos tényező. Hasznos következtetéseket csak úgy lehet levonni, ha a kísérletek tantermi viszonyok között, a rendelkezésre álló eszközökkel, a tanulók gondos munkáját véve alapul elvégezhetők. Az „Energiaforrások" elnevezésű egység egyik kísérleténél az ötödik osztályosok összehasonlítást végeznek a megolvadt jég mennyiségére vonatkozólag, miután egy ill. két kanna meleg vizet öntöttek két jégkockára és 5 percet vártak. Az észlelést befolyásolja az ellocsolt víz mennyisége, a rosszul mért idő, a hibásan leolvasott mérlegskála és a kéz melege. Mégis az egyik osztályban 2—2 gyermekből álló 10 csoportból 7 kapott 2,2 és 2,8 közötti értéket (az elméleti várakozás 2,0). Az adatok meglehetősen egybehangzóak, mégsem lehet matematikai modellt építeni ezekre az eredményekre.

Mi van a hőegyensúllyal ennél a rendszernél? Mind a húsz végső hőmérséklet 33°F és 42°F között volt. Sok gyermek azonban arra gondolt, hogy a hőmérséklet tovább süllyed, ha tovább várunk, mert a kölcsönhatás időtartama fontos tényező.

További feladat, a fenti kísérlet után, azt kívánta, hogy a tanulók jósolják meg a víz végső hőmérsékletét és a megolvadt jég mennyiségét, ha 3 kanna 110°F hőmérsékletű vizet öntenek két jégkockára, és hagyják azokat egymásra hatni 5 percig. Az összes tanuló 40°F körüli hőmérsékletet jósolt az előző kísérlet alapján, de csak kettő gondolt a víz mennyiségére a második kísérletnél, az egyik megemlítve a megfigyelt jégmennyiséget, egy ill. két kanna esetében, a másik hárommal szorozva az egy kanna esetén nyert értéket. A többi vagy nem adott semmiféle magyarázatot, vagy valami ilyesfélét mondott: „Azt hiszem, az lesz a helyes érték. A meleg víz több jeget olvaszt meg, ha három kannával öntünk a jégre."

3. A kísérlet megbízhatóságának kérdése a hatodik osztályban is fellép. Példánkat a „Modellek: elektromos és mágneses kölcsönhatások" c. egységből vesszük. A gyermekek egy kis Alnico rúdmágnest használnak, melynek két vége vörösre ill. sárgára van festve. Két négyszögletes ferrit mágnes pólusait kell megjelölni a következőkép-



Mágneses tér. A kislány vasreszeléket hint a papírtálcára, mely eltakar egy ferrit mágnest. Amikor meg van elégedve az eredménnyel, ragasztóval rögzíti, hogy az osztálynak bemutatva összehasonlítsa a társak eredményeivel.

pen: vörössel azt az oldalt, amely taszítja a vörös véget, sárgával azt, amely taszítja a sárga véget. Ezután következett a kölcsönhatás megvizsgálása a megjelölt ferrit mágnesek között. 24 gyermek közül 22 jelentette, hogy a vörös oldalak taszítják a vörös oldalakat és vonzzák a sárgákat. Csak kettő találta az ellenkezőjét. Ebből azt állapíthatjuk meg, hogy kettő kivételével mindegyik gyermek következetesen végezte el a jelölést.

4. Kísérletünk szintén a „Modellek" egységben szerepel. A tanulók megvizsgálják az áramkörbe kapcsolt krómnikkel drót melegedését, azután a drót hosszának változása hogyan változtatja meg a viszonyokat egy elektromos áramkörben, ha a drótot egy kis izzóval párhuzamosan vagy sorba kapcsoljuk. 21 gyermek közül 5 egész határozottan elektromosságról írt ilyenfélét: „Az elektromosság jobban megy végig egy rövid dróton, mint egy hosszún." 10 gyermek megfigyelésével világos általános kifejezésekkel számolt be: „Ha a drótok közel vannak egymáshoz, a fény erősebb, ha távol vannak egymástól, akkor gyengébb." Ezek nem beszélnek sem elektromosságról, sem energia közvetítésről. Négy gyermek leírása zavarosabb volt, kettő nem vett észre semmi hatást. A csoportnak több tagja haladóbb jellegű választ adott, mint a konkrét műveletek szakaszába tartozó tanulók más csoportokban, akik így írták le saját megfigyelésüket: „Amikor eltávolítottam a drótokat egymástól, az izzó gyengébben égett", csak néhányan használták fel a korábban már bevezetett modellt, mely szerint elektromosság az áramkörben energiaszállítást hajt végre.

Ezeket a példákat ugyan SCIS program kontextusából kiemelve mutattuk be, mégis talán remélhető, hogy a program céljáról, mélységéről és stílusáról tájékozást nyújtanak. A kvalitatív jellegű aktivitás (3. példa) határozottan jobb eredményt mutat, mint a kvantitatív jellegű kérdések a többi példában. Legalábbis ez az én véleményem, a kísérletek pontosságára felállított mérce alapján. Más példák is ugyanezt mutatják. A legtöbb gyermek képzelőerőről és jó felfogásról tesz tanúságot a kvalitatív leírásban (dróttekercs hatását vizsgálva mágnesre áramkör zárásakor és nyitásakor: „Olyan mint a szívdobogás, érzem a rezgést"), de az érdeklődés megcsappan, amint numerikus adatokat kell analizálni.

Ebből arra kell következtetnünk, hogy a gyermek még 11—12 éves korban sem érett tudós, de haladó tanuló sem, és más következtetésre jut a kísérlet alapján, mint a tudós. Nem jelenti azonban azt, hogy a kísérlet „hiábavaló". A gyermeknek szüksége van stimulálásra a saját szintjén, a szint egy osztályon belül is igen különböző lehet. A megfelelő anyag kiválasztásánál figyelembe vettük a gyermek gondolkodását, kísérletező képességét, előzetes ismereteit, természetes érdeklődési körét, biztonsági szempontokat, költséget és az eszközök megbízhatóságát.

Úgy érzem, hogy a SCIS tananyaga ösztönző erőt képvisel mind a tanító, mind a gyermek számára. Nem gondolom, hogy általános, tanítótól független, mindenütt alkalmazható megoldás vagy hogy minden gyermek eljut vele ugyanazon fokra a kitűzött célnak megfelelően. Minden tanár és minden tanuló használja fel az anyagot a saját egyéniségének megfelelően. Lesznek közös elemek, de lesznek egyéni megoldások és szempontok is. Biztos azonban, hogy minden tanár ösztönző tapasztalatokban gazdagabb élményt fog nyújtani, ha a SCIS programot is használja, mintha nélküle dolgozik.

Középfokú és felsőfokú természettudomány

A gyermek értelmi fejlődésének tanulmányozása és annak viszonya az elemi iskolai oktatáshoz fontos hatással van a középfokú és a felsőfokú természettudományi oktatásra. Az egyetemi hallgatók és más felnőttek körében szerzett tapasztalatunk azt mutatja, hogy formális szinten okoskodásuk színvonala nem kielégítő a modern természettudományos gondolatok megértéséhez.[11] Ezen nem lehet csodálkozni, hiszen kevés iskola nyújt rendszeresen okoskodást és magyarázatot követelő aktivitást. A középiskolások és az egyetemi hallgatók nagyjából két csoportba oszthatók: egy kis számú csoport fejlett formális gondolkodási struktúrával, amelyik tudja használni a fizika- és matematika tanulmányaihoz szükséges matematikai-tudományos okoskodást, és a nagy többség fejlett formális gondolkodási készség nélkül, amelyik ily módon eredményesen természettudománnyal csak konkrét anyaggal kapcsolatban képes foglalkozni, olyan szinten, mint az elemi iskolás tanulók. Másszóval a „kezdők" a fizikát korra és iskolai múltra való tekintet nélkül bizonyos egyszerű tapasztalatokkal és elemi fogalmakkal kell hogy kezdjék. Még a felnőttek számára is — ha egy új területtel kezdenek foglalkozni — legcélszerűbb először a konkrét szinten átmenni, hogy megbarátkozzanak a törvényszerűségekkel és a folyamatokkal.

Sok fizikaoktató sajnos nem foglalkozik szívesen kezdőkkel. Elsőrendű feladatuknak a kis számú elittel való foglalkozást tartják, akiknek sikerült feljutniuk a formális gondolkodás szintjére. A kevésbé haladott, kezdő tanuló előtt két akadály is van. Egyik az olyan kvalitatív laboratóriumi munka hiánya, amely szélesítené látókörét, másik a mozgás Newton-féle elméletének hangsúlyzott szerepe. Erről cikkünk elején szóltunk.

Állításom bizonyítására hadd mondjak el néhány példát a saját tapasztalatomból. Az egyik — humán szakos — hallgató egy csészében levő meleg víz hőmérsékletét akarta megmérni. Az apró hőmérőt gondosan lerázta, két percre a vízbe dugta, kihúzta és az izzólámpa mellé tartva leolvasta. A másik panaszkodott, hogy egy vízzel és jéggel végzett kísérletben „a hőmérő 33° Fahrenheitnél megállt és csak akkor ment feljebb, amikor az összes jég elolvadt". Elsőéves hallgatók egy differenciál- és integrálszámításra épített tanfolyamon zavarban voltak, amikor egy négyszögletes ferrit mágnes pólusait a lapoldalon találták. Nem voltak

képesek összeegyeztetni ezt a jelenséget a mágnestűről és vasreszelékről szerzett ismereteikkel, melyeknél azt látták, hogy a pólusok a végeken vannak. (Bár zavarukról szavakkal igen részletesen be tudtak számolni, nem jutottak el logikai következtetésben a hatodik osztályosok szintjére, akik ugyanazoknak a lapmágneseknek lapjain a pólusokat helyesen jelölték meg.) Ugyanabban a csoportban egyes hallgatók nem tudtak megoldani olyan problémát, amelyben a helyzet elemzésére és nem ismert, betanult formulába való numerikus helyettesítésre volt szükség. Ezek a nyilván nem egyedülálló esetek bizony meglepőek a California Egyetem oktatója számára!

Azt hiszem, legtöbben behunyjuk a szemünket, amikor a hallgatók tudásának valóságos szintjét vizsgáljuk az osztályban. Engedjük, hogy árnyék boruljon a többség nehézségeire, míg mi gyorsan haladunk előre azzal a néhány hallgatóval, aki a Piaget-féle osztályozás szerint a formális gondolkodás szintjén van. A legtöbb modern középiskolai program elsősorban ezekre gondol. Az új egyetemi kurzusok még igényesebbek. Az eredmény inkább szelekció, mint tanítás.

A legutóbbi időben mintha türelmesebb hozzáállás lenne észlelhető. Leginkább a községi (városi) iskolák tanárai igyekeznek, keresik a kapcsolatot növendékeikkel azon a szinten, melyen ténylegesen vannak és nem amilyenen szeretnék, hogy lennének. Néhány tankönyv a kezdő tanuló ill. hallgató számára megfelelő fogalmi struktúrát nyújt. Ilyenek pl. a PSNS, An Approach to Physical Science,[12] az egyetemi szintű Physical Science[13] és az Introductory Physics, a Model Approach.[14] Otthoni laboratóriumi felszerelés kezdők részére készülőben van, hogy pótolja az iskolai hiányokat.[15] Felismerik fokozatosan a jövendő tanárok igényeit, akik kezdőként állnak kezdők előtt az osztályban.[16] A Council on Physics Education és az American Association of Physics Teachers felhívásában kiemelte a különböző korú, nem speciálisan fizikus tanulókkal való foglalkozás fontosságát.

Lehet tűnődni azon, hogy a konkrét műveletek szakaszában levő tanulónak készült program segítségével ki lehet-e fejleszteni a formális gondolkodást középiskolai vagy egyetemi szinten. Nem tudom, történt-e valami ezen a területen, de hiszem, hogy a problémát egyszer felismerve előrehaladást lehet elérni. Ez a téma érdekel most különösképpen. Abban is bízom, hogy egy józan, erősen ösztönző elemi iskolai program ebben is sokat fog segíteni, mert meghosszabbítja a fejlődésre szánt időt.

Mit lehet tenni?

Cikkem végén segítséget szeretnék kérni. Ha egy emberi életre alkalmas környezetet akarunk a mai technológiai színvonalunkkal elérni, akkor magasabb szintű természettudományi „alfabetizmus" alapvető követelmény. Az oktatási és hírközlő intézményeknek ehhez segítségükkel hozzá kell járulniuk. Az olvasó használja fel speciális tudását és hozzáértését ebben az óriási vállalkozásban való részvételben. Arra kérjük, hogy lépjen érintkezésbe a helyi iskolákkal és felsőbb tanintézetekkel. Vizsgálja meg, hogy milyen fizikát, ill. természettudományos ismeretet nyújtanak kezdőknek, és beszélje rá őket az elérhető új anyagok használatára. Ajánlja fel a pedagógusoknak segítségét nehéz feladatuk végrehajtásához. Hívja meg a tanulókat laboratóriumába, írjon népszerű cikkeket hallgatók és a szélesebb közönség számára a saját területéről. Ha olyan szerencsés helyzetben van, akkor anyagilag is támogassa az újítással foglalkozó pedagógiai törekvéseket.

IRODALOM

1. Piaget: The Child's Conception of Physical Causality (A gyermek fogalma a fizikai kauzalitásról), Littlefield Adams, Paterson N. J. (1960); B. Inhelder, J. Piaget, The Growth of Logical Thinking from Childhood to Adolescence (A logikai gondolkodás fejlődése gyermekkortól az ifjúkorig), Basic Books, New York (1958)
2. M. Almy, E. Chittenden, P. Miller: Young Children's Thinking (Fiatal gyermekek gondolkodása), Teacher's College Press, New York (1966)
3. J. Bruner: The Process of Education (Az oktatás-nevelés művelete), Harvard U. P., Cambridge (1960)
4. J. McV. Hunt: Intelligence and Experience (Értelem és tapasztalat), Ronald, New York (1961)
5. C. B. Stendler: Am. J. Phys. 12, 832 (1961)
6. R. Karplus, C. S. Lavatelli: „Conservation" and „Classification" („Megmaradás" és „Osztályozás"), Davidson Films San Francisco (1967)
7. R. Karplus, R. W. Peterson: „Intellectual Development Beyond Elementary School II. Ratio. A Survey", (Értelmi fejlődés az elemi iskola után. Áttekintés. Formális gondolkodás), School Science and Mathematics, December 1970, page 813, and „Formal Thought", Davidson Films, San Francisco (1967)
8. See reference 4, pages 362–363. (L. 4. Irodalom, 362–363. o.)
9. C. E. Silbermann: Crisis in the Classroom (Válság az osztályteremben) Random House, New York, (1970)
10. The „Science Curriculum Improvement Study" curriculum materials are published by Rand McNally and Company, Chicago (Az SCIS anyagának kiadója Rand McNally and Company, Chicago)
11. J. W. McKinnon, J. W. Renner: Am. J. Phys. 39, 1047 (1971), and J. Langer: University of California, Berkeley, private communication (magánközlés)
12. PSNS Project Staff: An Approach to Physical Science (Út a fizikához), Wiley, New York (1969)
13. IPS Group: College Introductory Physical Science, (Egyetemi bevezető fizika), Prentice Hall, New York (1969)
14. R. Karplus: Introductory Physics, A Model Approach (Bevezető fizika modellalkotás útján), Benjamin, New York (1969)
15. F. Brunschwig: „Waves and Sound—an Experiment that Walks" (Hullám és hang — egy kísérlet), AAPT Announcer vol. 1, no. 2, December 1971, page 26.
16. U. Haber—Shaim: Am. J. Phys. 39, 721 (1971)

A MÁSODIK FŐTÉTEL

J. M. Ogborn
Nuffield, London

A probléma

Egy-kettőre világossá vált számunkra, miután a Nuffield Advanced Physics programjának munkálatait elkezdtük, hogy sok területe van a fizikának, ahol az egyszerű, az igazságot mégis tartalmazó ötletek nagy segítséget jelentenének. Az egyik ilyen terület a kvantummechanika [1]; nagy öröm volt látnunk, hogyan karolták fel és milyen mértékben tökéletesítették Magyarországon első elképzeléseinket a Marx György professzorral dolgozók. A másik érdemes terület a termodinamika volna [2]. Nem telt sok idő, hogy ráébredjünk: itt nem lesz könnyű valamiféle értelmes dologra kilyukadnunk. Hamar kiderült ugyanis, hogy a tárgykört épp oly jól megértettük, mint bárki más, vagyis alig értettünk belőle valamit! Persze tudtuk, hogy a ΔS entrópiaváltozás egyenlő Q/T-vel, de hogy mi az entrópia? Mondjuk, valami köze van a rendezetlenséghez; azonban az a magyarázat, hogy köze van a rendezetlenséghez, vagy divatos szóhasználat csupán, vagy rögtön követhetetlen statisztikai számításokba torkollik. Más iskolák nemcsak hogy nem mondták meg, mi az entrópia, de megdicsőültek a ténytől, hogy rámutathattak arra a módra, ahogyan a termodinamika a világról való tudomásvétel nélkül is funkcionál. Mint sokan mások — kivéve azokat, akik már tanították a tárgyat — mi is úgy találtuk, hogy némi rossz érzést és szorongást leszámítva, meglehetősen kevés maradt meg bennünk a tanultakból. Még az egyetemi kollegák is hajlottak rá, hogy átpasszoljanak bennünket valaki másnak, ha ez a téma felmerült.

Néhány naív kérdés feltevésével jól szemléltethetjük a nehézségeket. Itt van például egy pohár víz, mekkora az entrópiája? Csakugyan értelmes ez a kérdés? Vegyük úgy, hogy — néhány elővigyázatossági megjegyzés után — értelmes kérdés, mekkora hát akkor — akár a legdurvább becsléssel — (zérusnak véve az abszolut zérus fokon) — mekkora az entrópia? Az az igazság, hogy kevés fizikus találkozott bármiféle test entrópiájának vagy entrópiaváltozásának számszerű értékével; számukra sok fejtörést okozna megsaccolni, hogy egy pohár víz entrópiája körülbelül 500 Joule per Kelvin. Más kérdés: itt van egy másik pohár víz is; kétszerese-e a két pohár entrópiája az első entrópiájának (ahogy a térfogatuk), vagy ugyanannyi (ahogy a hőmérséklet ugyanaz)? Végül is kispekulálhatjuk, hogy az első a helyes, de a válasz nem azonnali, sem nem intuitív: a mennyiségeknek ezen legalapvetőbb tulajdonsága az entrópiával kapcsolatban, lám, nincs a kisujjunkban.

Makroszkopikus vagy mikroszkopikus?

Van két társaság, akik a többieknél kevésbé tűnnek boldogtalannak a termodinamika miatt. Az egyik a vegyészeké — ők az entalpiákat, entrópiákat táblázatokból nézik ki maguknak, összeadják, kivonják őket egymásból, egyeseket néha elosztanak T-vel és értelmes válaszokat kapnak, mint például, hogy mekkora az ionizált vízmolekulák várható száma a tiszta vízben. Hasonlítanak a gépkocsivezetőre, aki nem ismeri ugyan a szerkezet működését, de azért egyik helyről a másikra tud hajtani vele.

A másik csoport egészen más. Ezek statisztikus szempontból nézik a termodinamikát és legalább van némi fogalmuk arról, mit is jelent; s hogy miért is működik. És itt számos fontos kérdés vetődik fel. A legtöbbünk makroszkopikus bevezetéssel tanulta a termodinamikát, valószínűleg erőgépekkel és körfolyamatokkal. Ebből látszott, hogy $\Delta S = Q/T$ Zo, S növekszik, és ez nagyon fontos volt. A kérdezgetéssel, hogy valójában mi is az, nem jutottunk túl messzire. A válasz gyakran szólhatott úgy, hogy az már más — később következő — tárgy anyaga lesz, mely tárgyat úgy hívnak, hogy statisztikus mechanika. Logikai szempontból, vagy az elegancia és gazdaságosság szempontjából, a magyarázatszegény makroszkopikus változat, majd az azt követő összetettebb statisztikus magyarázat kézenfekvő tanítási sorrendnek tűnik. De emberi szempontból fennakadhatunk azon, hogy milyen nehéz is megtanulni dolgokat, amiket nem értünk és nem törődünk azokkal, akik azzal büszkélkednek, hogy mondandójukat nem megértésre szánták.

Nos, a Nuffield Tervezet keretében mi azt mondtuk: a termodinamikával való első ismerkedés céljából valami statisztikus megközelítés után kellene néznünk, abban a reményben, hogy az majd a későbbi makroszkopikus megközelítés elegáns tömörségét elfogadhatóbbá s érthetőbbé teszi. A diákok így a komoly termodinamika tanulását úgy kezdhetnék, hogy már van némi fogalmuk róla, mire is megy ki a játék. De ez a fajta bevezetés nem kevés dolog elmondását kívánja. Ha az ember még más tárgyat is szeretne említeni, olyat, mely sokaknak nehéz és amit könnyen félreértenek, a statisztika ötlik fel csakhamar. Tudtuk, hogy még kemény munka vár ránk a téren, hogy a statisztikai érveléseket tisztábbakká és könnyebben érthetőkké tegyük. Ugyanakkor emlékezve arra is, hogy a kémikusok milyen jól elboldogulnak, érdemesnek látszott tanulni tőlük, legalábbis azt, hogy jó, ha a tanulók látnak néhány számszerű entrópiát, és látják, mit lehet kezdeni vele. A sok hasznos átnézett könyv között egy igazán elbűvölő, ugyanakkor gyakorlatias könyvet is találtunk[3]. Henry Bent „A Második Törvény"-e az entrópia egyszerű numerikus felhasználására jó pár példát tartalmaz, s ezek ugyanolyan okosak, amilyen szellemesek.

Az elindulás

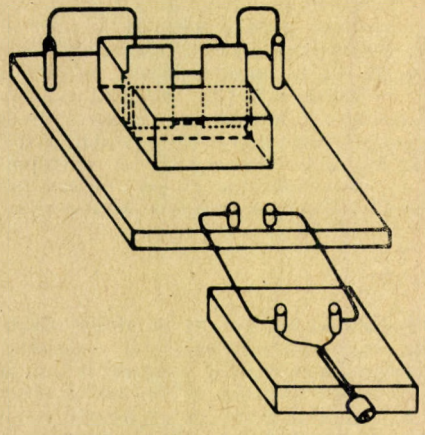
Más tárgyaknál könnyű az elindulás. Csak kiskocsik és golyók, vagy máshol elemek és mágnesek kellenek. A termodinamika nehezebb — miről is van benne szó? A fizikusok ideális gázokra gondolnak, a mérnökök erőgépekre, a vegyészek talán elektrokémiai cellákra. Mivel mindenre alkalmazható, a diákok számára korlátozottabbnak tűnhet, mint amilyen, vagy éppen annyira általánosnak, mintha már valójában nem vonatkozna semmire. Egy módja az elindulásnak, hogy megkérdezzük: a dolgok vajon miért történnek úgy, ahogyan történnek és nem ellenkező irányban; miért van az, hogy a fagylalt általában elolvad, a fa elkorhad, az acél többnyire megrozsdásodik, és így tovább. Egy módon megtehetjük, hogy visszafelé menjen a világ, ha az eseményeket filmre vesszük, és a filmet fordított irányban játszuk le[4]. A hamvaiból „visszaégő" papír eléggé különös látvány, bár nehéz többet mondani annál, mint hogy ilyen dolgok nem történnek. Tinta vagy festék „szétkeveredése" a tiszta víztől szintúgy szokatlan, és a tanulók vethetnek fel néhány arra vonatkozó ötletet, hogy miért nem történik ilyesmi. Még az üvegben rázogatott különböző színű cukorkák „szétkeveredése" tárgyában valamivel könnyebb ítélkezni; mivel több összekevert elrendezés létezik, mint amennyi szétválasztott, nagy szerencse kell hozzá, hogy rázogatással szétválasszuk a golyókat. Ha a két különböző színű cukorkából csak négy darab van, és ezekről készítünk filmet, egy további dologra figyelhetünk fel. Most lehetetlen megmondani, hogy melyik irányban megy a film, mivel túl kevés objektum szerepel és minden egyformán valószínűnek látszik. Visszatérve oda, hogy mit nehéz magyarázni, ami pedig nyilvánvaló a gyakorlatból: belekerül némi időbe, mire a néző meg tudja mondani, hogy egy csaknem súrlódásmentesen mozgó járműről készült film előre megy vagy hátra; de előbb vagy utóbb rájön azért. Ilyen és hasonló tapasztalatok sugallják, hogy vannak események, melyek — legalább-

Elhangzott a II. Dunai Szemináriumon, Visegrád, 1975 május. Fordította Bődy Zoltán, KLTE, Debrecen.

is közelítőleg — inkább „két-irányúak", mintsem szigorúan „egy-irányúak"; íme a reverzibilitás egy lehetséges bevezetése.

Egy másik kezdési mód a nagy társadalmi fontossággal bíró ügyekhez kapcsolódik; ez nem éppen olyan, mint amire a „Fizika" feliratú előadásokat szánták. Mit számít az — kérdezhetjük — hogy a világ fosszilis fűtőanyagait elégetjük? Az energia megmarad, hát nem őrizhetjük meg az energiát és nem használhatjuk fel újra?

A gépekkel és körfolyamatokkal szemben táplált és fentebb kifejtett ellenérzés dacára egy valamit mégis el kell mondani a gépekről mindjárt az elején. Legjobb erre egy nem szokványos gép: egy félvezető termoelektromos szendvics (termooszlopszerű), amivel egy kis villanymotort hajtatunk, s akkor működik, ha forróvizet öntünk az egyik lappal érintkező tartályba. További forróvíz — a másik lappal érintkező edénybe is — nem javít a helyzeten; sőt, a motor megáll. A működés a hőmérséklet különbségtől függ, és világos, hogy ez az erőgép miért nem lehet jó hatásfokú: állandóan energia szivárog át rajta a melegebb helyről a hidegebbre. A gép fordítva is megy: a rajta átvezetett áram az egyik lapot melegíti, a másikat hűti. Feltéve, hogy épp csak meg akarjuk mutatni, miről is van szó e tárgyban — és nem próbálunk semmit sem bizonyítani — a szerkezetnek van némi értéke. A teljes elrendezést az 1. ábra mutatja.

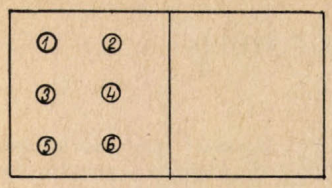


1. ábra. Termoelektromos félfezető szendvics; oldalaival meleg- ill. hidegvizes edények érintkeznek.

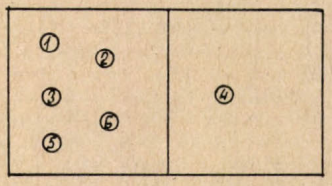
Szétszóródás és összekeveredés

Nem csoda, hogy az olyan dolgok mint a keverés és kavarás azok, amelyek magyarázatát a tanulók még a legkevésbbé tartják nehéznek, ha — például — látják az eseményeket az előre és hátra futtatott filmen, amint arról már szó esett. Persze, ami bennünket igazán érdekel, az nem az objektumoknak, hanem az energiának az „összekavarodása". Mindenesetre valami diffúziószerű folyamat szűkszavú tárgyalása segíthet megízleltetni a tanulókkal az elkövetkezendő dolgok stílusát olyan területen, amely viszonylag kevés egyéb bonyodalommal jár.

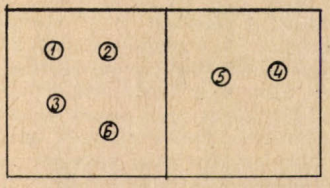
Egy lehetőség — amit mi a Nuffield-kurzuson fel is használtunk — részecskéknek nagyobb térfogatba történő diffúziója. Az érvelés akkor a legegyszerűbb, ha a részecskék megkülönböztethetők, ezért a legjobb — ilyen fokon — ha a tanulókat meghagyjuk természetes hitükben, hogy tényleg azok. Amire rá szeretnénk mutatni, az az, hogy ilyen rendszerek tulajdonságainak magyarázására sokszor — bár nem mindig — a valószínűség önmagában is elegendő. Vehetünk például egy két részre osztott dobozt, mint amilyet a 2(a) ábrán látunk. A tanulók számára alighanem a dobókocka a valószínűség megtestesítője, ezért — javaslatunk szerint — hat számozott zseton kerül a doboz egyik felébe, melyek további sorsát kockadobással döntjük el. Az a



2/a ábra. Két féltérre osztott doboz, hat számozott zsetonnal az egyik féltérben.



2/b ábra. Az első dobás szükségszerű eredménye. Csak azt nem tudjuk előre, hogy melyik zseton megy át a másik oldalra.



2/c ábra. Egy lehetséges állás két dobás után.

zseton, amelyiknek a számát dobjuk, átkerül a doboz másik felébe. Ez egészen önkényes játék tetszésünk szerint rögzített szabállyal. Azt tanácsoljuk, hagyjuk a diákokat, hogy maguk játsszák. Mi a biztos és mi a bizonytalan az első dobásnál? Biztos, hogy egy zseton átkerül a másik féltérbe, de bizonytalan, hogy melyik. Mi történhet másodjára? Megeshet, hogy a második féltér újból üres lesz, mint előbb, de sokkal nagyobb az esélye annak, hogy még egy zseton kerül át az előbb áttett mellé. Néhány dobás után a tanulók hamar felismerik, hogy a zsetonok nagyobbrészt elég egyenletesen oszlanak meg a két féldoboz között, bár időről-időre kerülhetnek mindannyian is az egyik féltérbe. Egy 20—30 fős osztályban, ahol párokban folytatják a kísérletet, valójában egész hamar akad olyan pár, ahol ez bekövetkezik, bár előre nem tudható, melyik pár lesz ez.

Érdemes egy kicsit számolgatni, hogy hozzászokjunk ahhoz a számolásmódhoz, amit majd később is alkalmazunk. Mindegyik zseton két helyre kerülhet, és az, hogy az egyik zseton hol van, nem befolyásolja azt, hogy hova kerülhetnek a többiek. Nos, hat zseton $2\times 2\times 2\times 2\times 2\times 2 = 2^6 = 64$-féleképpen osztható szét a két rekeszbe. De csak egyféleképpen fordulhat elő, hogy mindegyik (mondjuk) a bal féltérben legyen. Így, ha semmi irányítottság sincs a rakosgatásban, ez a helyzet 64 közül egyszer következik be. Az eset ritkasága — és a tanár meggyőződése, hogy ennek ellenére előbb vagy utóbb mégis bekövetkezik — ezzel magyarázatot nyer.

Ha a részecskék száma N, a lehetőségeké 2^N. Ha megtanulunk nagy számokban gondolkodni, ez hasznos lehet annak elhitetésében, hogy az érvelés egy palackban levő levegőmolekulákra is alkalmazható. Ha 10^{22} van belőlük, az, hogy valamennyi (mondjuk) az alsó féltérben legyen, egyszer fordul elő $2^{10^{22}}$ esetből. Mi ez a furcsa kinézetű szám? Tegyük fel, hogy a logartimusát vesszük — ilyen lépés gyakran előfordul e tárgyban: $\lg 2^{10^{22}} = 10^{22} \lg 2 \approx 3.10^{21}$. A $2^{10^{22}}$ úgy írható le, mint egy 1-es, amit 3.10^{21} nulla követ; és ha mindegyik nulla 1 mm széles, akkor a szám hossza 300 fényév.

Az effajta érvelés nyomán a tanulók hozzászoknak némileg az ilyen problémák néhány lényeges vonásá-

hoz: hogy a lehetőségek száma szorzódik inkább, semmint összeadódik; hogy a valószínűség önmagában a dolgok eloszlását jósolja meg, de nem a dolgok részletes alakulását; hogy bizonyos eloszlások ritkábbak, mint mások; és hogy ha a részecskék száma nagy, bizonyos események olyan ritkák, hogy soha sem fordulnak elő, és ha ezeket választjuk kezdőpontként, ez a kezdőpont — pusztán csak a valószínűségek révén, de — holtbiztos, hogy sohase tér vissza. Hasonló érvelés található a PSSC* [5, 6] anyagában is; a Nuffield kurzus számára minden ilyen forrásból örömmel merítünk ötleteket.

Kitérő gumi ügyben

A gumi különös anyag és némi magyarázat nem látszik haszontalannak ezzel kapcsolatban, noha a Nuffield-kurzuson erre nem tudtunk helyet szorítani. A gumimolekulák lánccá kapcsolódott izoprén egységekből állnak, és eléggé hajlíthatók a kapcsolódásoknál. Ez azt jelenti, hogy a lánc összegyűrhető, vagy kiegyenesíthető; ha a gumit kihúzzuk, a láncok kiegyenesednek. Ez a bolyongási problémához hasonlít, ami elméletileg tárgyalható [7], vagy más szimulációs játszma [8] segítségével oldható meg. Ha egy N tagból álló láncot véletlenszerűen odavetünk (úgy, hogy mindegyik láncszem bármilyen irányú lehet az előzőhöz képest), a lánc egyik végétől a másikig mért legvalószínűbb hossza $\sqrt{N}$. Azaz, a teljesen kifeszített lánc $\sqrt{N}$-szer hosszabb a véletlenszerűnél. Egy darabig könnyű nyújtani a gumiszalagot, de ha már az eredetinek 4—10-szeresére húztuk, olyan lesz, mint az acél, és nehéz tovább nyújtani. Tegyük fel, hogy a lánc ekkor többé-kevésbé egyenes, így a két hosszúság arányát $\sqrt{N}$-el azonosíthatjuk, és megbecsülhetjük egy átlagos poliizoprén láncban (azaz a szomszédos láncokhoz való keresztkötési pontok közti szabad láncban) levő izoprén egységek N számát.

Egyéb dolgok is csinálhatók még gumival; az elmélet igen hasonlít a normális eloszlás [9] elméletéhez, de ebbe most nem akarunk belemenni.

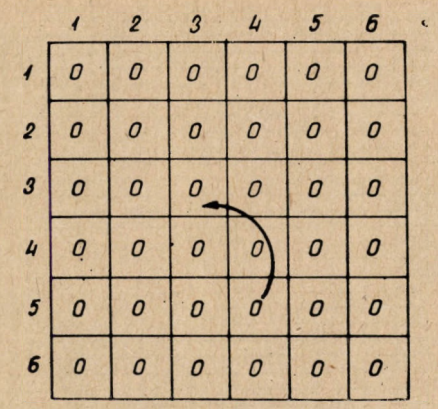
Osztozkodás az energián

A statisztikus termodinamika központi kérdése, hogy hogyan oszlik el az energia, és ez az, amihez a legnehezebb hozzáférkőzni a tanításban. A Nuffield-kurzus számára egy szimulációs játékot ötlöttünk ki — olyat, mint amit a dobozban levő zsetonokkal játszottunk — a nehezen követhető algebrai magyarázatok helyett. A probléma fogalmilag is épp elég nehéz, ne nehezítsük tovább technikai részletkérdésekkel.

Mielőtt megbeszélnénk a játszmát fontoljunk meg egy elvi kérdést. Mint láttuk, a makroszkopikus termodinamika dicsősége, hogy az embernek nem kell tudnia. miről is beszél, de ez — a tanulók szempontjából — a tárgy buktatója is lehet. A statisztikai okoskodások ezzel pontosan ellentétes jellegűek: el kell dönteni, mi az, amiről beszélünk, és az érvelés úgy fest, mintha egyedül csak *erre* a rendszerre vonatkozna, pedig ez nagyrészt nem így van. Ezért olyan rendszerre lesz szükségünk, ami a lehető legkevesebb speciális tulajdonsággal rendelkezik, hogy az állítások minél nagyobb részben és minél több másféle rendszerre is igazak maradjanak.

Ezek a gondolatok vezettek bennünket az Einstein-féle szilárdtest-modellhez; egy sor lazán csatolt harmonikusoszcillátor atomhoz. Mivel az ilyen oszcilátorok energiaszintjei, akár a létra fokai, egyenlő közökkel sorakoznak egymás után, minden nagyon egyszerűvé válik, és az energiaeloszlás csak a termodinamikai vonatkozásokat tükrözi — azaz a Boltzmann faktort — nem pedig a rendszerek specifikumait, mint például az állapotsűrűséget. Arra is rájöttünk, hogy a kvantált rend-

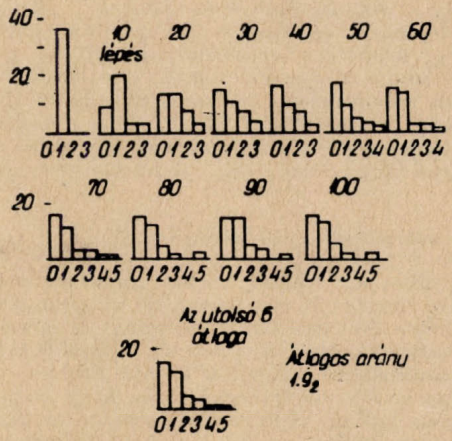
*PSSC = Physical Science Study Committee (ford. megj.)



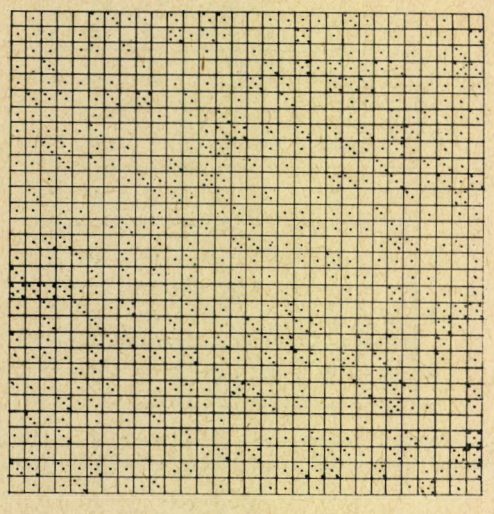
3. ábra. Hatszor hatos rács 36 zsetonnal, melyeket az egyik négyzetből a másikba rakosgathatunk.

szereknek megvan az az előnyük a klasszikusakkal szemben, hogy az energiakvantumok leszámlálhatók és semmi szükség a tetszőleges térfogatú absztrakt fázistérrel való bűvészkedésre.

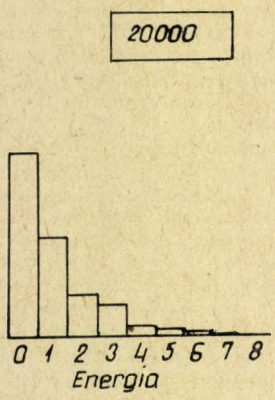
Milyen véletlen szimulációs játék modellezhetné a legegyszerűbb az Einstein-féle szilárdtestet? Mivel a szükséges szabályok egyszerűnek bizonyulnak, a tanulóknak úgy tálalhatjuk őket, mint ésszerű, bár tetszés szerinti döntésünk eredményét, anélkül, hogy elméletet próbálnánk mellékelni hozzá [10]. A 3. ábrán látható az általunk kidolgozott modell. A szilárdtestet rekeszek képviselik, mindegyikük egy-egy oszcillátor. Tekintve, hogy az oszcillátor energiaszintjei azonosközűek, az egymásutáni energiaállapotok zsetonok halmozásával reprezentálhatók; mindegyik, a rekeszben levő zseton egy energia-kvantumnak számít. Az alapállapotot üres rekesz jelenti (nem hisszük, hogy megérné fél-fél zsetont odaenyvezni mindenik rekeszbe!), az egyik állapotból a másikba való átmenetnek pedig egy zseton elvétele vagy hozzáadása felel meg. A szabály egyszerű. Dobjunk két kockával, ezzel választunk ki találomra egy rekeszt. Ha van benne egy vagy több zseton, egyet elveszünk; ha nincs, ismét dobunk. Ezután a másodszori dobással sorsoljuk ki azt a rekeszt, ahová az imént elvett zsetont helyezzük. A 3. ábrán a (4;5)-ös rekesz jött ki elsőre, és a (3;3)-as másodjára, tehát az előbbiből egy kvantum kerül át az utóbbiba. A 4. ábra mutatja a sokszori sorsolás után kialakult helyzetet, amikor is olyan önkényes kezdőhelyzetből indultunk, hogy minden oszcillátor (rekesz) egy kvantummal (zsetonnal) rendelkezett. Nagy fluktuációkkal ugyan, de látszik, hogy a rendszerben kezd beállni egy egyensúly féle hely-



4. ábra. A kvantumkeverő játék első száz lépésének hatása a kvantumok eloszlására. 36 kvantummal kezdtünk, minden oszcillátornak egy kvantuma volt.



5. ábra. 900 kvantum, eredetileg a 900 oszcillátor mindegyikének egyetlen kvantuma volt.



6. ábra. A kvantumkeverő játék húszezer lépésének eredménye.

zet, ahol is sok oszcillátornak egyáltalán nincs energiája, kevesebbnek van egy kvantumnyi, még kevesebbnek két kvantumnyi, és így tovább. Rá lehet fogni, hogy ezen egymást követő számok hányadosa állandó; hogy az eloszlás exponenciális.

Annak észrevételéhez, hogy az eloszlás tényleg exponenciális, akkora rendszerre lenne szükség, hogy azt a tanulók már maguk nem győznék kockadobással; ezért egy — 900 oszcillátort tartalmazó — rács számológéppel lejátszott játszmáját vettük filmre [11]. Az 5. ábrán egy lehetséges kezdőhelyzetet, a 6.-on egy 20 000 sorsolás utáni eredményt látunk. Az eloszlás nagyon pontosan exponenciális, a szomszédos kvantumszámok gyakorisági aránya 2-höz közeli szám. A film azt is megmutatja, amire az algebra nem képes: az egyensúlyi helyzet körüli fluktuációk szemünk előtt zajlanak le.

A hő a melegebbről a hidegebbre megy

A 7. ábra egy másik kockát mutat a számológép készítette filmről; itt mindössze 300 kvantumot osztunk ki az előbbi 900 oszcillátor-rekeszbe. Az eloszlás most is exponenciális, csak meredekebb, nagyobb a szomszédos kvantumszámú állapotok aránya (kb. 4).

A film azután azt is megmutatja, hogy ha a 6-os és 7-es ábrán látható rendszert egyesítjük, az energia — holtbiztosan, noha egyedül a valószínűségek révén — az elsőből a második felé áramlik mindaddig, míg mindkét eloszlás egyformán meredekké nem válik. Mivel pedig azon, hogy „melegebb" és „hidegebb", épp azt értjük, hogy a hő a melegebbről magától a hidegebbre megy, az első melegebb, mint a második; a kvantumok újból elosztódnak, mígnem mindkét rendszer egyenlő meleggé válik. Más szavakkal, a hőmérsékletnek az eloszlás meredekségéhez van köze: minél meredekebb, annál alacsonyabb a hőmérséklet.

Egy kis bepillantás a statisztikába

A nuffieldi eszmék kimunkálása idején az volt a vezérfonalunk, hogy amit tanítunk, az — amennyire csak lehetséges — jellegében statisztikus legyen, ám ugyanakkor a lehető legkevesebb matematikát használjuk. A következőkben egy javaslatot teszünk, hogyan lehetne ezt megvalósítani, de nem mondjuk persze, hogy azok a tanulók, akik a részletesebb magyarázatnak jobban örülnének, ne kaphassák meg azt.

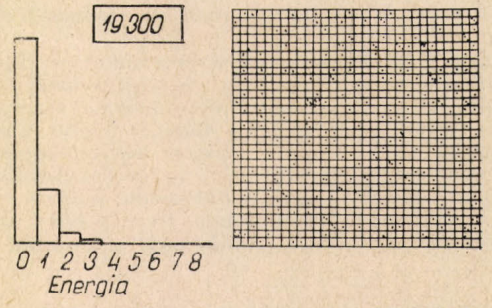
Ha egy dzsókerrel toldunk meg egy pakli kártyát, megnövekszik a keverési lehetőségek száma: több objektum többféle módon rendezhető el. Kevés tárgy esetén könnyű egyszerűen igazolni ezt leszámlálással. Ugyanez az elv alkalmazható a keveréses modellnél. Ha még egy kvantumot hozzáadunk, a kvantumok szétosztási lehetőségeinek a száma megnövekszik. Nem meglepő, hogy a lehetőségek száma *szorzódik* egy bizonyos faktorral ezen eljárás folyamányaképp (nem pedig hozzáadódik valami). Korábban is hangsúlyoztuk, hogy a lehetőségek száma *szorzódik*.

Képzeljük el tehát, hogy oszcillátorunk kvantumot ad át a többinek, amelyek ekkor eggyel több kvantumon osztozkodhatnak, és ez — mondjuk — r különböző módon fordulhat elő. Ha pedig egy kvantumot vesz fel, a többi egyet veszít, és ez most r-szer kevesebb osztozkodási lehetőségenek felel meg. Tehát, ha egy oszcillátor a többivel kölcsönhatásba kerül, mindig r-szer olyan szívesen veszít kvantumot, mint kap. Ez segít belátatni, hogy minden oszcillátor r-szer gyakrabban rendelkezik 0 kvantummal, mint 1-el, r-szer gyakrabban 1-el, mint 2-vel, és így tovább. Az egész rendszert tekintve tehát látszik, hogy egy adott pillanatban miért van r-szer annyi 0 kvantumos oszcillátor, mint 1 kvantumos, r-szer annyi 1-es, mint 2-es, és így tovább; hogy az eloszlás mértani sor, vagyis exponenciális.

Statisztika és hőmérséklet

A 6-os ábrán látható rendszerre az arány 2 (ez nyilvánvaló a filmen, vagy algebrai úton is belátható — lásd a függeléket); a 7.-re pedig 4. Egy, a második rendszerbe érkező kvantum az osztozkodási lehetőségeket egy 4-es szorzóval növeli, míg az elsőt elhagyó csak egy 2-es osztóval csökkenti. Az eredő hatás az osztozkodási lehetőségek növekedése a rendszerben mint egészben; ez a magyarázata, hogy a kvantumok többször mennek az elsőből a másodikba, mint fordítva.

Most össze kell hoznunk r-et a hőmérséklettel. Egyetlen energiakvantum hozzáadása a lehetőségek W számát egy r-faktorral szorozza; újabb hozzáadása ismét r-rel való szorzást jelent. Vagyis minden hozzáadott kvantum nyomán $\ln r$ adódik $\ln W$-hez (mindaddig,



7. ábra. 900 oszcillátor között megoszló 300 kvantum egyensúlyi állapotban.

amíg r kb. ugyanaz marad). Ésszerűnek tűnik tehát a javaslat, hogy a T hőmérséklet jelentését egy

$$T \sim \varepsilon/\ln r$$

azaz

$$kT = \varepsilon/\ln r$$

alakú egyenlettel rögzítsük, ahol a k skála-faktor — az ún. Boltzmann állandó — hozza az eképpen definiált hőmérsékletet a Kelvin skálára; amiben a szobahőmérséklet 300 K, inkább, mint hogy 10^{-21} legyen, ami egységnyi k-nál adódna.

A Boltzmann-faktor

T definiáló egyenletét kétféleképpen nézhetjük. Az egyik a Boltzmann-faktort adja, a másik az entrópiához vezet.

Az elsőhöz emlékeztetünk arra, hogy r nem más, mint az n_1/n_2 hányados, ahol n_1 egy adott energiához tartozó oszcillátorok száma, az (kisebbik) n_2 pedig azok száma, melyek az előbbi plusz ε energiához tartoznak. Feltéve, hogy sok rendszerre lényegében ugyanez áll fenn, foglalkozhatunk az

$$\ln (N_1/N_2) = E/kT$$

egyenlet jelentőségével, ahol N_1 és N_2 most az E energiakülönbséghez tartozó részecskeszámok. Példának okáért, számos vegyi reakció, nem utolsó sorban az emberi testben zajlók, elég lassú, mivel az adott hőmérsékleten meglehetősen kevés molekulának van a reakcióhoz szükséges E többletenergiája (aktivációs energiája). Nagy sokára aztán — hogy úgy mondjuk — a valószínűség gondoskodik a molekulák szükséges energiájáról.

Az effektus nagyon jelentős. Tegyük fel, hogy E negyvenszerese kT-nek (még így is csak 1 eV). Ekkor $\ln N_1/N_2$ egyenlő 40-ből N_1/N_2 értékére $2{,}3 \cdot 10^{17}$ adódik (a zsebszámológép most hasznos lehet!). 10^{17}-ből kevesebb, mint egy molekulának van a reakcióhoz elegendő energiája! Most, tegyük fel, hogy a hőmérséklet kicsit feljebb megy. Egy 300 K-ről 324 K-re való (kisebb, mint 10%-os) emelkedés $\ln N_1/N_2$ értékét 40-ről 37-re hozza le. Ez N_1/N_2-nek $1{,}2 \cdot 10^{16}$-ra való csökkenését eredményezi, azaz több, mint egy tízes szorzóval változtatja meg azt. Az a helyzet tehát, hogy a hőmérséklet kis megváltozása a reakciósebességet igen megnövelheti, ahogyan azt megfigyelhetjük a kuktafazekaknál, a testben — különösen láz esetén — lezajló reakcióknál; vagy hogy más, kevésbé kémiai példát is vegyünk, a párolgási sebességnél, egyes félvezetők elektromos vezetőképességénél, a szilárdtestekben levő hibahelyek számánál és számtalan egyéb esetben is. Néhány laboratóriumban bemutatható kémiai példa szép és érdekfeszítő [12, 13]. Sokféle, fizikai és kémiai, kísérlet mutatható be az osztályban is, melyek lineáris összefüggést adnak a reakciósebesség logaritmusa vagy annak megfelelője, és a hőmérséklet reciproka között.

Az olvasó nyilvánvalóan tudja, hogy az

$$\ln (N_1/N_2) = E/kT$$

egyenlet a sokkal ismerősebb

$$N_2/N_1 = \exp(-E/kT)$$

alakba is írható. Mindazonáltal, az előbbi okoskodás — különösen, ha számtani példákra hagyatkozunk — nem jelent többet, mint a logaritmus használatát az antilogaritmus helyett.

A k Boltzmann-állandó

Mekkora a k Boltzmann-állandó értéke? Ami ehhez kell, az egy olyan rendszer, ahol adott T hőmérsékleten az E energia ismeretében az N_1/N_2 hányadost leszámlálással megállapíthatjuk. Számos rendszer megtenné ezt a szolgálatot, beleértve paramágneses só mágnesezettségét, ahol is a nettó mágnesezettség mérésével lehet a külső térrel parallel és antiparallel álló mágneses momentumok arányát mérni. Hagyományos módon használhatunk gázokat, vagy az Einstein-féle szilárdtestet is, ha úgy tetszik. Az utóbbihoz szükségünk lesz egy statisztikai eredményre, nevezetesen arra, hogy az r hányados értéke $1 + N/q$, ha q kvantum osztódik szét N oszcillátor között (ld. a függeléket, vagy vegyük úgy az értéket, ahogyan az a számológépes filmről adódik). Ekkor

$$kT = \varepsilon/\ln (1 + N/q)$$

vagy

$$kT \approx q\,\varepsilon/N,$$

ha q elég nagy, tekintve, hogy kis x-re $\ln (1 + x) \approx x$. De $q\varepsilon$ éppen az U belső energia és N egyenlő $3L$-el, ha egy mól anyagról van szó, ahol L az Avogadro-szám. Így

$$3LkT \approx U,$$

ami azt jelenti, hogy egy elég meleg fém fajhője $3Lk$. Ez Dulong és Petit szerint 25 $J \cdot K^{-1}\,mol^{-1}$ körüli érték, melyből $k = 1{,}4 \cdot 10^{-23}\ JK^{-1}$.

Az ember és a víz

A tanulók megmérhetik a víz elpárologtatásához szükséges energiát, ez kb. 40 $kJ \cdot mol^{-1}$ vagy $\approx 6{,}6 \cdot 10^{-20}$ J molekulánként. Megmérhetik azt is, hogyan változik a víz gőznyomása a hőmérséklettel és megállapíthatják, hogy az $\ln p = f(1/kT)$ függvény meredeksége éppen ekörüli érték. Mindez után néhány egészen általános tanulság adódik.

A víz meglehetősen lassan párolog — következésképp, kell egy nap, hogy a tócsák eltűnjenek, és az óceánok is elég lassan párolognak ahhoz, hogy csak néha essen az eső. A magyarázat az, hogy a földfelszín hőmérséklete kb. 300 K, így kT értéke kb. $4 \cdot 10^{-21}$ J molekulánként és $E/kT \approx 16$. Vagyis ezen többletenergia nélkül ill. azzal vett molekulaszámok arányának logaritmusa kb. 16, ami azt jelenti, hogy csak 1-nek van meg 10^7 számúból ez az energiája.

Most tegyük fel, hogy az a feladatunk, hogy egy emberi lényt tervezzünk. Hogyan fogjuk azt összetartani? Ahogyan a tengerpárolgásnál is, a dolgoknak ésszerű időskálán kell mozogniuk. Kovalens kötések lehetséges energiája 10^3 $kJ \cdot mol^{-1}$ — vagy $2 \cdot 10^{-18}$ J részecskénkint — ezért E/kT igen nagy, úgy 400 körüli. Ez azt jelenti, hogy egy részecske fog mintegy 10^{170}-ből a kötés felszakításához elegendően nagy energiával rendelkezni; emiatt maradnak meg ezer millió évekig a sziklák, ám ezzel tunya, tohonya, tétlen és tehetetlen emberi lényt teremtenénk, noha kétségtelenül hosszú életű lenne. Gyengébb kötésre van szükségünk, de nem olyan gyengére, hogy az emberi élet csak villanásnyi legyen, amint hogy az volna, ha a reakciók túl gyorsan zajlanának. A hidrogénkötés, melyből a folyékony víz minden molekulájában kettő található és amelynek kb. $20kJ \cdot mol^{-1}$ ($3 \cdot 10^{-20}$ J kötésenkénti) energiája van, éppen megfelelő lesz. E/kT értéke 8 körül van és így 4000-ből 1 szakad fel másodpercenként a hőmozgás következtében. Ezért nem meglepő, hogy az emberi lényt — nagyobbrészt — a hidrogénkötések tartják össze.

Persze vannak komplikációk. Más módszer a lassításra, ha bonyolult, összetett reakciókat választunk — három, kívánt fajtájú részecske sokkal ritkábban találkozik össze, mint kettő. De a Boltzmann-faktor azért az egyik igen fontos eleme a dolognak.

Az entrópia és a lehetőségek változása

$$A\ kT = \varepsilon/\ln r$$

egyenlet másképpen is szemlélhető. Amikor r állandó voltát próbáltuk megérteni, azt javallottuk, hogy r-et tekintsük olyan faktornak, amellyel W megnövekszik, valahányszor egy kvantum adódik hozzá a rendszerhez.

Azaz: $\ln r = \Delta \ln W,$

W logaritmusának a megváltozása.

Így $k\Delta \ln W = \varepsilon/T$,

vagy sok hozzáadott kvantumra, mely Q hőfolyamnak felel meg, $k\Delta \ln W = Q/T$.

A Q/T mennyiség a lehetőségek számszerű megváltozásának mutatója. Magáról a rendszerről semmit sem kell tudnunk, kivéve Q és T mért értékét. Ez annyira hasznos dolog, hogy külön nevet is kapott: az entrópia (S) változása. Értéke éppen a számszerű lehetőségek logaritmusának megváltozása szorozva a k skálafaktorral. Ezen a módon az entrópiát úgy vezettük be, hogy még jelentése is van. Ugyanakkor lehet látni, mi módon kerülhetjük el a statisztika nagy részét gyakorlati alkalmazásoknál.

Használjuk az entrópia számszerű értékeit

Már egyszer megjegyeztük, hogy a kémikusok milyen magabiztosan használják az entrópiát, számszerű értékeket tulajdonítva neki. Néhány ilyen példa bizonnyal nem válik a tanulók hátrányára.

298 K hőmérsékleten egy mól víz entrópiája 70 JK^{-1}; 302 K-nél 71 JK^{-1}-re növekszik. A növekedés abból az energiából ered, ami a víz felmelegítéséhez kell, ez kb. 300 J (tekintve, hogy 1 kg-hoz 4180 J szükséges, és egy mól csak 18 g). Az entrópiaváltozás $\Delta S = Q/T = 300/300 = 1$ JK^{-1}. De hogyan nőtt a lehetőségek száma? $k \cdot \Delta \ln W = 1$, így $\Delta \ln W$ majdnem 10^{23}. Azaz, W olyan hatalmas számmal szorzódott, melynek a logaritmusa is 10^{23}; ez még a korábban emlegetett 2.10^{22}-nél is elképesztőbb szám! Nem viccelünk? Nem: az ilyen megdöbbentő nagyságú számok teszik, hogy a hő biztosan, bár csak a valószínűségek révén, a melegebbről áramlik a hidegebb felé.

Másik példa, mely összefügg az előbbi okoskodásokkal. Ha 1 mól neon atmoszférikus nyomásról indulva kétszeres térfogatra terjed ki 298 K hőmérsékleten, entrópiája 146-ról 152 $J \cdot K^{-1}$-re nő. Ez alkalommal $\Delta \ln W$-t máshogyan is megkaphatjuk; minthogy a részecskék kétszeres térfogatba szóródnak szét W — ha N részecskéről van szó — 2^N-el szorzandó. Eképpen

$$\Delta S = k\,\Delta \ln W = k \ln 2^N = Nk \ln 2.$$

Ha k és N (egy mólra vonatkozó) értékét beírjuk, ez 6 JK^{-1}-hez közeli entrópiaváltozást ad, mely éppen a fenti értékek különbségével azonos.

Megkérdezhetjük a diákokat, hogy miféle-fajta szilárdtestek entrópiája lehet vajon nagy és melyeké kicsi? A kis entrópia kevés szétosztandó kvantummal, s ezért meglehetősen nagy kvantumenergiával jár együtt. $\varepsilon = h \cdot f$-et írván — ahol h a Planck-állandó — kis entrópia nagy oszcillátorfrekvenciával, azaz könnyű és meglehetős erősen kötött atomokkal járhat. Nagy entrópiát kis f-nél, vagyis nehéz és egészen lazán kötött atomoknál várhatunk. Kézenfekvő példa ezekre a gyémánt és az ólom; az értékek megfelelnek várakozásunknak:

elem	mól entrópiája JK^{-1}
gyémánt	2,5
ólom	65,0

Egyensúly — hogyan és meddig?

Hogy merre halad a világ — úgy véljük, hogy ez a termodinamika központi kérdése — az entrópia-változás szabja meg. A megtanítandók zömét most is példákkal adhatjuk.

Nem nehéz „érveket" felhozni rá, hogy a víz sohasem fagyhat meg. Egy mól víz entrópiája 0 C fokon 63 $J \cdot K^{-1}$, míg egy mól jégé csak 41 JK^{-1}. Az entrópia biztosan nem csökkenhet olyan rendszerben, ahol minden a vak véletlenre van bízva. Ez a rendszer részeinek elrendezési lehetőségeit óriási mértékben spontán módon csökkentené, holott ha minden lehetőség nyitva van, W növekedni fog. A hiba nem az érvelésben van, hanem abban, hogy valaminek az entrópiaváltozásáról megfeledkeztünk közben. A hiányzó dolog: a fagyásnál felszabaduló energia — kb. 6000 $J \cdot mol^{-1}$ — a környezetnek adódik át. Tudjuk, hogyan számítsuk ki ennek W-re gyakorolt hatását: a

$$\Delta S = k\,\Delta \ln W = Q/T$$

egyenletből. 250 K szibériai hőmérsékleten az entrópianövekedés $6000/250 = 24$ $JK^{-1} \cdot mol^{-1}$. Ez nagyobb, mint az előbb említett 22 $JK^{-1} \cdot mol^{-1}$ értékű entrópiacsökkenés. Az eredő növekedés 2 $JK^{-1} \cdot mol^{-1}$, ezért a víz meg fog fagyni. 300 K-nél az entrópia csak 20 $JK^{-1} \cdot mol^{-1}$ értékkel nő, mely nem elég, hogy ellensúlyozza a csökkenést, tehát a víz most nem fagy meg. A példa naiv, de mindig ilyen jellegű az okoskodás, ha azt akarjuk eldönteni, hogy egy reakció lejátszódik-e vagy sem.

Második példánk azt mutatja, hogy egy reakció — vagy más változásnak megfelelő folyamat — meddig halad előre, milyen mértékben játszódik le. Ha egy mól víz ionokká disszociál, — a mind a víz, mind a környezet változásait figyelembe vevő — entrópia 335 $JK^{-1} \cdot mol^{-1}$-el csökken. Következtetésünk, hogy a víz nem disszociál magától, tényleg igaz. De egy nagyon kicsit azért ionizálódik, úgy hogy egy kevéssé vezető lesz.

Egyszerű számítás mutatja, hogy ennek így is kell történnie. Tegyük fel, hogy mólonként pontosan egy molekula disszociál. Ekkor két idegen részecske (két ion) található minden $L = 6 \cdot 10^{23}$ testvér részecske között (a molekulák ui. mind egyformák). Mindegyik ion felcserélhető bármelyik molekulával, így az elrendezések száma mindegyik ion miatt L-el szorzandó. Így

$$\Delta \ln W = 2 \ln L,$$

azaz egy disszociáló molekula esetén az entrópianövekedés $\Delta S = k\Delta \ln W = 2k \ln L = 15.10^{-22}$ JK^{-1}. Ez hasonlítandó össze a -335 $J\ K^{-1}\ mol^{-1}$ csökkenéssel, vagyis molekulánként $-335/L = -5{,}5.10^{-22}$ JK^{-1}-nel, amit tehát jelentősen meghalad az „idegenek és testvérek" összjátékából eredő 15.10^{-22} JK^{-1} molekulánkénti entrópianövekedés. Ezért *egy* molekula biztosan disszociálni fog. A következő disszociálása már nem okoz akkora entrópianövekedést, mint az elsőé, tekintve, hogy a keletkező ionoknak már lesznek az előzőleg keletkezettek között testvérei és az azokkal való felcserélés nem jelent különbséget. Végül is elérkezünk egy ponthoz, amikor az entrópianövekedés és csökkenés egymással megegyezik; ez adja a víz disszociációs fokát.

Tegyük fel, hogy összesen N darab molekula és ion van jelen és KN darab mindegyik ionból. Bármelyik fajtájú új ion N részecskével cserélhető fel, az W-t N-el szorozza, de ezek közül KN ugyanolyan fajtájú testvér-ion, ezért viszont KN-el osztanunk is kell. Az eredő hatás W-nek $N/KN = 1/K$-val való szorzása (ez növekedés, mivel K mindig kisebb az egynél). K ionkoncentráció — és molekulánként két ion — esetén tehát

$$\Delta S = k\Delta \ln W = 2k \ln (1/K).$$

Ha ez egyenlő a megfelelő entróp acsökkenéssel, a $-335/L = -5{,}5 \cdot 10^{-22}$ JK^{-1} molekulánkénti értékkel, az egyensúly beáll. Ez akkor történik, amikor

$$2k \ln (1/K) = 5{,}5 \cdot 10^{-22}$$

$$\ln (1/K) \approx 20$$

$$1/K \approx 5 \cdot 10^{8}$$

$$K \approx 2 \cdot 10^{-9}.$$

Azaz a víz addig disszociál, míg 10^9 részecske között egy ion nem található. Mivel nagyjából 56 mól van egy liter vízben, az ionok mólszáma 1 liter vízre kb. 56-szor $2 \cdot 10^{-9}$, azaz kb. 10^{-7}. Ezen szám kitevőjének a negatívját pH néven ismerik; tiszta vízre értéke 7.

A probléma, továbbra is

Azzal kezdtük, hogy a termodinamika nagy problémát jelentett. Senki se állíthatja, hogy az itt kifejtett eszmék könnyűek lennének, de talán merhetjük remélni, hogy a nehézségeknek legalább egy részét sikerült csökkentenünk. A Nuffield tervezet tapasztalatai szerint a legkevesebb, amit mondhatunk, hogy a tanárok továbbra is támogatják ennek a munkának a tanmenetbe való beillesztését, részben más munkáktól elütő stílusa, részben más tantárgyakkal való kapcsolatai miatt, és — a szerző gyanúja szerint — azért is, mert örömüket lelik abban, hogy legalább ők maguk megértettek az egészből valamit. A tanulók többsége kétségtelenül nehéznek tartja, talán ismételgetőnek, tekintve, hogy mindig ugyanoda lyukadunk ki: mindig az történik, ami a legtöbb módon következhet be. Ez a lényege az egésznek. Nem minden diák érez úgy, mint az, amelyik ezt írta nekünk: „Miért nincs még sok más olyan könnyű dolog, mint a termodinamika?" Ez a megjegyzés meglepett bennünket — mit is sikerült művelnünk e tárgygyal! — s ha nem is tipikus, arra talán alkalmas, hogy vele zárjam előadásomat.

A. Függelék

(a Nuffield Advanced Physics, 9. kötetének „Változás és véletlen" című fejezete nyomán engedéllyel átvéve.)

W kiszámolása Einstein-féle szilárdtestre

Az alant látható sorozat mutatja, hogy hogyan lehet felírni általánosságban q kvantum N oszcillátor közötti egy lehetséges szétosztását. A körök jelentik valamely határozott sorrendben az oszcillátorokat. Az ε-ok a kvantumokat jelképezik. Mindegyik oszcillátor energiáját az utána írt ε-ok darabszáma mutatja. Így a sorozat első oszcillátorának egy, a másodiknak három, a harmadiknak zérus kvantuma van, és így tovább. A sorozat addig folytatódik, amíg mind az N oszcillátor meg nem kapja a számára előírt energiát, úgy hogy N darab O és q darab ε jelet használunk fel összesen.

$O\varepsilon O\varepsilon\varepsilon\varepsilon OO\varepsilon\varepsilon O\varepsilon OO\varepsilon\varepsilon\varepsilon\varepsilon O\varepsilon\varepsilon O\varepsilon$ . . . .stb.

Mindegyik ilyen sorozat, amely N oszcillátorjelet és q kvantumjelet használ fel, a kvantumoknak egy lehetséges szétosztását szimbolizálja. Az egymástól különböző ilyen sorozatok száma W.

Ha valaki n db. megkülönböztethető elemből akar egy sorozatot kiválasztani, az első elem kiválasztása n féle módon történhet: bármelyik elemet választhatjuk. A második elem kiválasztására így $(n-1)$-féle lehetőség marad, tekintve, hogy egy elemet már elvettünk. Az első n-féle választási lehetőség bármelyike a második $(n-1)$ bármelyikével társulhat, ezért az első két elem kiválasztása $n \cdot (n-1)$-féle módon történhet. Az összes kiválasztási lehetőségek száma tehát

$$n \cdot (n-1) \cdot (n-2) \cdot (n-3) \ldots . \qquad \ldots 3 \cdot 2 \cdot 1,$$

amit röviden így jelölünk: $n!$.

A fenti sorozatban az első helyen mindenképpen egy O oszcillátorjelnek kell szerepelnie. Ezért $(N+q-1)$ darab szimbólum marad összesen a további játékhoz, melyek $(N+q-1)!$ számú módon rendezhetők sorba. De az összes q kvantumjel egyenértékű és ezek egymás közti felcserélgetése nem ad újabb elrendezést (ha az első atom után a sorozatban egy ε áll, akkor az egykvantumú állapot, bármelyik ε álljon is ott). q számú kvantum esetén $q!$ az ilyen triviális átrendezések lehetséges száma. Hasonlóképpen, az első oszcillátorjel kitétele után maradó $(N-1)$ oszcillátorjel egymás közti felcserélgetése $(N-1)!$ triviális átrendezést jelent. (Ez egyáltalán nem befolyásolja az adott sorozat jelentését, mivel az egyes oszcillátorokat a sorozatban elfoglalt helyük mutatja, nem pedig valami egyedi megkülönböztető jelzés) Ezért W, az egymástól különböző elrendezések teljes száma, kisebb mint $(N+q-1)!$. Mégpedig a fentiek szerint

$$W = \frac{(N+q-1)!}{q!(N-1)!} .$$

Ha a kvantumok számát eggyel megnöveljük, $(q+1)$-re, W számlálója $(N+q)$!-ra változik — ez éppen $(N+q)$-szorosa a korábbi értéknek. A nevezőben levő $q!$-ból $(q+1)!$ lesz, ez $(q+1)$-szerese az előbbi értéknek. Az $(N-1)!$ tag változatlan. Így W az $(N+q)/(q+1)$ tényezővel szorzódik, ha egy új kvantum adódik a rendszerhez. W'-vel jelölve most a lehetőségek számát:

$$W'/W = (N+q)/(q+1) \approx 1 + N/q,$$

ha q jóval nagyobb mint egy.

B. Függelék

Szabadenergia

Tekintsük ismét a víz fagyását. Ez a folyamat mólonként 6000 J energiát ad át a környezetnek; azaz állandó nyomáson $\Delta H = -6000$ J mól^{-1}. Ennek elég nagynak kell lennie ahhoz, hogy ellensúlyozza a víz jéggé alakulása közbeni entrópiaváltozását, azaz -22 JK^{-1} · mól^{-1}-t. Ha a környezet 250 K hőmérsékletű, a nem kevesebb, mint $250 \cdot 22 = 5500$ J mól^{-1} érték megfelel; 300 K-nél a követelmény $300 \cdot 22 = 6600$ J · mól^{-1}. Az elsőt a rendszer tudja biztosítani, a másodikat nem, ezért a víz megfagy 250 K-nél, de nem fagy meg 300 K-nél. Az első esetben mintha a rendszernek 500 J mól^{-1} feleslege, a másodikban mintha 600 J mól^{-1} deficitje volna. Ezek a különbségek éppen a ΔH és $T \cdot \Delta S$ közti különbségek, ahol ΔS a rendszer kémiai részének entrópiaváltozása. Azt mondhatjuk, hogy a szabadenergia változása az első folyamatra 500 J · mól^{-1} „jó," a másodikra 600 J mól^{-1} „rossz" irányban. Nem törődve most az előjelekkel, *ez* az amit a ΔG szabadenergia-változás jelent. Továbbá, mivel spontán változásnál a folyamat több energiát juttat a környezetnek, mint amennyi a belső entrópiacsökkenést ellensúlyozni képes, a spontán változás csökkenti a szabadenergiát. Mivel a szükségesnél többet áldozott most fel, a rendszernek kisebb tartaléka marad a jövőre.

A szabadenergia-változás kapcsolatos továbbá a K egyensúlyi állandóval is. A víz ionizációja esetén a szabadenergia változása éppen kb. 100 kJ mól^{-1} „rossz" irányban ($335 \cdot 298$). Csak akkor történhet akármi is, ha valami más $\Delta G/T$-vel egyenlő nagyságú entrópiaváltozást sikerül találni. Ez a változás jöhet azonos és különböző részecskék keveredéséből, mely $kL \ln (1/K)$ értékű mindegyik fajta részecske minden móljára. Így azt kapjuk, hogy ha a kettő egyensúlyban van:

$$kL\Delta \ln (1/K) = \Delta G/T$$

vagy

$$\ln K = -\Delta G/kLT = -\Delta G/RT,$$

ahol R-et — történelmi okokból — gázállandóank nevezzük.

IRODALOM

[1] Nuffield Advanced Physics, 10. füzet, Waves, particles and atoms, Longman (korábban Penguin), 1971.

[2] Nuffield Advanced Physics, 9. füzet, Change and chance, Longman (korábban Penguin), 1972.

[3] Bent, H. A., The second law, Oxford University Press, 1965.

[4] Nuffield Advanced Physics, hurokfilmek (8 mm-es), 1972:
Forwards or backwards? 1 Penguin XXl668
Forwards or backwards? 2 Penguin XXl669

Forwards or backwards? 3 Penguin XXl670
[5] PSSC College physics (21 és 22 fejezet), Raytheon, 1968.
[6] PSSC film, Random events, Guild Sound and Vision Ltd. (az Egyesült Királyság területén) 900 4116–5.
[7] Feynman, R. P., Leighton, R. B., Sands, M.: Mai fizika, 4. kötet, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1969.
[8] Nuffield Physics (O-level*), Teachers' guide IV. Penguin/Longman, 1966.
[9] Ogborn, J. M., „How the normal distribution got its hump" Mathematics teaching No. 66., 1974 március.
[10] Black, P. J., Davies, P., Ogborn, J. M., „A quantum shuffling game for teaching statistical mechanics", American Journal of Physics, *39*, 10, 1154–1159 oldal, 1971.
[11] Nuffield Advanced Physics, Change and chance – a model of thermal equilibrium in an Einstein solid (16 mm-es fekete-fehér számológépes film) Penguin ,XXl1673, 1972.
[12]* Campbell, J. A., Why do chemical reactions occure? Prentice Hall, 1965.
[13]** Chisman, D. G., „Formaldehyde-bisulphite time reaction", megjelent: Science Masters Book Series IV., Part 2, Chemistry. John Murray, 1956.

* O-level = Ordinary level (ford. megj.)
** A [12] és [13] számú irodalomban leírt reakciók a [2]-es irodalomban is megtalálhatók.

ESEMÉNYEK

TANÁROK TOVÁBBKÉPZÉSE DEBRECENBEN

A Társulat debreceni csoportja megalakulása óta rendszeresen segíti a közép- és az általános iskolában fizikát tanító tanárokat szakmai továbbképzésükben. A továbbképzés rendszere és ennek megfelelően az együttműködés módja az évek folyamán többször változott. Az utóbbi években Hajdú-Bihar megyében a továbbképzési napon egy aktuális témából biztosít előadót a csoport. Ilyen előadást tartott pl. Tóth Eszter: Kvantummechanika tanítása a középiskolában, Csákány Antalné: Az atomfizika tanításának problémái a középiskolában (1974. márc. 25.), Kovács László: A szilárdtest-fizika gimnáziumi oktatásának módszerei és tapasztalatai (1974. okt. 16.), Kedves Ferenc: A gimnáziumi fizikaoktatás mai problémái (1975. márc. 7.), Csákány Antalné: Fakultatív fizikaoktatás a budapesti Radnóti Miklós Gyakorló Iskolában (1975. okt. 21.), címmel.

Az általános iskolában tanítók részére pedig a következő előadások hangzottak el: Kedves Ferenc: Az általános iskolai fizikaoktatás mai problémáiról (1975. márc. 7.), Vasváry Zoltán: Mit ad az alsó tagozatos természetismeret az általános iskolai fizika tanításának (1975. okt. 21.),

Az általános iskolában tanítók tavaly márciusban látogattak az ATOMKI-ba. Ez év március 10-én pedig a továbbképzési napon – ugyancsak a Társulat debreceni csoportjának a szervezésében – 19 Hajdú-Bihar megyei középiskolai tanár látogatott az MTA Atommag Kutató Intézetébe. Az ATOMKI-ban Berényi Dénes akadémikus, az ATOMKI igazgatója üdvözölte a kollégákat. Vázolta az intézet főbb kutatási témáit, eredményeit, és foglalkozott a kutatás és az ipar, az elmélet és a gyakorlat kapcsolatának néhány aktuális problémájával. Kitért még továbbá azon lehetőség ismertetésére is, amit az MTA 1969 óta biztosít az aktív pedagógusoknak a kutatómunkába való bekapcsolódás terén. Az egyéni, szakmai továbbképzés ezen szinte legmagasabb fokú módozatában csak az ATOMKI-ban évente négy-öt középiskolai tanár részesült. A résztvevők kisebb havi ösztöndíj-előleget kaptak, amit eredményesség esetén a tanév végén pár ezer forinttal kiegészítenek. A kollegákat azonban nem ez ösztönözte, hanem annak a lehetősége, hogy a kutatómunkába aktívan „belekóstolhatnak".





Az ATOMKI vonatkozásában a helybeli és a Debrecen környéki iskolákban tanítók időkihasználás szempontjából előnyösebb helyzetben vannak, de éltek ezzel a lehetőséggel az ATOMKI-ban budapesti, győri, nagykanizsai, nagykörösi, sátoraljaújhelyi és szikszói tanárok is. A témaválasztás mindig úgy történik, hogy az része legyen valamelyik intézeti témának, de lehetőleg a tanár iskolai napi munkájának problémáihoz is minél közelebb álljon. Az ösztöndíjas munka eredményessége természetesen sok tényezőtől függ, és ezért a siker is igen különböző volt. A napi iskolai munkájukban mindnyájan hasznát látták annak a munkának, de többen eljutottak arra a szintre, hogy munkásságuk eredményeként közleményt is fel tudtak mutatni, sőt az egyetemi doktori címet is elérték.

Március tizedikén egyébként a továbbképzés keretében a fizikatanárok megtekintették az ATOMKI több laboratóriumát is, így az 5 MV-os elektrosztatikus gyorsítót, a tömegspektrométereket, az elektronspektroszkópiával, a bioszférában levő radioaktivitással és a röntgenemissziós analitikával foglalkozó csoportokat, és természetesen valamennyi helyen ismertetést kaptak az ott folyó kutatómunkáról.

Az intézetlátogatás után igen aktív diszkusszióra került sor, amelyet Szalayné Csongor Éva tud. főmunkatárs vezetett és ebben legnagyobb hangsúlyt a tanárok kutatómunkába való bekapcsolódás, valamint a fizika iránt érdeklődő kiváló középiskolai tanulókkal való foglalkozás kapott.

Az ELFT debreceni csoportja ez utóbbiban Debrecenben is segítséget kíván nyújtani. *M. L.*

AZ IFJÚSÁGI FIZIKAI KÖR TAVASZI ANKÉTJA

A Középiskolai Matematikai Lapok Fizika Rovata és az Eötvös Loránd Fizikai Társulat Ifjúsági Fizikai Köre az 1975/76. tanévi tavaszi ankétot április 7—9. napokon tartotta Budapesten a TTK fizikai intézeteinek tantermeiben. Az ankéton a Kör tagjai és olyan iskolák küldöttei vettek részt, melyekből a Fizika Rovat feladatmegoldó versenyének rendszeres megoldói nem voltak. A megjelent 200 tanuló nagy érdeklődéssel hallgatta az előadásokat, hozzászólt, sokat kérdezett és közreműködött a gyakorlatokon. Előadást tartott Taracsák Gábor „Modern csillagászat", Major János „Newtoni mechanika", Tichy Géza „Rugalmasságtan" és Grüner György „A szilárd anyagok klasszikus és kvantum elmélete" címmel. A Fizika Rovat kísérletező-kutató pályázatán első díjat nyert munkák közül a következőket ismertették a szerzők: Aszódi Ágnes: „A színlátást befolyásoló egyes körülmények vizsgálata"; Dőry István, Kőrösmezey Ákos és Hampel László: „Rugók dinamikus úterő függése"; Györök György: „Oszcillátorok frekvenciastabilitása"; Heintz Tamás, Sziva Dénes és Tóthfalusi Márton: „Növények színanyagainak kromatográfiás vizsgálata"; Hruscsák Erzsébet és Vidra Zsuzsa: „Forgó folyadék belső súrlódásának vizsgálata"; Kuslits Katalin és Ongjerth Magdolna: „A fővárosi természetes vizek elszennyeződése". Csoportokban szemináriumszerűen feladatmegoldást vezettek Ábrahám Tibor, Eber Nándor, Major János, Mihály György, Sasvári László, Szabó György és Tichy Géza. Az Oktatási Minisztérium az összes vidéki tanulóknak ingyenes szállást biztosított, a legjobb feladatmegoldók vasúti költségét pedig megtérítette. A Fizikai Társulat az utóbbiakat két napon ebéden vendégül látta. A következő (sorrendben 29-edik) ankét az 1976/77. tanévben a téli szünetben lesz.

K. R.

AZ EURÓPAI FIZIKAI TÁRSULAT (EPS) KIADTA A HEWLETT-PACKARD-EUROPHYSICS DÍJAT

Három szovjet és egy francia fizikusnak ítélték oda az 1975. évi Hewlett-Packard-Europhysics díjat a szilárdtest fizika terén elért kiemelkedő eredményeikért. A díjat az Európai Fizikai Társulat bukaresti vándorgyűlésén adják át szept. 9—12. között.

A Hewlett-Packard S. A ezt a díjat évente adja ki. Összege 20 000 svájci frank, melyet ezúttal a következő négy fizikus között osztanak meg:

Viktor Sz. Bagajev,
Leonid V. Keldis,
Jaroszlav E. Pokrovszkij
és Michel Voos.

Bagajev és Keldis levelező tagjai a Szovjetunió Tudományos Akadémiájának, 44 évesek és kutatócsoportok vezetői a moszkvai Lebegyev Fizikai Intézetben. Pokrovszkij a Lebegyev Intézethez tartozó Rádiótechnikai és Elektronikai Intézetben a félvezető anyagokban végbemenő elektronfolyamatokkal foglalkozó laboratórium vezetője. Voos 35 éves, a Comité National pour la Recherche Scientific kutatója. Ez az intézet 1967 óta a párizsi Ecole normale superieure szilárdtestfizikai csoportjához tartozik.

A szaktudósokból álló bizottság, melyet az Európai Fizikai Társulat a Hewlett-Packard számítógép gyár által évenként adományozott díj első alkalommal történő odaítélésével megbízott, a díjat az excitonok kondenzációjának felfedezéséért javasolta. Az exciton nevet egy gerjesztett kristályállapotnak adták (l. Europhysics 1974 október), melynél egy negatív töltésű elektron és egy pozitív töltésű „lyuk" (elektronhiány) kölcsönösen egymást vonzva olyanféle rendszert alkot mint a protonból és elektronból álló hidrogén atom. Keldis elméletileg megjósolta, hogy intenzív laser sugarak hatására keletkező nagyszámú exciton egyes anyagokban elektron-lyuk plazmacseppek alakjában kondenzálódik, hasonlóan ködből kiváló vízcseppekhez. Bagajev, Pokrovszkij, Voos és más kutatók észleltek is ilyen cseppeket az anyakristályban fellépő speciális elektromos és optikai jelenségek alapján. Exciton kondenzációra alkalmas anyag pl. a félvezető elektronikai ipar által széles körben használt szilícium, továbbá a germánium. Az exciton kondenzáció felfedezése máris nagy hatással van új, érdekes jellemzőkkel bíró félvezető anyagok fejlesztésére és a szilárd testek tulajdonságainak mélyebb megértésére. (Europhysics News 1975. júliusi szám. Ford. Kunfalvi Rezső.)

A szerkesztésért felel: Turiné Frank Zsuzsa
Szerkesztőség: Budapest V., Anker köz 1, Eötvös Loránd Fizikai Társulat. Távbeszélő: 227-040
A kiadásért felelős: Siklósi Norbert igazgató
Kiadja a Lapkiadó Vállalat, Budapest VII., Lenin körút 9—11. Levélcím: 1906. postafiók 223 Távbeszélő: 221-293
Terjeszti a Magyar Posta. Előfizethető bármely postahivatalnál, a kézbesítőknél, a Posta hírlapüzleteiben és a Posta Központi Hírlap Irodánál (KHI, 1900 Budapest V., József nádor tér 1.) Közvetlenül vagy postautalványon valamint átutalással a KHI 215-96162 pénzforgalmi jelzőszámlára
Előfizetés egy évre 72,—Ft; egyes szám ára 6,—Ft. Megjelenik havonta
76.3119 Akadémiai Nyomda Budapest V., Gerlóczy utca 2. — Felelős vezető: Bernát György
Index: 25.289

KÜLFÖLDÖN MEGRENDELHETŐ AZ ALÁBBI CÍMEKEN A FOLYÓIRAT:

ANGLIA:

THE DANUBIA BOOK COMPANY,
58, Chatsworth Road *LONDON NW2 4DD*

AUSZTRÁLIA:

COSMOS BOOK AND RECORD SHOP,
145 Acland St. *St. KILDA, Vic. 3182*
GLOBE AND CO.,
694—696 George St., *SYDNEY NSW 2000*

AUSZTRIA:

RUDOLF NOVÁK GmbH.,
Köllnerhofgasse 4., *A-1011 WIEN I.*,

BELGIUM:

„DU MONDE ENTIER" S. A.,
Rue du Midi 162 *B-1000 BRUXELLES*

BRAZÍLIA:

LIVRARIA D. LANDY LTDA.,
Rua 7 de Abril, Caixa Postal 7943.
01000 SAO PAULO

KANADA:

DÉLIBÁB FILM AND RECORD STUDIO
19, Prince Arthur Street West,
MONTREAL 130. Que.
PANNONIA BOOKS,
P.O. Box 1017 Postal Station „B"
TORONTO, Ontartio M5T 2T8
HUNGARIAN IKKA AND TRAVEL SERVICE,
1234 Granville Street, *VANCOUVER 2, B.C.*

DÁNIA:

HUNNIA BOOKS AND MUSIC,
Norrebrogade 182 I tv. *KOBENHAVN*

FINNORSZÁG:

AKATEEMINEN KIRJAKAUPPA,
Keskuskatu 2. *SF 00100 HELSINKI 10.*

FRANCIAORSZÁG:

SOCIÉTÉ BALATON,
12, Rue de la Grange Bateliere *75 PARIS IXe*

HOLLANDIA:

CLUB QUALITON,
Prinsenstraat 26. *AMSTERDAM*

JUGOSZLÁVIA:

FORUM,
Vojvode Misica broj 1. *NOVI SAD*

NORVÉGIA:

A/S NARVESENS LITTERATUR TJENESTE,
P.O. Box 6140 Etterstad *OSLO 6.*

NÉMET SZÖVETSÉGI KÖZTÁRSASÁG:

UJVÁRY — GRIFF,
8000 MÜNCHEN 81. Titurelstr. 2.
MUSICA HUNGARICA,
8 MÜNCHEN 40., Agnesstrasse 45

SVÁJC:

METROPOLITAN VERLAG,
Teichweg 16. *CH-4142 MÜNCHENSTEIN*

SVÉDORSZÁG:

A.B. NORDISKA BOKHANDELN,
Alströmergatan 22. *101 10 STOCKHOLM*

AMERIKAI EGYESÜLT ÁLLAMOK

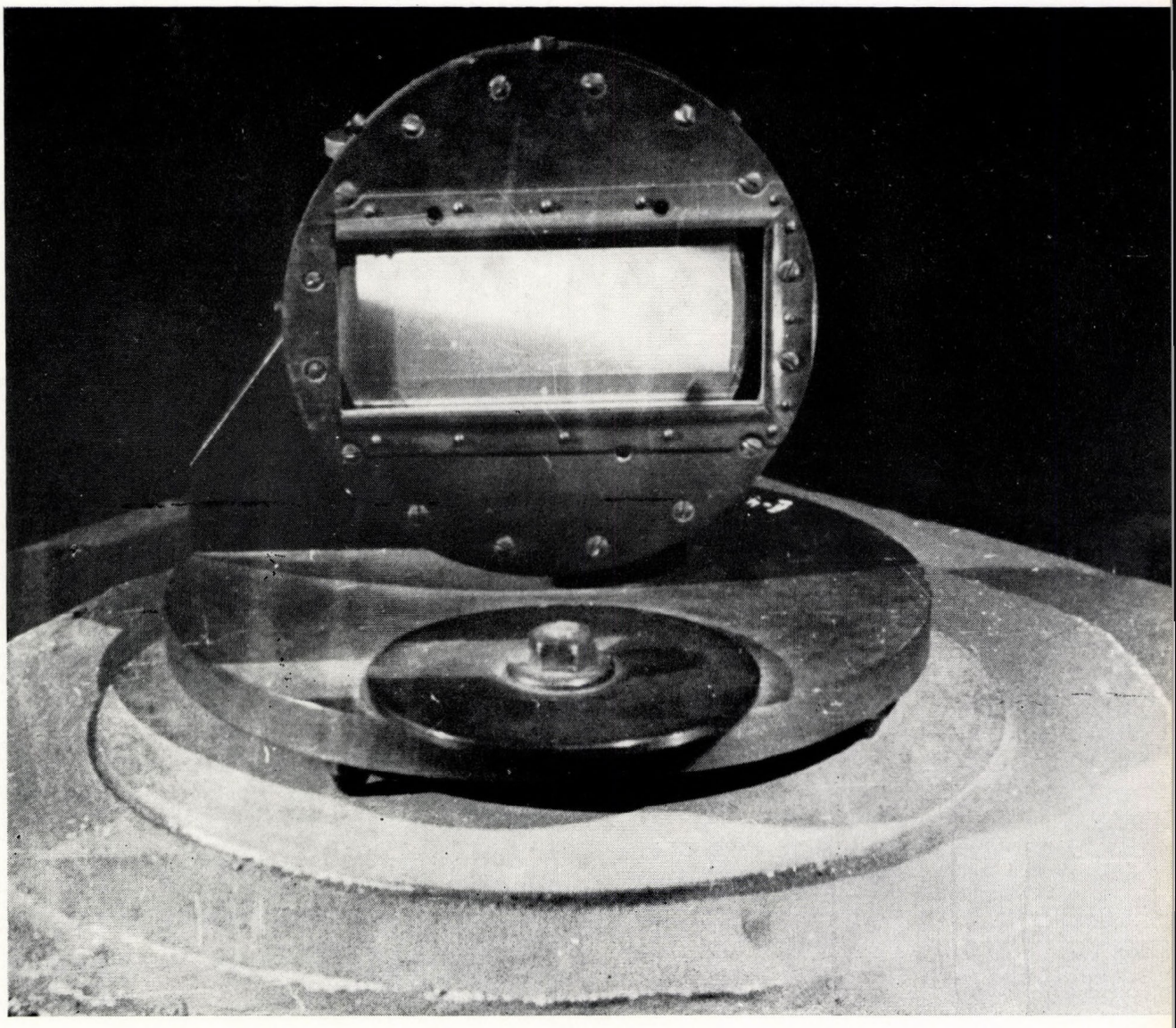
CENTER OF HUNGARIAN LITERATURE
4418 — 16th Avenue *BROOKLYN, N.Y. 11204*
HUNGARIAN BOOKS AND RECORDS
11802 Buckeye Road *CLEVELAND, Ohio 44120*

VENEZUELA:

LOUIS TARCSAY,
Calle Iglesia Ed Villoria, Apt. 21-105. C. 24.
CARACAS

fizikai szemle

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat lapja



1976/6

A szerkesztőbizottság elnöke:

Marx György

A szerkesztésért felelős:

Turiné Frank Zsuzsa

A szerkesztőbizottság titkára:

Berényi Dénes

Szerkesztőbizottság:

Balázs Béla, Barlai Katalin, Barta György, Bozóky László, Csekő Árpád, Dede Miklós, Fehér István, Flórián Endre, Gaal István, Groma Géza, Haiman Ottó, Hoffmann Tibor, Holics László, Károlyházy Frigyes, Keszthelyi Lajos, Kovács István, Mihály László, Schanda János, Soós Károly, Szigeti György, Tóth Eszter, Valkó I. Péter, Vermes Miklós

Címképünk:

A BME Atomfizikai Tanszékének Rowland-típusú optikai rácsa. A nagyfelbontóképességű rácson 200000 karcolat van, a rács szélessége 15 cm

TARTALOMJEGYZÉK

Szent-Györgyi Albert: Elektronok szerepe az életjelenségekben 201 oldal
N. F. Ramsey: A neutron elektromos és mágneses dipolmomentuma 205 oldal
Kunszt Zoltán: A nagyenergiájú fizika új, különleges tulajdonságú részecskéi, a pszioncsalád 212 oldal
K. G. Wilson: Renormálási csoport és blokk spinek 220 oldal
Vajda Pál: Molekulaspektroszkópiai iskola Magyarországon 225 oldal

A FIZIKA TANÍTÁSA

R. U. Sexl: Mit tanítsunk fizikából és miért? 235 oldal
J. M. Ogborn: Az impulzust először — alternatív út Newton törvényeihez 236 oldal

KÖNYVEK
VÉLEMÉNYEK

A. Alexandrov: Legfőbb feladatunk: új ismeretek szerzése alapkutatások útján 240 oldal

СОДЕРЖАНИЕ

А. Сент-Дьердьи: Роль электронов в процессах жизни
Н. Ф. Рэмси: Электрический и магнитный дипольные моменты нейтрона
З. Кунст: Семья псионов — новых частиц физики высоких энергий с особыми свойствами
К. Дж. Вильсон: Группа ренормировки и блок-спины
П. Вайда: Традиции молекулярной спектроскопии в Венгрии

ПРЕПОДАВАНИЕ ФИЗИКИ

Р. У. Сексль: Что преподавать по физике и почему?
Дж. Огборн: Сначала импульс — возможный вариант путей к законам Ньютона

КНИГИ
ОТЗЫВЫ И ВЫРАЖЕНИЯ МНЕНИЙ

INHALT

A. Szent-Györgyi: Die Rolle der Elektronen bei Lebensvorgängen
N. F. Ramsey: Das elektrische und das magnetische Dipolmoment des Neutrons
Z. Kunszt: Die Psionen-Familie — neue Teilchen der Hochenergie-Physik mit besonderen Eigenschaften
K. G. Wilson: Renormierungs-Gruppe und Block-Spins
P. Vajda: Die Traditionen der Molekül-Spektroskopie in Ungarn

UNTERRICHT DER PHYSIK

R. U. Sexl: Was soll aus Physik unterrichtet werden und warum?
J. M. Ogborn: Erst den Impuls . . . — ein alternativer Weg zu den Newtonschen Gesetzen

BÜCHER
STELLUNGNAHMEN UND MEINUNGSÄUSSERUNGEN

CONTENTS

A. Szent-Györgyi: The role of electrons in the phenomena of life
N. F. Ramsey: The electric and magnetic dipole momenta of the neutron
Z. Kunszt: The psion family — new particles of high energy physics with unusual properties
K. G. Wilson: Renormalization group and block spins
P. Vajda: Traditions of molecular spectroscopy in Hungary

THE TEACHING OF PHYSICS

R. U. Sexl: What to teach in physics and why
J. M. Ogborn: The impulse first — an alternative way of approaching Newton's laws

BOOKS
OPINIONS

fizikai szemle

AZ EÖTVÖS LORÁND FIZIKAI TÁRSULAT LAPJA

Alapította Eötvös Loránd 1891-ben Mathematikai és Physikai Lapok néven

XXVI. évfolyam 6. szám 1976. június

ELEKTRONOK SZEREPE AZ ÉLETJELENSÉGEKBEN

előadás az ELTE hallgatóinak, 1973)

Szent-Györgyi Albert

I.

A biológia vonzerejét — ami engem is leginkább csábított — a rendkívüli érzékenység, a reakciók gyorsasága és finomsága adja. A mai biológia teljesen a molekuláris elgondolásra épül. A molekulák azonban, különösen az óriás fehérjemolekulák nagy és nehézkes egységek, nagy aktivációs igénnyel (jól meg kell őket lökni, hogy valamit csináljanak). Ezért sohasem tudtam elhinni, hogy ezek az egységek lennének felelősek az élet csodálatos finomságáért. Mindig lázadó voltam és csatlakoztam Barnard Shaw gondolatához: amit mindenki hisz, az valószínűleg rossz, nem lehet teljesen igaz. Arra gondoltam, hogy az élet megközelítéséhez sokkal kisebb egységekre van szükségünk, mint egy ilyen nagy, nehézkes molekula, milliós vagy tízmilliós vagy százmilliós molekulasúllyal.

Kicsi és nagyon mozgékony egység csak egy van, az az elektron. Több, mint 30 évvel ezelőtt egy fiatal barátommal, Laky Kálmánnak való vita után Angliában publikáltam egy írást, amelyikben azt mondtam hogy a fehérjének (proteinnek) félvezetőnek, elektromos vezetőnek kell lennie. Erre természetesen az egész világ nekem támadt. Azt mondták: csak rá kell nézni a fehérjére, és az ember látja, hogy nem vezet! Tudniillik egy félvezető vagy vezető általában színes, és sohasem átlátszó, mivel a vezetési elektronok szabadon mozoghatnak benne, és így rendkívül könnyen felvesznek egy fotont. Ha az elektronok elnyelnek egy fotont, abból szín lesz. Ha sokat vesznek fel, átlátszatlan lesz az anyag. A fehérjének pedig még a neve is azt mondja, hogy fehér. Ez nem kedvetlenített el, mert tudom, hogy egy igazi felfedezés mindég ellentétben áll az uralkodó nézettel, különben nem felfedezés, hanem cséplőgép vagy valami ilyesmi. A hitetlenkedés nem kedvetlenít el, sőt a nagy ellenállás mindég felajzza az embert, azt mondja: úgy látszik, valami nagy felfedezés felé közeledem.

Ma már többé-kevésbé elfogadott, hogy a fehérje elektronjainak energianívói vannak. Ezek a nívók zavarják, perturbálják egymást, egy közös folytonos energiasávvá folynak össze. Köznyelven kifejezve ez azt jelenti, hogy a fehérjemolekulát — a proteint képző molekulaláncot — elektronfelhő veszi körül. Az, hogy ebben a felhőben mozoghatnak-e az elektronok, számuktól függ. Ez számunkra lényeges kérdés, hiszen csak mozgékony elektronok fejthetik meg, magyarázhatják meg az életjelenségeket. Azt mindenki tudja, hogy minden rendszerben csak két elektron energiája egyezhet meg (és csak akkor, ha ellenkező irányban pörögnek). Úgy tűnik, hogy a proteinben kétszer annyi elektron van, mint az állapotok száma, ezért minden hely be van töltve. A helyzet ugyanaz, mint egy golyókkal teli skatulyánál, hiába rázza az ember, a golyók nem tudnak mozogni. Hogy mozoghassanak, ki kell venni néhány golyót a dobozból vagy az elektronokat az elektronsávból, hogy kevesebben legyenek annál a bizonyos kétszeres számnál.

Törtük a fejünket; hogyan lehet elektronokat kivenni? Ez nem tehető meg akármilyen energiával, mert az elektronok tartózkodási sávja után közvetlenül egy tiltott terület — egy Brillouin-sáv — következik, ahol nem tartózkodhat elektron, azután jön egy üres energiasáv, ahol az elektronok megint elhelyezkedhetnek. Ha ez a két sáv olyan közel van egymáshoz, hogy már a hőmozgás fellökhet eletronokat, akkor az üres sávba fellökött elektronok szabadon mozoghatnak. A hátramaradt sáv is vezető lesz, mert ott lyukak keletkeztek. Kérdés: milyen messze van a következő sáv? Azok az anyagok, melyeknél ez a sáv olyan közel esik, hogy már a hőmozgás fellökhet egy elektront, a félvezetők. Ezek vezetnek, a „fél" nem jelent semmit, nem félnek vezetni, egyszerűen nemfémes vezetők. A tiltott zóna szélességét sok helyen kiszámolták, és kiderült, hogy az nagyon nagy, legalább 3 eV. Ennyi energia az élő szervezetben nincs. Az élő energetikailag nagyon szerény és szegény valami, csak 1/4 eV áll rendelkezésére. Így a kvantummechanikai számítás sem segített. Még mindig ott álltam védtelenül a támadásokkal szemben.

Felmerült ekkor a gondolat, hogy vannak anyagok, melyek a proteintől elektront vehetnek át, tehát olyan elektron-akceptorok, melyeknek üres elektronpályájuk van, így képesek oda egy-egy elektront magukhoz szippantani. Ilyenre a szilárd anyagnál sok példát találhatunk; a rádiók és a televíziók olyan alkatrészeket tartalmaznak, amik ezt a jelenséget hasznosítják. Tehát arra gondol-

tunk, hogy vannak ilyen elektronéhes (üres pályájú) tisztátlanságok. Brillouin, a szilárd halmazállapotok megismerésének egyik nagy úttörője, egy elméletet javasolt, mely szerint a proteinhez akceptor-tisztátlanságok, vagyis elektron felvevő képességű anyagok kapcsolódnak, és így a protein vezetővé lesz.

Hamar válasz érkezett a vegyészektől. Azt mondták: mi már száz és száz proteint izoláltunk, megvizsgáltunk, de ilyen tisztátlanságot soha senki nem talált. Mivel szilárd meggyőződésem volt, hogy az élet megértéséhez a fehérje vezetni kénytelen, számomra a kérdés nem az volt, hogy vezetők-e, vagy sem, hanem az, hogy a tudomány hol siklott ki, hol vesztette el a fonalat. Ezen gondolkodtam az utóbbi hónapokban. A megoldás egyszerű, gyerekesen egyszerű!

II.

Mit jelent az, hogy élet? Ezt definiálni nem tudjuk, de hogy a kutyám él-e, azt tudom. Ha ugat, a farkát csóválja és a szőnyegemet bepiszkítja, akkor biztosan él. Ezek az életjelenségek. Hogy dehidrogénez-e, csinál-e polimereket, az nem kérdés, az nem élet. Hogy ugat, farkát csóválja, kiválasztásai, reflexei vannak, izommunkát végez: ez az élet, ezek a nagy életjelenségek. Ezeket az életjelenségeket mind a struktúrák végzik. Az agy, az izom, a máj, a vese mind megannyi — félig szilárd halmazállapotú — struktúra, ezek adják a nagy életjelenségeket, amik lényegében energia-átalakítások. Tudniillik ezek mind kémiai energiát alakítanak át munkává, ami két teljesen különböző dolog. Egy nagy transzformáció folyik, amit ezek a szerkezetek, ezek a szilárd halmazállapotú szervek végeznek. Összekapcsolni vagy széthasítani két molekulát — amit a legtöbb enzim tesz — az nem munka, hanem kémiai reakció. A vezetés azért kell nekem, hogy megmagyarázzam: hogyan működnek ezek a struktúrák.

A struktúrák rendszerének kiszolgálására vannak oldott fehérjék. A struktúra azt jelenti, hogy oldhatatlan szilárd halmazállapotú, hogy nem megy oldatba (molekuláris diszperzióba), hanem értelmesen összefüggő rendszer marad, ahol a molekulák összekapcsolódnak. Az oldható proteinek ezt a rendszert szolgálják ki. A háztartási munkát végzik, amit akár egy pohár vízben is elvégeznek, ha izolálják az enzimet és hozzáadjuk a szubsztrátumot. Ezeknek az oldott fehérjéknek semmi szükségük a vezetésre. A vezetés az energiatranszformációhoz kell, tehát a struktúraproteineknek kell azt létrehozniok.

Mi történik a biokémiában? Jön egy vegyész és fehérjékkel akar foglalkozni. Ehhez kristályos vagy molekulárisan diszpergált proteinre van szüksége, amit tisztán előállíthat. Ilyet a struktúrákban nem talál, onnan nem lehet a molekulákat kiszedni, úgy össze vannak gubancolódva. Így aztán oldható proteineket használ, ahol nincs félvezetés, mivel nincs is szükség rá. Az egész problémát úgy oldották meg, hogy kivonták az összes oldható fehérjét; ami maradt — a tulajdonképpeni élő anyag — azt elnevezték maradéknak és kidobták. Ez volt a legegyszerűbb megoldás, de ezzel kidobták az élet legnagyobb titkát. A biokémiának talán legmélyebb problémája volt ez, úgyhogy a problémát egyből eltemették. A fehérjekémia az oldható fehérjék, nem pedig a struktúrafehérjék kémiája lett, azokhoz senki sem mert hozzányulni. Amikor munkatársaimmal néhány hónappal ezelőtt ebbe az irányba kezdtünk mozogni, először nekiálltunk a struktúráknak, szétzúztuk őket, hogy a vért teljesen kimoshassuk belőlük, aztán a maradékot feloldottuk és megnéztük. Aki a májproteint tartalmazó kémcsőre azt mondja, hogy színtelen, az menjen más pályára. Olyan, mint egy jó svájci csokoládé, sötét vörösesbarna, sokkal sötétebb, mint maga a máj.

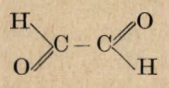
Kérdésünk még mindég az, mennyire molekuláris vagy mennyire elektronos jelenség az élet. Ez annyira alapvető probléma, hogy lehetőleg az elején kell kezdeni, vissza kell menni az ősállapothoz, megnézni: hogyan fejlődött ki ez a rendszer.

Amikor az élet keletkezett, Földünkön teljesen sötét volt, a légkört igen sűrű vízgőz alkotta, még oxigén sem volt. Azt hiszem, egyikünk sem szeretne ilyen körülmények közt élni. Ezek között a rettenetes viszonyok közt az élet sem tudott mást produkálni, mint a legprimitívebb rendszereket. Hogy milyen volt az élet, azt pontosan nem tudjuk. Csak elképzeléseink vannak. Ilyen körülmények között csak a legegyszerűbb folyékony dolgok létezhettek, mikrocseppecskék, és hogy ilyen rossz stabilitási föltételek közt életben maradhassanak, a lehető leggyorsabban szaporodniuk, osztódniuk kellett. Ezt meg is tették, tehát megmaradtak. Ezt a szaporodást segítette a folyékony halmazállapot és az egyszerű szerkezetet. Közben Földünk hült, ennek következtében a vízgőz kezdett kicsapódni. Végre a fénysugarak, fotonok áthatolhattak ezen a vízgőz légkörön. Az élet igen találékony, rögtön rájött, hogyan foghatja el ezeket a fotonokat, amik mindegyike egy nagy csomó energiát hoz (ezek energiacsomagok és negatív entrópiacsomagok). Az élőlény elkapta őket, a vizet oxigénre és hidrogénre bontotta, a hidrogént a szénhez kapcsolta. Ebből lett a tápanyag. Ma is, ha vajaskenyeret tetszik enni, az végeredményben nem más, mint szénhez kapcsolt hidrogén; az oxigént az élőlény visszaküldte a légkörbe. Most az energia felhasználásához csak meg kell fordítani a folyamatot: felvenni a levegőből az oxigént, összekapcsolni a hidrogénnel, ismét vizet csinálni belőlük. Lényegében ez a biológiai oxidáció. Ezt mind az oxigén idézi elő. Amikor megjelent a szabad oxigén, az élet elkezdett fejlődni. Ennek a nagy fejlődésnek az eredményei bonyolult struktúrák, borzasztóan komplikált reakciókkal. A struktúrákban már meg kell állítani az osztódást, mert pl. ha sejtjeim korlátlanul elkezdenének osztódni, akkor minden összezavarodna bennem. Mindez akkor történt, amikor az oxigén bejött az életbe. Warburg azt mondta: mindezt a fejlődést egyszerűen az energia-

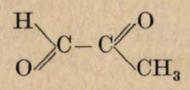
bőség megjelenése okozta. De ez nem így elfogadható, mert az energia nem tud alkotni. Az csak szükséges, nélküle semmit sem lehet csinálni. Pl. energia nélkül az autó nem fog szaladni, de az energia nem tud kocsit építeni, vagy kocsit javítani. Az életet is csak hajtani tudja az energia, de azt felépíteni nem képes. Egy más, egészen más elgondolásra van szükség.

Az oxigén azért fontos, mert oxidál, vagyis elektronokat vesz fel, majd protonokat köt meg, és víz lesz belőle. Ez az oxidáció lényege. Arra gondolhatunk, nem az oxigén veszi-e fel az elektronokat a proteintől, azt vezetővé téve? Nem ennek következtében indul meg ez a nagy, csodálatos átalakulás? Sajnos nem ez történik. A protein úgy van megépítve, hogy a molekuláris oxigén ne szedhessen ki belőle elektronokat. Felmerül a kérdés, hogy az oxidációs anyagcsere termékei közt vannak-e oxigént tartalmazó elektron-felvevőképességű vegyületek. Megnézve a szénhidrogének oxidációs termékeit, az oxigéntartalmúak egész sorát találhatjuk, például hidroxilok, karboxilok, ketonok, de közülük egyedül a karbonil csoport (= C = O) képes elektronfelvételre. A kettős kötés egyike σ, a másik π. Számunkra ez utóbbi érdekes, mert ennek egészen különös sajátosságai vannak. Ez egy olyan atompálya, ahová még vendégeket hívhat meg. Egyedül mégsem képes lenyelni egy egész elektront — legalábbis könnyen nem. Ha a π kötés mellé egy másik π kötést teszünk, akkor ezek konjugált rendszerré olvadnak össze, és ez már könnyen felvehet egy egész elektront. Jó néhány olyan vegyület van, mely ilyen Konjugált π rendszert tartalmaz, például a glioxál, a metilglioxál, a krotonaldehid. Ezek igen egyszerű vegyületek, kérdés: meg tudják-e csinálni, amit az oxigén nem tud, elektronokat levenni a proteinről. Ezt a kérdést a kísérletnek kell eldönteni.

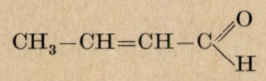
glioxál



metilglioxál



krotonaldehid



Emlékezzünk, elektronleadás után a protein félvezetővé válik, aminek legfeltűnőbb jele, hogy színes. E kísérlet egyszerű: Veszünk egy kazeinoldatot. (A kazein a tej egyik fehérjéje, és tényleg fehér.) Krotonaldehidet adunk hozzá. Másnap reggelre megkapjuk az eredményt: az oldat elszíneződik, pontosan a máj színét veszi fel.

Mi mást csinál még az oxigén? Leállítja a sejtosztódást. A dikarbonilek egész sorát szintetizáltuk, és megnéztük, hogy leállítják-e a szaporodást a protein szétroncsolása nélkül. Először baktériumokat néztünk, majd vírusokat, növényi magvakat, s az eredmény megfelelt várakozásunknak: a dikarbonilok azonnal levágták a sejtosztódást.

Hátra van még, hogy bebizonyítsuk: itt tényleg elektronátvitel történt. Két könnyen járható út is kínálkozik ennek eldöntésére. Az egyik az elektron-spin-rezonancia spektroszkópia. Az elektron-spin-rezonancia spektroszkóp egy nagy műszer, ami megmutatja, hogy a mintában van-e párosítatlan elektron. (Ha protein lead egy elektront, akkor a párosítatlan spinű elektronnak marad egy kiegyenlítetlen mágneses momentuma, amit ez az eszköz kimutat.) A kutatás egyik szabálya, hogy minél kisebb, amit nézek, annál nagyobb a berendezés, amivel néznem kell. Az elektronhoz elég egy szoba nagyságú masina, a még kisebb részek vizsgálatához több kilométeres gyorsítócsatornák kellenek.

A másik módszer, amivel a színes anyagot megvizsgálhatjuk, a fényspektroszkópia. A kazein-oldat spektruma, ahol nincsenek stabil szabad gyökök, egy meglehetősen unalmas, sima lefutású görbe. Krotonaldehid hozzáadása után már vannak szabad gyökök, megjelenik egy „váll" a görbén. Az új, görbe voltaképpen két görbéből áll: az eredetiből és még valami másból. A „még valami más"-t meg tudom vizsgálni: a spektroszkóp egyik fénysugarába krotonaldehides, a másikba pedig tiszta kazein oldatot teszünk, ezek egymást kikompenzálják, s megkapjuk annak az anyagnak spektrumát, amelyik a különbséget adja. Ez a spektrum egy éles csúcs, ami az elektron-átvitelre jellemző. Kérdés, hogy melyik elektron ment át? Több ok van a feltevésre, hogy ez csak a nitrogén nem kötött elektronja lehet. (Minden nitrogénnek van két elektronja, amelyik nem vesz részt a kötésben, a franciák úgy mondják: agglegény elektronok, azok még csinálhatnak, amit akarnak.) Hogy tényleg a nitrogén adja le az elektront, azt úgy mutattuk meg, hogy nitrogén-vegyületeket vettünk, aminosavakat, például etilamilt, ahol csak egy etil köti a nitrogént, ahol a nitrogénen kívül még igazán semmi sem tudna elektront leadni, és vizsgáltuk őket fényspetroszkóppal. Ha nem engedjük meg a szabad gyökök képződését, akkor unalmas görbét kapunk. Ellenkező esetben megjelenik a „váll", a kettő differenciája, és ami a töltésátvitelre jellemző: ismét egy éles csúcs. Most már csak azt kell tisztáznunk, hogy a proteinlánc és az akceptor kerülhet-e olyan térbeli helyzetbe, amikor a konjugált pályák segítségével megtörténik az elektronátvitel. Ehhez intim együttlét kell; tized angströmnyi távolságokon múlik, hogy ez megtörténhet.

A dikarbonil nem csak a proteinlánc mentén kapcsolódhat, hanem két különböző proteinmolekula nitrogénjeit is összekötheti, harántkötést alkothat. Ezek a harántkötések oldhatatlanná teszik a proteint, amint ez könnyen bebizonyítható. Veszünk pl. zselatint, ami köztudomásúlag könnyen oldódik, hozzáteszek valamilyen dikarbonilt, és akkor oldhatatlanná válik. Vagyis elektronátvitel alapján a dikarbonil keresztkötéseket létesített a proteinben. Ilyenkor a protein már nagyon jó vezető és így színes, a különböző proteinmolekulák, sejtrendszerek között szabad elektronközlekedés indul meg. Ez magyarázza, miért éppen a struktúraproteinek színesek. A magyar nyelv

kifejezi ezt, hogy a rendes protein, amit a vegyészek vizsgálnak, fehér, mint a víz. Fehérjének hívjuk. De a struktúrák, a máj pédául nem fehér. A struktúra azáltal képződik, hogy ezek az anyagok összekötik a molekulákat, egyben vezetővé teszik őket és színt adnak nekik.

III.

Fordítsuk most figyelmünket a sejtosztódásra. A struktúra szilárd halmazállapotot jelent. Ez nem tud osztódni. Az osztódást megelőzően ezeket a szilárd anyagokat le kell bontani. Már kb. 70 éve tudjuk, hogy minden élő sejtben van egy rettenetesen aktív enzim, ami a glioxál-származékokat lebontja, és amiről eddig senki nem tudta megmondani, hogy mire való az élőben rendkívül kis mennyiségben található glioxál. Mindig meg voltam győződve arról, hogy a természet nem szereti a luxust, és értelmetlen dolgot nem tart. De ha a struktúráért a glioxál felel, akkor a glioxált lebontó enzim természetesen nem luxus.

A tudományban nem az a fontos, mit gondol az ember, hanem hogy mit tud bebizonyítani. Gondolkodni mindenki tud, akinek van egy szivarja. A természetnek egyik csodája a patkánymáj: ha a három lebenyből kettőt kivágunk és összevarjuk az állatot, majd egy hét múlva újra felnyitjuk, megtaláljuk az egész májat, mintha hozzá sem nyúltunk volna. Egy hét alatt a máj kétharmada regenerálódhat, nagyon intenzív sejtosztódás történik. Nem minden sejt osztódik állandóan, csak fele vagy harmada. A regenerálódás után a szokásos módon oldatot készítettünk az érintetlen és az osztódás alatt levő lebenyekből. Szemmel látható különbség: az osztódó sejtek sokkal világosabbak. Ez persze nem meglepő. Ha például megvágom magam, azután megnézem azt az anyagot, ami kezdi kitölteni a sebet, a primitív sejtek kocsonyás halmaza; ha akarom, kitörölhetem őket. Minden tulajdonságuk megvan, ami az ősállapotban — oxigén és fény hiányában — megvolt. Vagyis azt mondhatjuk, hogy az osztódás előtt a sejtnek el kell folyósodnia. Mindenki tudja, hogy az osztódó sejt lebontja a magvát, mert azokkal a nagy struktúrákkal nem lehet osztódni, azokat nem tudja szállítani. A sejtosztódás egy teljes átrendeződés, amihez folyékony halmazállapot kell. A mag 12 vagy 24 kis kromoszómára megy szét, a mitokondriumok eltűnnek. A folyamat azonban itt nem állhat meg, az osztódás befejezésével vissza kell állnia a nyugalmi állapotnak. Ha ez valamilyen oknál fogva nem következik be, akkor baj van. A rák nem más, mint egy sejt, amely osztódik akkor is, amikor nincs rá szükség.

Most akkor az ember tovább spekulál. A rák rettenetesen sok szenvedést okoz. Egyedül az Egyesült Államokban évente 300 000 ember hal meg rákban. De megint bizonyítani kell, amit mondok. A rákos sejt osztódó sejt, az osztódó sejt ősállapotbeli sejt, az ősállapotban nem voltak karbonilok, mert nem volt oxigén, tehát nem volt vezetés, nem volt szín. Hogy megállapítsuk, hogy ezeknek a körülményeknek van e köze a rákhoz, össze kell hasonlítani egy rákos szövetet egy egészségessel, például egy májrákot egy májszövettel. Egy magyar kollégám, Wéber professzor Indiannapolisból ajándékozott nekem egy gyönyörű ráktörzset, parenchymás májrákos patkány. Ezt összezúztam, kimostam belőle a vért, feloldottam egy kis lauryl-szulfáttal. Az eredményül kapott vizes oldat jóval világosabb volt, mint az egészséges szövetből készült oldat. Ha a színt valóban a karboniolok csinálják, akkor karbonil hozzáadása után a rákos oldatnak is színessé kell válnia ! Ez valóban bekövetkezik. A megszínesedett szuszpenzió már „nem rákos", csak rá kell nézni, és látja az ember, hogy „meggyógyult".

Nagyon egyszerű az egész. Olyan szépen egyeznek a dolgok, hogy azt hiszem, a tévedés kizárt. Kiderült, hogy a rák egyszerű dolog: nincs benne dikarbonil, nem tud színesedni. Hozzátesszük a dikarbonilt — színes lesz, nem tud osztódni tovább.

Most mi a teendő? Mivel a folyamatnak lehet különböző dikarbonilja, ezeket kell izolálni és aztán szintetizálni. Akkor azután az ember reggel beletesz a kávéjába ebből, és akkor nem kap rákot. Különben minden nőnek elég nagy kilátása van az emlőrákra — férfiaknak is megvan a maguk áldása a prostatával —, egyenlőre azonban ezekkel még nem tudunk dolgozni, mivel az izolálás nagyon nehéz feladat, a kromatográfiás rendszerek még nem elég specifikusak. A legutóbbi időkben kidolgozott több ezer atmoszférás nyomású kromatográfiás eljárások azonban nagymértékben megkönnyítik az izolációt. Nekünk is van egy ilyen berendezésünk, így teljes gőzzel dolgozunk a speciális dikarbonilok izolálásán.

Addig is az ember szeretne valamit csinálni ezzel a problémával. Levesz például a polcról egy egyszerű dikarbonilt, mint a metilglioxál, és megnézi, csinál-e valamit Mint kiderült, ez gátolja a rák fejlődését. Az állatok ivóvizébe téve nagyrészt meg is előzheti a kifejlődést. Úgy tűnik, a legnagyob optimizmusra van okunk. Persze itt még nagyon sok munkát kell végezni az említett specifikusságok miatt.

IV.

Nagyon leegyszerűsítve azt mondtuk, hogy a biológiai reakció rendkívül érzékeny finomsága dikarbonilokkal, telítetlen aldehidekkel magyarázható. Ha az eddig elmondottak igazak, akkor egészen biztos, hogy az agynak egy különleges dikarbonilja kell, hogy legyen, hiszen az agy talán a legérzékenyebb struktúrája a szervezetnek. Ha az ember az agyműködést nézi és egy computerrel hasonlítja össze, akkor azt várjuk, hogy az agynak egy igen bonyolult vezetékhálózattal kell rendelkeznie. Valóban, ha az ember megnéz egy agysejtet, akkor egy bonyolult fibrium hálózatot lát. A mi felfogásunk szerint ezt a hálózatot már nem mole-

kulák alkotják, hanem a proteinek és specifikus karbonilek töltésátvitellel kialakult komplexei, vagyis szabad gyökök. Eddig senki sem mert szabad gyökre gondolni, mert azt mondták, hogy ezek nagyon érzékenyek. Hamar felvesznek elektront ott is, ahol nem kellene. Azonban a proteinek és kabonilek ilyen komplexe már együttesen elektromosan semleges, tehát össze-vissza nem vesz fel töltéseket. Ha ez mind igaz, amiről beszélek, akkor ezekből vezetéket lehet csinálni, amik vezethetik az ingerületet. Eddig ez a kérdés szóba sem jöhetett, mivel a proteineket nem tekintették vezetőknek. Egy specifikus karbonil a proteinnel elkészítheti ezt a vezetékhálózatot. A keresett vegyületet meg is találtuk. Ha ezt magára hagyjuk, akkor igen finom hálózatban kristályosodik. Az ember szinte látja, hogy ezek a szálak hozzáfekszenek a fibriumokhoz, azokból vezető drótot csinálva. Ez megmagyarázhatja az agy működését. Így út nyílhat az agy funkciójának igazi megvizsgálására. Nem biztos, hogy ez valóban ilyen egyszerű. Lehetséges, hogy ezek a társulások a tanulás folyamata alatt alakulnak ki.

Tetszik látni, hogy milyen borzasztóan bonyolult és elvont kérdéseket lehet megközelíteni azzal, hogy az ember nagyon szerény és egyszerűen megpróbálja az életet megérteni. Eddig teljes csődöt mondott a rákkutatás, mert mindenki a rákot próbálta megoldani, a rákot próbálta meggyógyítani. Ez nem ment. A megközelítés egyetlen módja: lefúrni mélyre, a természet alapjához. Ha megértettük, hogy ott hogyan függnek össze a dolgok, akkor feljöhetünk, és akkor a rák már egyszerűbbnek látszik; lehetőség nyílik a gyógyításra és a megértésre.

A tudás és a megértés vágya elvihet oda, ahová a sikervágy sohasem tudna elvezetni. A kierőszakolt rövidzárlat a tudományban csak a bukás felé vezethet. A megismerés felé mindig csak fúrni, fúrni, fúrni kell, méghozzá nagy türelemmel és odaadással, és akkor az embert elérheti a megértés sugara, ami a tudós munkájának egyetlen igazi jutalma. Azt sem pénzzel, sem diplomával, sem köszönettel, sem semmivel nem lehet megfizetni, az önmagát fizeti meg. A jól végzett munka egy olyan felemelő érzés — különösen az alkotó munka —, hogy azzal az ember bőven meg van fizetve.

Köszönöm a kedves érdeklődést, türelmüket, a nagy szeretetet, ami az eső dacára idehozta magukat. Mégegyszer ismétlem, amit az elején mondtam: ha szimpátiával követik az én utamat, ez a szimpátia nem egyoldalú. Én mindig ugyanazzal a szeretettel figyelem az egész magyar ifjúságot, mint amikor itt a Trefort-szobor mögött együtt labdáztunk.

A NEUTRON ELEKTROMOS ÉS MÁGNESES DIPÓLMOMENTUMA

Norman F. Ramsey
Harward University, Cambridge, Massachusetts

I. Bevezetés

Purcell és Ramsey [1] hívta fel a figyelmet 1950-ben arra, hogy azokat a tisztán elméleti jellegű paritásérveket, amelyek kizárják a részecskék és a magok elektromos dipólmomentumának létezését, kísérleti úton kellene igazolni. Ebből a célból Smith, Purcell és Ramsey [2] egy mágneses rezonancia berendezést alkalmazott a neutron elektromos dipólmomentumának észlelésére, és arra a következtetésre jutott, hogy e momentum és a proton töltésének hányadosa μ_e/e kísérletileg kisebb, mint 5×10^{-20} cm. Később, Lee és Yang [3], valamint Wu és mások [4] munkájából világossá vált, hogy a paritásmegmaradás feltételezése nem tartható, de Landau [5] és mások megmutatták, hogy az elektromos dipólmomentumot kizáró paritásos meggondolások a T-invarianción alapuló meggondolásokkal helyettesíthetők. Ramsey [6] ekkor annak a meggyőződésének adott hangot, hogy az időtükrözési invarencia éppúgy csak feltételezés, mint korábban a paritásmegmaradás volt, és azt kísérletileg kell igazolni. 1964-ben Christenson, Cronin, Fitch és Turlay [7] felfedezte a K_L^0 két töltött pionra történő CP-sértő bomlását, amely határozottan a T-invariancia sérülését sugallta.

Azóta elméleti jóslatok egész sora [8] látott napvilágot a nukleon elektromos dipólmomentumával kapcsolatban azoknak az elméleteknek az alapján, amelyek a K_L^0 bomlás magyarázatára születtek. Bár a különböző jóslatok meglehetősen tág értékhatárok között mozognak, a legtöbb 10^{-22} cm vagy annál nagyobb μ_e/e értékre vezet; még olyan elmélet is van, amely 10^{-19} cm értéket jósol. Mivel a feltételezett értékek nagy része kísérletileg ellenőrizhető, különböző kísérletek kezdődtek a neutron dipólmomentumának mérésére (Baird, Dress, Miller, Ramsey [9], [10], [13], [14]; Nathan és Shull [15], Cohen, Lipworth, Silsbee és Ramsey [12], Smith és Pendlebury [15], Apostolescu, Ionescu, Ionescu—Bujor, Meiters és Petroscu [16]). A különböző kísérletekből adódó határokat az 1. ábrán láthatjuk. A legnagyobb érzékenységet Dress, Miller, Ramsey és Baird kísérletei [9], [10], [13], [14], [15] érték el; utoljára publikált kísérletük [13] minden, eddig leírt kísérlet közül a legérzékenyebb. Ez a kísérlet egy 80 m/s-os neutronnyaláb mágneses rezonanciájának tanulmányozásán alapult és 10^{-23} cm-es felső határt adott a μ_e/e értékére. Ennek az Oak Ridge-i kísérletnek a végére világossá vált, hogy 100 m/s körüli neutronokra a mérési pontosság további

Előadás a Neutrinó'75 konferencián, Balatonfüred, 1975 június 14. Fordította Pintér György

Neutron EDM kísérleti eredmények

D értéke (cm)	Laboratórium (év)	Irodalom
$< 5 \times 10^{-20}$	ORNL (1951, 1957)	2
$(-2 \pm 3) \times 10^{-22}$	ORNL (1967)	9
$< 3 \times 10^{-22}$	ORNL (1968)	14
$(+2.4 \pm 3.9) \times 10^{-22}$	MIT-BNL (1967)	11
$< 1 \times 10^{-24}$	BNL (1969)	12
$< 1 \times 10^{-24}$	ALDERMASTON (1968)	15
$< 5 \times 10^{-23}$	ORNL (1969-1972)	10
$02 \pm 3.9 \times 10^{-22}$	ROMÁNIA (1970)	16
$< 1 \times 10^{-23}$	ORNL (1973)	13

1. ábra A neutron elektromos dipólmomentumára vonatkozó kísérleti eredmények.

növelése nagy fluxust követelne meg. Ezért a berendezést Grenoble-ba szállították, hogy felhasználják a Laue-Langevin Intézet (ILL) reaktorának ultrahideg neutronok előállítására szolgáló kriogén moderátorát.

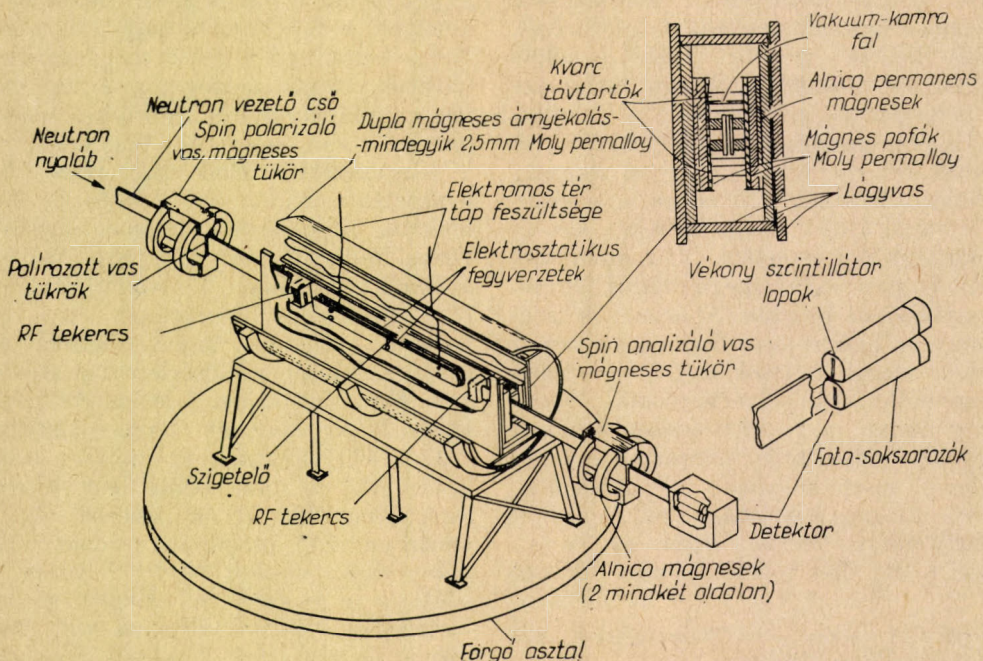
A korábbi berendezés tehát — bizonyos lényeges módosításokkal — ezután Grenoble-ban működött, és a neutron elektromos dipólmomentumára minden eddiginél alacsonyabb értéket adott. A kísérletet W. B. Dress-szel és P. D. Müllerrel (Oak Ridge National Laboratory, USA), Paul Perrinnel (CENG, Grenoble) és Michael Pendleburyvel (Sussex University, Anglia) együttműködve végeztük el.

II. A módszer és a berendezés

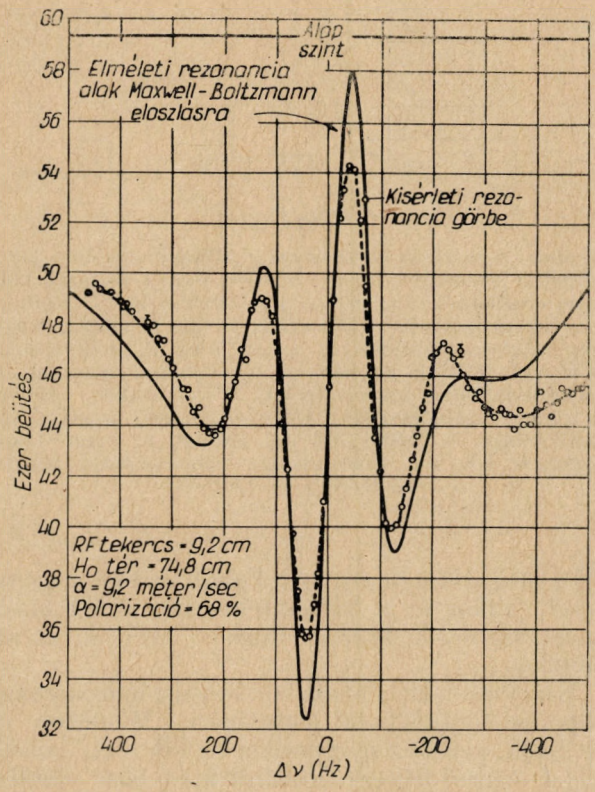
A kísérletben használt berendezés célja az, hogy nagy pontossággal mérni lehessen a neutronspin precessziós frekvenciáját gyenge mágneses térben. A frekvenciamérés a mágneses rezonancia elvére épül (hasonló berendezéseket használnak a neutron mágneses momentumának mérésénél). A **H** mágneses térrel párhuzamosan, illetve ellentétes irányban erős elektrosztatikus teret létesítünk. Ha a neutronnak van elektromos dipólmomentuma, akkor az elektrosztatikus térben egy extra forgatónyomaték lép fel, és emiatt az elektrosztatikus és a mágneses tér relatív irányítottságától függően, az eredő precessziós frekvencia nagyobb, illetve kisebb lesz. A precessziós frekvencia e változásának kísérleti határait megmérve megkapjuk a neutron elektromos dipólmomentumának felső határát. A kísérlettel szembeni két fő követelmény: nagyon nagy érzékenység elérése, és olyan hamis effektusok kizárása, amelyek vagy egy látszólagos dipólmomentumra vezetnek, vagy elfednek egy valóban létező nyomatékot.

A mérőberendezés sematikus vázlata a 2. ábrán látható. A neutronnyaláb az ILL reaktor mélyhűtött lassítójából (kriogén moderátor) lép ki. A neutronokat innen egy téglalap keresztmetszetű cső vezeti a berendezésbe. A neutron vezető cső fala teljesen visszaveri a 2°-nál kisebb szög alatt érkező neutronokat. A teljes visszaverődés csak elég lassú neutronok esetében következik be. A neutron vezető cső alkalmazásával a nyaláb intenzitása jóval kevésbé csökken, mint e cső nélkül, amikor a moderátortól mért távolság négyzetének reciprokával csökken az intenzitás. Erre az intenzitás nyereségre igen nagy szükség van, mert így részben kompenzálni lehet azt a veszteséget, amely az igen lassú neutronok kiválasztásakor lép fel.

Amint a 2. ábra is mutatja, a neutronnyaláb keresztülhalad a csőnek egy olyan szakaszán, ahol a cső fala mágnesezett vasból van. Ezen a részen, a fal által létesített mágneses indukció tere és a neutronok spinje között pozitív vagy negatív mágneses kölcsönhatás lép fel a neutronspin állásától függően. A neutronoknak a fal anyagán való koherens előreszóródása és a pozitív vagy negatív mágneses kölcsönhatás kombinációja ered-



2. ábra A mágneses rezonancia spektrométer kísérleti elrendezése.



3. ábra. Tipikus mágneses rezonancia $\pi/2$ fázis különbséggel a két oszcillátortér között. Az 1 K hőmérséklettel jellemzett Maxwell-Boltzmann eloszlásra kiszámított átmeneti valószínűséget a folytonos görbe ábrázolja. A kísérleti és az elméleti görbe közti eltérést az okozza, hogy a nyaláb sebesség-eloszlása eltér a Maxwell-Boltzmann elosztástól.

ményezi azt, hogy az egyik fajta spin állású neutronok teljesen visszaverődnek a falról, míg az ellenkező spin irányú neutronok nem verődnek vissza a csőnek erről a részéről, tehát áthatolnak a cső falán és elvesznek. Ezért ezután a spin polarizáló mágneses tükör után a neutronok erősen polarizáltak. Egy második spin analizáló mágneses tükör is van a berendezésben, melynek az a célja, hogy meghatározza, vajon van-e neutronspin irányváltozás a polarizátor és az analizátor közt? Ha a neutronspin nem változik e két tükör között, akkor az analizáló tükör a neutronok többségét átengedi. Ha viszont a neutronok spinje ellenkező irányra változik a két tükör között, akkor ezek a neutronok csak kis részben verődnek vissza az analizáló tükrön, következésképpen a kimenő neutron intenzitás csökkenni fog. Ezért, ha a két nagy frekvenciás mágnestekercs fáziskülönbsége nulla, a detektált kimenő nyaláb intenzitása akkor lesz minimális, ha a nagyfrekvenciás tér és a neutron precesszió frekvenciája megegyezik. Egy másik, a szerző [17] által javasolt sokkal érzékenyebb módszer a precessziós frekvencia meghatározására a következő: a két elkülönített tekercs között 90 fokos fáziskülönbséget létesítünk. Ekkor a rezonancia görbe alakja olyan lesz mint a diszperziós görbéé, és a diszperziós görbe legmeredekebb része éppen a spin precessziós frekvenciánál lesz, ahogy ez a 3. ábrán is látszik. Ha az oszcillátor frekvenciáját úgy állítjuk be, hogy a detektált intenzitás éppen a legnagyobb meredekséghez tartozó pontban legyen, akkor az elektromos dipólmomentumot úgy mutathatjuk ki, hogy változtatgatjuk az erős elektrosztatikus tér irányát. Ha van elektromos dipólmomentum, akkor a hozzátartozó forgatónyomaték az elektromos tér egyik irányánál növeli, az ellentétes iránynál csökkenti a neutron precessziós frekvenciáját. Rögzített oszcillátor-frekvencia mellett a neutronspin precessziós frekvenciájának ez a változása a neutronnyaláb intenzitás változásaként nagy pontossággal mérhetővé válik.

A nyaláb mentén 196 cm hosszan létesített elektromos térerősség kb. 100 kV/cm. A sztatikus mágneses térerősség 17 G; a neutron nyaláb 89%-ban polarizált.

A kísérletben nagy gondot kell fordítani a hamis jelenségek elhárítására, mert ezek esetleg egy nem létező elektromos dipólust utánoznak vagy éppen ellenkezőleg egy létezőt eltakarnak; szerencsére van rá lehetőség, hogy elhárítsuk vagy legalábbis minimalizáljuk ezen hamis jelenségek hatását. A két oszcilláló tér relatív fázisát $+90$ fokról -90 fokra lehet változtatni, melynek következtében a rezonancia görbe lejtése a rezonanciapont környezetében megfordul, és ugyanakkor ellenkezőjére fordul az elektrosztatikus tér irányváltoztatása következtében fellépő neutron intenzitásváltozás iránya is. Ez a megfordulási jelenség, amely az elektromos dipólmomentum következménye, sok hamis jelenség hatását küszöböli ki. A kísérlet során másodpercenként egyszer fordítottuk meg a fázist. Szerencsére a lehetséges hamis jelenségek nagy része a paritásmegmaradás és az időtükrözési invariancia miatt kiesik. Így például egy ilyen hamis effektus lehetne az, hogy az elektrosztatikus tér igyekszik a mágnespofákat összébbhúzni, ezért megváltoztatja a mágneses teret és ezzel a precessziós frekvenciát. Csakhogy ez a jelenség, és még sok más, az $\mathbf{E}^2$ függvénye, következésképpen nem lesz hatása, ha a fordított elektromos térnél kapott értékeket levonjuk. Ilyen $\mathbf{E}^2$ függő jelenség létezésének kimutatására értékes információkat nyerhetünk zérus elektromos tér mellett. Hasonlóképpen az elektromos tér irányát változtató kapcsoló mágneses hatásainak kompenzálása céljából a feszültségforráshoz futó vezetékeket bizonyos időközönként felcseréltük. Az ilyen kontroll-mérések fontosságát illusztrálja az a tény, hogy néhány hónapig egy kis hatás volt észlelhető az irányváltó kapcsoló átkapcsolásánál még akkor is, amikor nem volt rajta feszültség. Ezt úgy küszöböltük ki, hogy az irányváltó kapcsolókat még messzebbre helyeztük el a berendezéstől, és növeltük a mágneses árnyékolást. A jelen nagy érzékenységű kísérlet során egy jelentős hamis jelenségforrást figyeltünk meg. Valahányszor szikra ütött át az elektromos fegyverzetek között, a szikra árama egy kis mágneses teret hozott létre, amely egy kis maradandó mágneses tér változást okozott a permanens mágnes terében Ezt a vasanyag hiszterézise okozta. Még ha le is tiltottuk a

neutronszámlálást a szikra átütésekor, a permanens mágnes terének maradandó változása hamis eredményre vezetett. Mindazonáltal ez a baj leküzdhető, ha a szikrák jelenlétét regisztráljuk, és ha biztosítjuk azt, hogy minden egyes időszakaszban, amely két szikra átütés között eltelik, ugyanannyi mérés történjék ellentétes irányú elektromos térerősség mellett.

Az egyik legtöbb gondot okozó hamis jelenség amiatt lép fel, hogy a $\mathbf{v}$ sebességgel mozgó neutron az $\mathbf{E}$ elektrosztatikus térben egy $\mathbf{E}\times\mathbf{v}/c$ mágneses teret is „érez" (a Lorentz-transzformáció következtében). A neutron mágneses dipólmomentuma így kölcsönhatásba léphet ezzel az effektív mágneses térrel is, következésképpen a neutron precessziós frekvenciája megváltozik, méghozzá úgy, mintha az elektromos dipólmomentum okozta volna, mivel előjele megfordul $\mathbf{E}$ megfordulásával. Ez a hatás drasztikusan csökken, ha $\mathbf{E}$ párhuzamos $\mathbf{H}$-val. Ha a két tér pontosan párhuzamos lenne, akkor ezt a hatást ki lehetne küszöbölni, mivel ebben az esetben a kezdeti mágneses tér és a látszólagos mágneses tér egymásra merőleges lenne, és ezért ez a hamis effektus $\mathbf{E}^2$ függvénye lenne ($\mathbf{E}$ függés helyett). Azonban a ferromágneses anyagok és az árnyékoló mágnesek maradék mágnesezettsége miatt $\mathbf{E}$ és $\mathbf{H}$ gyakorlatilag nem tehető pontosan párhuzamossá és így $\mathbf{E}$-nek $\mathbf{H}$-ra merőleges komponense, az $\mathbf{E}\times\mathbf{v}/c$ látszólagos mágneses tér fellépte miatt, egy látszólagos elektromos dipólmomentumot hoz létre. Mivel e jelenség hatása arányos a neutron sebességével, a neutron sebességének változtatásával a jelenség észlelhető. Következésképpen a kísérleti adatokat egy valódi elektromos dipólus és egy látszólagos — a neutron sebességétől függő — elektromos dipólus jelenlétének figyelembevételével dolgoztuk fel. A neutron sebessége két módon változtatható.

Az egyik lehetőség a tükrökön való visszaverődés szögének változtatása.

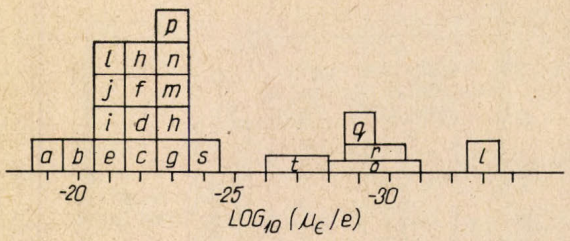
A méréseket elvégeztük úgy is, hogy a neutronok a mérőberendezésbe az ellenkező irányból jöttek be. Ezért a neutron rezonancia berendezés egy forgó asztalra lett erősítve (2. ábra), így az asztalt 180°-al elforgatva a neutronok az ellenkező irányból lépnek be a berendezésbe. Mivel ezt az $\mathbf{E}\times\mathbf{v}/c$ hatást ugyanolyan pontossággal kell mérni, mint a neutron elektromos dipolmomentumát magát, ezért a kísérleti idő tetemesen megnövekszik a különböző neutron sebességeknél való mérés időigénye miatt.

III. Eredmények

A Laue-Langevin Intézetben végzett mérések jelen fázisának eredménye a következő:

$$\mu_e/e = (0{,}4 \pm 1{,}1) \times 10^{-24} \text{ cm}.$$

Más szóval a neutron elektromos dipólnyomatéka — ha egyáltalán létezik — kisebb, mint 3×10^{-24} cm. Hangsúlyoznom kell, hogy a kapott eredmény 10^{-24} cm és nem cm^2, ez 10^{-48} cm^2-nek



4. ábra. A neutron elektromos dipólmomentumára adott elméleti jóslatok. Minden betűvel jelzett négyzet másmás elméletnek felel meg, ugyanezek a betűk szerepelnek az irodalomban [18]—[32] is. Az elméletek lényegét szögletes zárójelekben adjuk meg az irodalomban: EM-mel jelöljük azokat az elméleteket, amelyek az elektromágneses kölcsönhatást, W-vel azokat, amelyek a gyenge kölcsönhatást, MW-vel azokat, amelyek egy milligyenge és végül SW-vel azokat az elméleteket, amelyek egy új, szupergyenge kölcsönhatást tesznek felelőssé a T-sértésért.

felel meg. Ha a neutront a Föld méretére nagyítanánk, akkor ez a kis aszimmetria 0.001 cm-es magasságnövekedésnek felelne meg az északi féltekén.

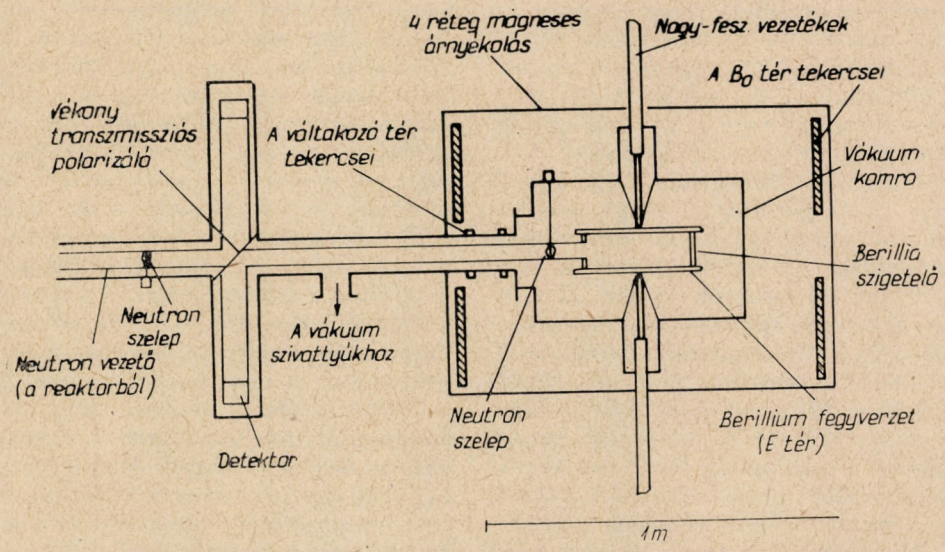
Számos elméleti jóslás van a neutron elektromos dipólmomentumának nagyságára. Mindazon elméletek, amelyek magyarázni tudják a K_L^0 bomlás [7] CP-sértő jellegét, nullától különböző elektromos dipólmomentumot jósolnak. Ezen elméletek [18]—[32] jóslatai a 4. ábrán láthatók. Minden megbetűzött négyzet egy-egy elméleti jóslatnak felel meg. A jelenlegi kísérleti határ iránti érdeklődés egyik oka abban van, hogy rendkívüli nehézségeket jelent számos elméleti jóslat számára és jelentős nehézséget okoz minden elméletben, azokat kivéve, amelyek a T-aszimmetrikus kölcsönhatásért egy új szuper gyenge erőt tesznek felelőssé.

IV. Neutron elektromos dipólmomentumának mérése palackozott ultrahideg neutronokkal

Az eddig leírt neutron elektromos dipólmomentum kísérletek azon a tényen alapultak, hogy 80 m/s sebességű neutronokat sok anyag teljesen visszaver, ha a neutronok majdnem érintőlegesen (5 fok) érkeznek az anyagra. A neutronsebesség csökkenésével a teljes visszaverődés határszöge nő, míg végül 6 m/s sebességnél már a merőlegesen beeső neutronok is teljesen visszaverődnek. Ilyen körülmények közt elvileg lehetséges egy zárt palackban neutronokat tárolni.

Évek óta törekszünk ilyen kísérlet [33], [34], [35] elvégzésére. Neutronokkal végzett ilyen kísérletben fel lehetne használni a tárolt atomokra kidolgozott [3], [34] oszcilláló tér technika számos előnyös tulajdonságát, beleértve a hidrogén maser nyújtotta lehetőségeket. A közelmúltig azonban nem volt lehetőségünk arra, hogy ultrahideg neutronokkal kísérletezzünk.

Zeldovics [36], Vlagyimirszkij [37], [38] és a néhai Dr. F. L. Sapiro ultrahideg neutronokat



5. ábra. „Palackozott" neutronokkal végzett neutron mágneses rezonancia kísérlet az elektromos dipólmomentum meghatározására. A berendezés sematikus rajza.

vizsgáltak. Sapiro és munkatársai [39] megmutatták, hogy ultrahideg neutronokat akár 20 másodpercig is lehet tárolni megfelelő palackokban. Steyerl [40], Ageron [41], Lobasov [42], Taran [43], [44], Pendlebury, Gollub és Smith [45], [46], Miller, Dress és Ramsey [46], [47] és még mások tovább fejlesztették az ultrahideg neutronok és tároló palackok technikáját. Ramsey, Miller és Dress [33], [35], [46], [47], Taran [43], [44], Pendlebury, Smith és Gollub [45], [46], speciális, a palackozott hideg neutronokat felhasználó kísérleti lehetőségeket vizsgált a neutron elektromos dipólmomentumának mérésére. Egy kollaboráció, amelyben részt vesznek a sussexi egyetem, a Harvard Egyetem, az Oak Ridge National Laboratory, München, az oxfordi egyetem, ILL és CNG képviselői, kísérleti berendezést épít a neutron elektromos dipólmomentum felső hatásának mérésére hideg „palackozott" neutronok felhasználásával. A körülbelül 6 m/s sebességű ultrahideg neutronokat egy neutron vezető cső tereli az 5. ábrán látható berendezésbe. A neutronok egy 15 cm átmérőjű és 10 cm magas hengerben lesznek tárolva. E henger palástja berillium-oxid (szigetelő), az alap- és a fedőlap fém — feltehetően berillium — lesz. Az oszcilláló tér a bevezető és a kivezető csövekre lesz kapcsolva, így a rezonanciát a fentiekben már leírt oszcilláló tér technikával [33] lehet megfigyelni. A rezonancia megfigyelése, a jelenlegi neutron nyalábos kísérlethez hasonlóan, a rezonancia görbe legmeredekebb részének detektálásával lesz elvégezve. Az elektrosztatikus tér bekapcsolása okozta neutronnyaláb intenzitásváltozás méréséből megállapíthatjuk a neutron elektromos dipólus nyomatékának felső határát.

Ultrahideg neutronokat használva a kísérletben, két különlegesen kedvező körülmény lép fel. 18 másodperces neutron tárolási idő mellett a rezonancia görbe közelítőleg 800-szor keskenyebb mint a jelenlegi kísérletben, tehát az érzékenység ennek megfelelően növekszik. Továbbá, ahogy már fentebb említettük, a mérési idő nagy részét az $\mathbf{E} \times \mathbf{v}/c$ jelenség leválasztásához szükséges mérések elvégzésének szenteltük.

Mivel $\mathbf{v}$-nek csak az átlagértékét kell ismernünk, e jelenség hatása drasztikusan csökken, ha a neutron be- és kilépése a berendezésből ugyanazon a nyíláson keresztül történik, és eközben átlagosan 18 másodpercet tölt a berendezésben, ahelyett hogy (mint a jelenlegi kísérletben) 80 m/s sebességgel átszalad a berendezésen.

A nagyon kis $\mathbf{E} \times \mathbf{v}/c$ mágneses tér (a $|\mathbf{v}|$ kicsi) miatt sokkal kisebb sztatikus mágneses teret lehet használni. Ez viszont kisebb térstabilizálási problémát jelent. Noha ez az új kísérlet a fent említett előnyös tulajdonságokkal fog rendelkezni, el kell ismerni, hogy még mindig egy igen nehéz kísérlet lesz. A felső határt most már olyan alacsonyra szorítottuk le, hogy nagy gondot kell fordítani minden lehetséges szisztematikus hiba elkerülésére. Ámbár ezek némelyike automatikusan csökken „palackozott" neutronok használata miatt, azonban néhány komoly probéma megmarad. Például a kóbor mágneses terek okozta problémák (különösen akkor, ha ez az elektromos tér megfordításához társul) vagy az elektromos szikrák okozta mágneses tér változások éppen olyan nagy nehézségeket okoznak tárolt neutronokkal, mint a neutronnyalábbal. Ezek a problémák már eddig is sok nehézséget okoztak a neutron nyalábos kísérletben és még ijesztőbbek lesznek a tárolt neutronos kísérletben, amelyek célja a neutron elektromos dipólus momentum felső határának 100—1000-szeres csökkentése. A tervek szerint a berendezés kétféle üzemben fog dolgozni. Az egyikben, néhány másodpercen keresztül ultrahideg neutronokat bocsátunk be a berendezésbe. Ezeket azután itt tároljuk úgy, hogy kb. 30 másodpercre a neutron szelepet elzárjuk. A szelep nyitása után a neutronok kiszökhetnek és eközben másodszor

haladnak keresztül az oszcilláló téren. A második üzem-módban a neutronok folyamatosan lépnek be a neutron palackba, ott átlagosan 8 másodpercet töltve, folyamatosan lépnek ki. A két megfigyelési módszer pontossága nagyjából egyelő. A két eljárás kölcsönösen kiegészíti egymást.

30 kV/cm elektromos térerősség, sok rétegű mű-metál vagy moly-permalloy (nagy kezdeti permeabilitású ötvözetek) mágneses árnyékolást használva az elektromos dipólmomentum felső határára a 10^{-26} cm elérhetőnek látszik. A felső határ további csökkentése valószínűleg szupravezető mágneses árnyékolás használatát követeli meg. Ezen a megoldáson töprengünk már, de döntés a kísérlet következő fázisáról csak később lesz. Szupravezető árnyékolással és elegendő hosszú megfigyelési idővel a felső határ 10^{-27} cm-re való csökkentése elérhetőnek tűnik. Nagyobb palackátmérővel és a berendezés többi részének tökéletesítésével a 10^{-28} cm-es felső határt is el lehet majd végül érni.

V. Egyéb mágneses rezonanciakísérletek neutron nyalábbal

Mivel legalább még egy évnek kell eltelnie, míg az ultra-hideg neutronnyaláb az ILL-ben hozzáférhetővé válik és a palackozott neutron berendezés elkészül, és mivel az új berendezéstől elvárják a jelenlegi felső határ jelentős csökkentését, a jelenlegi kollaboráció azt tervezi, hogy úgy módosítja a meglevő berendezést, hogy a jövő évben fel lehessen használni azt a neutron mágneses dipólmomentumának az eddiginél sokkal pontosabb mérésére. Pillanatnyilag a neutron mágneses dipólmomentuma az, amely a legrosszabbul van megmérve a nukleonok és a leptonok közül. A negatív elektron, a pozitív müon, a proton mágneses dipólmomentuma 3×10^{-8}-nál kisebb relatív hibával ismert, ezzel szemben a neutron momentum relatív hibája ennél 1000-szer nagyobb, vagyis 3×10^{-5}. Bár a jelenlegi kísérleti berendezés tervezésekor csak a neutron elektromos dipólus momentumának mérése volt a cél, véletlenül az derült ki, hogy ez a berendezés megfelel a neutron mágneses nyomatékának a mérésére is. Bár a mágneses tér gyenge, és valószínűleg nem könnyen növelhető sokkal 800 gauss fölé, ezt a hátrányt bőségesen ellensúlyozza a nagy térköz, amely a mágneses pofák közt van, mert így nagyon pontosan lehet kalibrálni a mágneses teret a kisebb inhomogenitások miatt. Az eddigi legpontosabb kísérletben [48] a mérési pontosságot éppen a mágneses tér inhomogenitása következtében fellépő kalibrálási nehézségek korlátozták.

A mágneses momentum mérése lényegében a neutron elektromos dipólmomentum kísérlethez most használt berendezéssel fog történni. További permanens mágnesek beépítésével a mágneses teret 15-ről 800 oerstedre növeljük.

A mágneses tér kalibrációjára számos lehetőség van. Az egyik ilyen a proton NMR (*n*uclear *mag*netic *r*esonance) magnetométer, egy másik a rubidium magnetométer használata. Egy harmadik alternatíva az, hogy nagy sebességgel vizet szivattyúzunk egy erős mágneses térben levő tartályon keresztül, itt a protonok polarizálódnak, ezután a víz nagy sebességgel keresztülfolyik a neutron nyalábot vezető csövön, és rezonanciát mérünk osztott oszcilláló tér módszerrel [17]. Ebben az esetben a második oszcilláló tértartomány egy sor olyan tulajdonsággal rendelkezik, mintha a térfogat „szuper-sugárzó" (super radiant) molekulákkal volna töltve. A folyóvizes módszernek megvan az az előnye, hogy az átlagolás módja a protonokra és neutronokra nagyon hasonló, mivel mindkét esetben a neutron vezető határolja be az átlagolandó mágneses teret. Előreláthatólag mindhárom módszert fogjuk használni. A lehető legnagyobb gondot kell arra fordítani, hogy a mágneses tér a protonnal való kalibrációkor ugyanakkora legyen mint a neutronokkal való méréskor.

Úgy tűnik, hogy ezzel a technikával viszonylag könnyű lesz a neutron mágneses nyomaték mérési pontosságát legalább egy 100-as faktorral megjavítani.

Van még két másik érdekes neutronnyaláb kísérlet, amelyet nagyon szeretnénk elvégezni, mihelyt találunk rá időt, persze anélkül, hogy megzavarnánk fő célkitűzésünket, a neutron elektromos dipólmomentum kísérletet. Kísérleti szempontból a két kísérlet szorosan kapcsolódik egymáshoz, amennyiben mindkettőben az anyagon áthaladó neutron spinjének kis apritássértő átrendeződését kell mérnünk.

Kabir, Karl és Obryk [49] megmutatta, hogy, ha a neutron optikailag aktív közegben halad keresztül (amelynek összetevői a tértükrözéssel szemben nem szimmetrikusak, mint például a gyümölcscukor oldat), akkor a neutron polarizációjának transzerzális komponense a haladási irány körül fog precesszálni, mégpedig körülbelül 10^{-5} radiánnal fordul el a haladás minden centiméterében egy optikailag aktív közegben. Mivel egy 10^{-24} nagyságú elektromos dipólmomentum csupán $0{,}3 \times 10^{-5}$ radián elfordulást eredményez, berendezésünk érzékenysége elégséges kell, hogy legyen egy ilyen mérvű precesszió megfigyeléséhez. Ebben az esetben a berendezésen eszközölendő változtatások közé tartozik egy, a nyalábbal párhuzamos gyenge mágneses teret létesítő mágnes alkalmazása, a nyalábra merőleges gyenge mágneses teret szolgáltató mágnes helyett. A kísérlet viszonylag könnyű lenne, ha a méréssel szemben az érzékenység volna az egyedüli követelmény. Sajnos azonban a legnagyobb nehézség a neutron mágneses momentumának létéből következik, és abból, hogy meggyőzően ki kell mutatni: nem a behelyezett kölcsönható anyag okozta esetleges kis mágneses perturbációk okozzák a mért elfordulást. A probléma komolyságát mutatja, hogy egy 3×10^{-8} gauss erősségű mágneses tér 10^{-5} radiánnyi elfordulást eredményezne egy 100 m/s sebességű neutron esetében, amíg az áthaladna jelenlegi 1,9 m hosszúságú

berendezésünkön. Némi javulás várható attól, hogy a berendezés hosszát a lehető legrövidebbre csökkentjük. Komoly javulást akkor várhatunk, ha egyidejűleg két ellentétes irányban bocsájtunk át neutronnyalábot a berendezésen. A paritássértő effektus ugyanis a neutron sebességének irányától függ, míg a mágneses precesszió független a neutron sebesség irányától, így az ellentétes sebességű neutronokra egyidejűleg mért precesszió esetében a két jelenség megkülönböztethető.

A második, még alapvetően érdekes kísérlet a következő: keressük a neutron hasonló paritássértő előfordulását, ha a neutron nem optikailag aktív anyagon halad át. Michel [50] és Stodolsky [51] megmutatta, hogy $1{,}4\times10^{-6}$ radiános elfordulásnak kell fellépnie, ha hideg neutronok mondjuk 1 m bizmuton haladnak keresztül. Ez esetben a paritássértő precesszió oka nem a közeg optikai aktivitása, hanem a neutron paritás-sértő gyenge kölcsönhatása lenne. Rendkívül érdekes volna ily módon közvetlenül megfigyelni a neutron gyenge kölcsönhatását. A gyenge kölcsönhatás paritás-sértő jellege unikális módon megkülönböztethető a spinprecesszió segítségével az erős kölcsönhatásoktól, amelyek általában dominálnak, ha a neutron anyaggal hat kölcsön.

A felsorolt kísérleti lehetőségek először ugyan a neutronnyaláb mágneses rezonanciája kapcsán merültek fel, de elvégezhetők Mezei [52] érdekes neutronspin visszhang technikájával is. A fölösleges párhuzamos munkák elkerülése végett megvitattuk Mezeivel egy kooperáció lehetőségét e két utóbbi érdekes effektus kimutatására a neutronspin echo technika egy változatának segítségével. A fő probléma az, hogyan illesszük be ezeket a kísérleteket távlati terveinkbe, különös tekintettel arra, hogy a neutron elektromos dipólmomentumára kapott érték további csökkentésére irányuló kísérletek prioritást élveznek.

A NAGYENERGIÁJÚ FIZIKA ÚJ, KÜLÖNLEGES TULAJDONSÁGÚ RÉSZECSKÉI, A PSZION-CSALÁD

Kunszt Zoltán
ELTE Atomfizikai Tanszéke

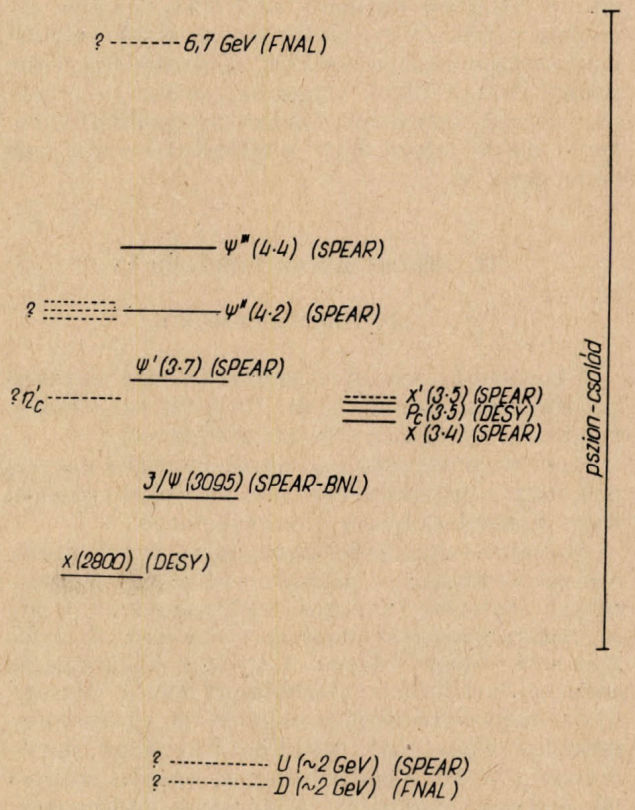
I. Bevezetés

1974 november 17-én nagyon sok napilap közölte az AP hírügynökség alábbi jelentését:

„STANFORD, CALIFORNIA (AP) — A Stanfordi Egyetem szombaton bejelentette egy újfajta részecske felfedezését, amelynek újszerű érthetetlennek tűnő tulajdonságai vannak. A bejelentés szerint két kutatócsoport, egyik a Stanfordi Lineáris Gyorsító Központban, a másik a Brookhaveni Nemzeti Laboratóriumban, New Yorkban, egymástól függetlenül jutott ugyanarra a felfedezésre. A felfedezést a két laboratóriumban egyidejűleg jelentették be... A tudósok szerint a felfedezés absztrakt. Nem tudják mit jelent tulajdonképpen..."

Így kezdődött az a napjainkban is folyó felfedezés sorozat, amely a részecskefizika egy új, ma még teljesen nyitott fejezetét indította útjára [1]. Jelenleg legalább 11 új részecske létezésére van bizonyíték, s az adatok sok további új részecske létezésére utalnak. Az elmúlt 15 hónap a részecske fizika egyik legizgalmasabb periódusa volt. E 15 hónapot megelőző 15 év kitartó munkájának gyümölcseit aratjuk napjainkban. Minden okunk megvan azonban, hogy azt gondoljuk, az előttünk álló 15 hónap legalább ilyen szenzációs lesz.

Az 1. ábrán látható vonalak mindegyike egy új részecskét jelöl. Az 1974 november 14-én elektron-pozitron annihilációban felfedezett részecske, a ψ részecske, tömege $\sim$ 3 GeV mintegy háromszorosa a protonénak, semleges, kvantumszámai megegyeznek a fotonéval. Élettartama azonban az eddig ismert nehéz részecskék élettartamánál mintegy ezerszer hosszabb. A ψ részecskét a stanfordiak nevezték el pszinek. A brookhaveniek a J elnevezést adták. Ma elég elterjedt már a J/ψ jelölés. 1974 november 27-én találták meg a stanfordiak a ψ' részecskét, amely hasonló a J/ψ-hez csak 600 MeV-vel nehezebb, kicsit rövidebb az élettartama és fő bomlási módusa az, hogy J/ψ-re



1. ábra. A pszion család eddig ismert részecskéi

Elhangzott az Eötvös Loránd Fizikai Társulat 1975. január 24. előadásán

és semleges részecskékre bomlik. 1975 januárjában találtak egy széles rezonanciát 4,1 GeV körül, amely a ψ'' elnevezést kapta. Nagy izgalmat jelentett júniusban, hogy megtalálták az elméletileg megjósolt úgynevezett P-állapotokat a P_c-t, a χ-t, a χ'-t és a J/ψ pszeudoskalár partnerét: az x (2800)-at. Ugyancsak júniusban röppent fel a hír: vannak olyan ú.n. anomális leptonos események ($\mu^{\pm}e^{\mp}$ párokat találtak), amelyek $\approx$ 2 GeV tömegű olyan részecske létezésére utalnak (U-részecske), amelyek újféle kvantumszámot kell, hogy hordozzanak; csak radióaktív bomlás révén tudnak bomlani, ezért nagyon hosszú életűek ($\approx 10^{-12}$ s). A nyár végére kiderült: 4,4 GeV-nél is van egy új részecske, amely tulajdonságaiban hasonlít a megszokott nehéz részecskékhez. Az ősz is meghozta a maga szenzációs híreit: a 4,1 GeV körüli csúcs legalább három keskeny rezonanciából áll, azaz további három részecskét találtak Stanfordban. De nemcsak Stanfordban találtak új részecskéket. A Fermi Nemzeti Gyorsító Laboratóriumban (FNAL, Chicago), a CERN-ben (Genf) és Szerpuhovban (Szovjetunió) az új részecskék utáni kutatás másik fontos módszere, a neutrinó-nukleon szórás vizsgálata folyik. Már 1974-ben találtak Chicagoban úgynevezett dimüonos eredményeket, amikor is neutrinó-nukleon szórásban a végállapotban két nagyenergiájú muon keletkezik, s e folyamat megmagyarázhatatlannak tűnik új részecskék fel tételezése nélkül. További szenzációt jelent, hogy az elmúlt két hónapban 12 olyan eseményt találtak, ugyancsak neutrinós kísérletekben, amelyek az elméletileg jósolt bájos D-mezonok létezésére utalnak. A legújabb hír ismét az FNAL-ből jött: új, nagyon nehéz, $\sim$ 6,7 GeV tömegű, a pszi részecskékhez hasonló tulajdonságú részecske létezésére vannak bizonyítékok a proton+proton $\rightarrow$ müonpár+egyéb folyamat tanulmányozásából. Mindenki biztos benne, hogy a felfedezéssorozat még nem zárult le...

II. Néhány fontos tudnivaló [2]

A) Kölcsönhatások

A tapasztalat szerint az anyagnak négy alapvető kölcsönhatási formája van. Gravitációs, elektromágneses, gyenge és erős kölcsönhatások.

Az elemi részecskék parányiak, tömegük nagyon pici, ezért a gravitációs erő közöttük olyan gyenge, hogy hatásuk teljesen elhanyagolható.

Az *elektromágneses* folyamatok nagyon fontosak a részecskefizikában, mert elméletük nagy pontossággal tisztázott (kvantum elektrodinamika), így az elektromágneses kölcsönhatások képezik a folyamatok ismert részét. A gyenge kölcsönhatás amely pl. a radioaktív β-bomlásért felelős, mintegy nyolc nagyságrenddel gyengébb az elektromágneses kölcsönhatásnál, rövid hatótávolságú, (hatótávolsága $\leqslant 10^{-15}$ cm) erőssége az energiát növelve nő. Alacsony energiájú tulajdonságai jól ismertek. Az erős kölcsönhatás ezerszer-tízezerszer erősebb az elektromágneses kölcsönhatásoknál. Az erős kölcsönhatás tartja össze a protonokat és a neutronokat az atommagban és felelős a nagy energiájú fizika sokrészecskés folyamataiért. Bár néhány tulajdonsága már ismert, alapvető tulajdonságait amelyeket a proton szerkezete határoz meg, még nem sikerült tisztázni. A kölcsönhatások főbb tulajdonságai az I. Táblázatban vannak összefoglalva.

Vannak olyan részecskék, az elektron és a müon (és antirészecskéik a pozitron és az antimüon), amelyeknek van töltésük, de erős kölcsönhatásban nem vesznek részt. Van ugyan gyenge kölcsönhatásuk is, de ez elhanyagolható az elektromágneses mellett.

Vannak erős kölcsönhatás nélküli semleges részecskék is, az elektronos neutrino, a müonos neutrinó és antirészecskéik, amelyek csak gyenge kölcsönhatásban vesznek részt. Az erős kölcsönhatással nem rendelkező részecskéket leptonoknak nevezzük. Az elektromágneses tér hordozója a foton, a gyenge kölcsönhatás közvetítőit még nem sikerült kísérletileg kimutatni.

Bizonyos körülmények között egyes kölcsönhatások nem tudnak érvényesülni. Pl. az atommagban az erős kölcsönhatások be vannak zárva, rövid hatótávolságuk miatt nem tudják kifejteni hatásukat. Ezért pl. atomfizikában az elektromágneses tulajdonságok játszák az elsőrendű szerepet.

A lepton-lepton kölcsönhatásokban az elektromágneses és gyenge erők az erős kölcsönhatások zavaró hatás nélkül tanulmányozhatók. Kiderült, hogy a jelenleg rendelkezésünkre álló óriási ütközési energiák ($\approx$ 100 GeV) mellett is a leptonok semmilyen struktúrát nem mutatnak.

Az erős kölcsönhatással is rendelkező részecskéket hadronoknak nevezzük. Úgy gondoljuk, hogy minden hadron rendelkezik mind a négy kölcsönhatási formával. Hadron-hadron ütközésekben az erős kölcsönhatás érvényesül, a gyenge és elektromágneses kölcsönhatások néhány kivételes helyzettől eltekintve teljesen elhanyagolhatók.

Lepton-hadron kölcsönhatásokban a nagyenergiájú pontszerű leptonok mélyen be tudnak hatolni a struktúrával rendelkező proton vagy neutron belsejébe, ugyanakkor a hadronok csak elektromágnesesen ($e^{\pm}$, $\mu^{\pm}$) vagy gyengén (ν_e, $\tilde{\nu}_e$, ν_μ, $\tilde{\nu}_\mu$) tudnak kölcsönhatni a leptonokkal. A kölcsönhatás eredményét a hadronok szerkezete határozza meg. Tehát a lepton-hadron kölcsönhatások a legközvetlenebbül szolgálnak információt a hadronok szerkezetéről.

Jelenleg több mint 300 hadron létezését sikerült kimutatni.* A hadronok spinjük szerint két nagy csoportba oszthatók. Az egész spinű részecskéket mezonoknak, a félegész spinű részecskéket barionoknak nevezzük. A hadronok tömegértékeit,

* A relativitáselmélet szerint a tömeg és az energia ekvivalensek. Ez mindennapi tapasztalat a részecskefizikai kísérletekben: a nagy mozgási energiával rendelkező elektron ütközési folyamatban lelassul, mozgási energiája részecsékben materializálódik.

I. Táblázat

A kölcsönhatások és néhány jellemzőjük

Kölcsönhatás	Hatótávolság	Relatív erősség	Továbbító	Milyen részecskékre hat	Karakterisztikus gyorsulási idők
Gravitációs	végtelen	10^{-37}	graviton	mindegyikre	—
Elektromágneses	végtelen	1	foton	minden töltöttre	$\approx 10^{-16}$ s
Gyenge	10^{-15} cm	10^{-8}	?	leptonok hadronok	10^{-8}—10^{-12} s
Erős	10^{-13} cm	1000	hadronok	hadronok	10^{-20}—10^{-22} s

kvantumszámait, bomlási módjait tanulmányozó tudományágat nevezzük hadronspektroszkópiának.

B) Kvantumszámok, kiválasztási szabályok

A hadronok jellemző kvantumszámai a spin (J; forgási szimmetria), paritás (P; tértükrözéssel szembeni viselkedés), izospin (I, I_3; a hadronok összetettségére utaló kvantumszám, a hadronok izospin multiplettekbe sorolhatók), ritkaság (S; szintén belső kvantumszám, a hadronok összetettségére utal), barionszám (B; a protonok stabilitását biztosító additív, egzaktul megmaradó belső kvantumszám) és töltésparitás (C; a részecske—antirészecske tükrözéssel szembeni invarianciával kapcsolatos).

Tekintettel a hadronok nagy számára, nagyon nagy a lehetséges szórási folyamatok és bomlásmódusok száma. A folyamatok ezen elképesztő gazdagságában a megmaradási törvények jelentenek korlátozást: nem sikerült még olyan folyamatot találni, amelyben az energia, az impulzus-momentum és a barionszám ne maradt volna meg. Erős kölcsönhatások által indukált gyors, nagy valószínűséggel végbemenő folyamatokban az izospinnek, paritásnak töltésparitásnak és ritkaságnak is meg kell maradnia. De nem marad meg az izospin az elektromágneses folyamatokban és nem marad meg a paritás, töltésparitás és a ritkaság a gyenge folyamatokban: azaz vannak pl. bomlások, amelyek nem egzaktul tiltottak, hanem lassan mennek végbe.

A kölcsönhatásoknak ez a tulajdonsága, hogy a gyengébb kölcsönhatások egyre kevesebb megmaradási törvényt tisztelnek, fundamentális fontosságú, ez teszi lehetővé, hogy nagyon gyenge erők hatásai is megfigyelhetővé váljanak. Illusztrációul szolgálnak az alábbi példák.

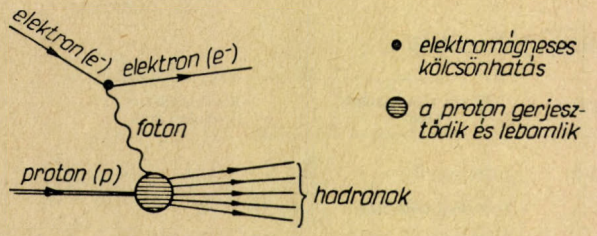
A K^+-mezonnak tömege 540 MeV, töltése $+1$, ritkasága $+1$. Mivel a K-meson a legkisebb, ritkasággal rendelkező részecske, csak gyenge kölcsönhatás révén bomolhat el, élettartama $\tau \approx 10^{-8}$ s. A ϱ^+ mezon tömege 760 MeV, ritkasága zérus, izospinje 1 és semmilyen megmaradás törvény nem tiltja meg, hogy π^+ és π° mezonokra bomoljon (melyek tömege $\sim$ 140 MeV, ritkaságuk zérus, izospinjük 1 stb.). Így a $\varrho^+ \to \pi^+ \pi^\circ$ bomlás erős bomlás, valóban a ϱ^+ mezon élettartama $\approx 10^{-22}$ s. A π^+, π°, π^- mezonok (pionok) a legkönnyebb hadronok. Tömegük 140 MeV, izospinjük 1. Ezért erős kölcsönhatással szemben stabilak. De a $\pi^\circ \to$ foton+foton bomlás elektromágnesesen végbemehet, valóban a π° élettartama $\sim 10^{-16}$ s. A π^- mezon elektromágneses bomlása tiltott, mert foton kisugárzásával nem mehet át elektronba vagy müonba (leptonszám megmaradás miatt). Így a π^--nak csak gyenge bomlásai lehetnek pl. $\pi^- \to \mu^- \tilde{\nu}_\mu$. Valóban élettartama hosszú $\sim 10^{-8}$ s stb.

C) Vizsgálati módszerek

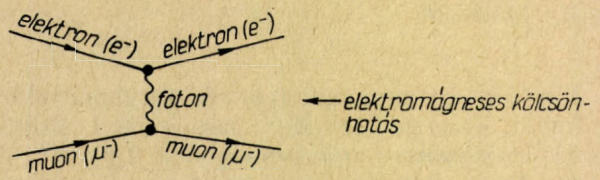
A részecskefizika célja a részecskék szerkezetének (ha van), összetevőinek, s egymás közötti kölcsönhatásainak jobb megértése. De részecskék vizsgálata nagyon nehéz, csak szórási folyamatokkal lehetséges. A proton átlagos sugara 10^{-12} cm. Ha a szerkezetét akarjuk tanulmányozni 10^{-13}—10^{-15} cm hullámhosszúságra van szükségünk. Ez a Heisenberg-féle határozatlansági reláció szerint 10—100 GeV impulzusnak felel meg. Tehát mindenképpen nagyon nagy energiára van szükségünk. De az energia önmagában nem elégséges: ismert részecskét kell szóratnunk az ismeretlenen. A mikroszkóp esetében a fény vagy elektronhullámok interferenciájának törvényszerűségét jól ismerjük, ezért tudunk a nyert elhajlási képből a vizsgált anyag szerkezetére következtetni. A részecskefizika ismert részecskéi a leptonok, emiatt alapvető vizsgálati módszer a lepton-hadron ütközések tanulmányozása (2. ábra). (A lepton-lepton szórás (3., 4. ábra) annak ellenőrzésére szolgál, hogy az egyre nagyobb energiatartományokban is érvényesek maradnak-e a kvantumelektrodinamika és a gyenge kölcsönhatás helyesnek vélt törvényei. A hadron-hadron (5. ábra) kölcsönhatások sok fontos információval szolgálnak az erős kölcsönhatások természetéről).

Ez a magyarázat arra miért éppen a lepton-hadron kölcsönhatások kísérleti vizsgálata fejlődött a legdinamikusabban az elmúlt 15 évben. Ide tartoznak az elektron-nukleon, müon-nukleon, neutrino-nukleon ütközések, az elektron és pozitron hadronokká történő átalakulása végül a proton+mag $\to$ lepton-pár + hadronok folyamat.

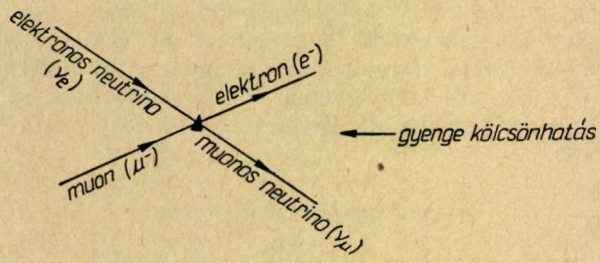
Mindössze hat olyan kutató centrum van a világon, ahol elegendő nagy gyorsító berendezés áll rendelkezésre a lepton-hadron kölcsönhatások vizs-



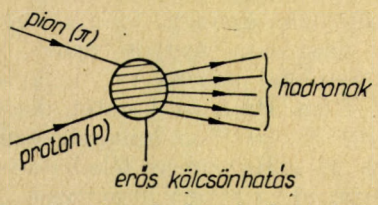
2. ábra. Rugalmatlan lepton-hadron kölcsönhatás



3. ábra. Elektron-muon szórás



4. ábra. —



5. ábra. Rugalmatlan hadron-hadron kölcsönhatás

gálatához. A II. Táblázatban összefoglaltuk a gyorsítókat érintő legfontosabb adatokat. Az ütközési folyamatokat kétféleképpen lehet véghez vinni. Vagy egy nyugvó céltárgyba lőjük a felgyorsított nyalábot, vagy két felgyorsított nyalábot ütköztetünk. Az első esetben az ütközési valószínűség, a második esetben (tárológyűrűs kísérletek) az ütközési energia a nagyobb. Mivel elektron ill. pozitron céltárgy nincs, az $e^+ - e^-$ ütközéseket csak tárológyűrűs kísérletekkel lehet tanulmányozni. A stanfordi kísérleti fizikusok tiszteletet parancsoló érdeme, hogy olyan nagy intenzitású elektron-pozitron nyalábokat tudnak előállítani a SPEAR berendezéssel, amely 10^{-33}—10^{-36} cm² hatáskeresztmetszetek mérését teszi lehetővé, ami már csak egy-két nagyságrenddel nagyobb a céltárgyat használó kísérletben mérhető hatáskeresztmetszeteknél.

D) Kvarkok

Az 1960-as évek elején a hadronok spektroszkópiai analíziséből Gell-Mann és Zweig arra a megállapításra jutottak, hogy a hadronos állapotok változatos tulajdonságai egyszerűen megmagyarázhatók, ha feltételezzük, hogy azok három alapvető összetevőből, kvarkokból állanak. A kvarkokra a legelterjedtebb az *u*, *d* és *s* jelölés. Az *u* és *d* kvarkok ritkasága zérus és izospin dublettet alkotnak (innen az elnevezés *up* kvark — *u* ($I = 1/2$, $I_3 = +1/2$) ill. down kvark — *d* ($I = 1/2$, $I_3 = -1/2$), az *s* kvark (strange kvark) ritkasága —1 és izospinje zérus. Ésszerűnek látszott azt is feltételezni, hogy spinjük 1/2, mivel a mezonokat kvark-antikvark, a barionokat kvark-kvark-kvark kötött állapotokként lehetett egyszerűen értelmezni. (Kvantumszámaik a III. Táblázatban vannak összefoglalva.) Azokat a hadronokat, amelyeket nem lehet $q\bar{q}$ vagy qqq állapotokként értelmezni egzotikusnak nevezzük. Ilyen állapotok létezésére mind a mai napig *nincs* egyértelmű kísérleti bizonyíték.

Sokan nem érezték elég meggyőzőnek a kvarkmodel spektroszkópiai bizonyítékait. Bár az adatok főbb vonásait jól magyarázza, részletkérdésekben néha teljesen rossz eredményekre vezet naiv alkalmazása. Alapvetően megváltozott a helyzet azon-

II. Táblázat

A hat legnagyobb részecskefizikai gyorsító típusai és jellemzői

Intézet	Gyorsító típusa	Gyorsított részecske energiája	Lepton nyaláb maximális energiája	Keletkező részecskék maximális tömege	Megfigyelhető hatáskeresztmetszetek maximális értéke
Szerpuhov (IHEP)	proton szinkrotron	76 GeV	30 GeV	12 GeV	10^{-36} cm²
Genf (CERN)	proton szinkrotron	28 GeV	12 GeV	6 GeV	10^{-40} cm²
	proton tárológyűrű	2×25 GeV	—	48 GeV	10^{-28} cm²
	szuper proton szinkrotron	400 GeV	200 GeV	20 GeV	10^{-40} cm²
Hamburg (DESY)	elektron-pozitron tárológyűrű (Doris)	2×3,0 GeV	2×3 GeV	6 GeV	10^{-34} cm²
New York (BNL)	proton bevatron	32 GeV	14 GeV	6 GeV	10^{-40} cm²
Chicago (FNAL)	proton szinkrotron	200—400 GeV	150 GeV	15 GeV	10^{-38} cm²
Stanford (SLAC, SPEAR)	lineáris elektrongyorsító	22 GeV	22 GeV	5 GeV	10^{-38} cm²
	elektron-pozitron tárológyűrű (SPEAR)	2×4 GeV	2×4 GeV	8 GeV	10^{-36} cm²

III. Táblázat

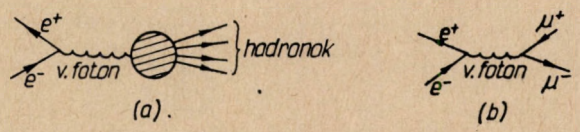
A kvarkok kvantumszámai

	u	d	s	$\bar{u}$	$\bar{d}$	$\bar{s}$
Q	2/3	−1/3	−1/3	−2/3	1/3	1/3
I	1/2	1/2	0	1/2	1/2	0
I_3	1/2	−1/2	0	−1/2	1/2	0
S	0	0	1	0	0	−1
B	1/3	1/3	1/3	−1/3	−1/3	−1/3

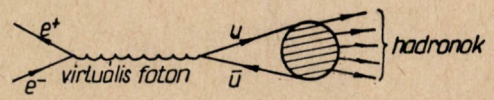
ban a hatvanas évek végére: Stanfordban a lineáris gyorsítóval végzett mélyen rugalmatlan elektron-nukleon ütközésekben nagy valószínűséggel találtak nagy szögű szórásokat. Ezen „elektron-mikroszkópos" felvételek tanúsága szerint a proton töltése pontszerű magocskákba van lokalizálva. A magocskák töltése, spinje, izospinje a mélyen rugalmatlan elektron-nukleon és neutrino-nukleon szórás együttes vizsgálatából meghatározható. Chicagoban 1974-re két csoport is megmérte a neutrino(antineutrino)-nukleon mélyen rugalmatlan szórást. Kiderült, hogy a pontszerű magocskák kvantumszámai megegyeznek a spektroszkópiai analízisből nyert kvarkok kvantumszámaival. Ezért ma már mindenki meg van győződve arról, hogy a kvarkok valóban benn ülnek a protonban. De hogy mik is a kvarkok tulajdonképpen, reálisan létező részecskék, vagy valamilyen még ismeretlen elmélet részecskeszerű, de nem okvetlenül reális részecskét jelentő megnyilvánulásai — nem tudjuk Ezt a problémakört kvarkbezárás néven emlegetik ma a részecskefizikusok és megértését az egyik legfontosabb elméleti kérdésnek tartják.

E) Elektron-pozitron szétsugárzás

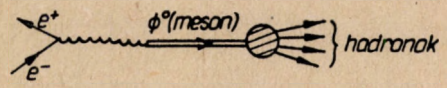
A részecskéket és antirészecskéket az különbözteti meg egymástól, hogy additív, töltésszerű kvantumszámaik nagyságban megegyeznek, de előjelük ellentétes. Többi jellemzőik (így tömeg spin, izospin stb.) pedig pontosan egyenlőek. Ezért egy részecske-antirészecske-rendszer töltése mindig zérus. Így pozitron-elektron ütközésekben nagy valószínűséggel az elektron és pozitron semleges anyagdarabbá olvad össze, majd rövid időn belül ismert részecskékké alakul át. A kvantumelektrodinamika szerint az elektron és pozitron kölcsönhatása csak foton közvetítésével történhet. Nagyon jó közelítéssel helyes a szétsugárzási folyamatról az az elképzelés, hogy az e^+ e^--rendszer tömeggel rendelkező ú.n. virtuális fotonná alakul át (így kvantumszámai megegyeznek a fotonéval, tehát $J^{pc} = 1^{--}$), majd ez a virtuális foton elbomlik olyan részecskékre, amelyeknek van elektromágneses kölcsönhatásuk, így hadronokra és töltött leptonokra (6. a. ábra). Amikor pl. a foton müon párrá alakul át, a folyamat hadronok részvétele nélkül történik, így hatáskeresztmetszetét a kvantumelektrodinamika szerint könnyen kiszámíthatjuk — a tapasztalattal egyezésben (6b. ábra). Az elektron-pozitron pár hadronokká való átalakulásának teljes hatáskeresztmetszete a kvarkmodel alapján, elméletileg egyszerűen interpretálható. Ha úgy gondoljuk, hogy a hadronokká történő átalakulás kvark-antikvark pár keletkezésével, majd annak az ismert hadronokká való átrendezéssel történik (7. ábra), akkor fennáll (mivel a kvarkok és müonok is feles spinüek) a



6. ábra. a) Elektron-pozitron hadronokká történő szétsugárzása
b) Elektron pozitron müon párra történő annihilációja



7. ábra. Az elektron-pozitron hadronokká történő annihilációjakor a kvark model szerint először egy kvark-antikvarkpár keletkezik, amely később hadronokká rendeződik át



8. ábra. Elektron-pozitron annihiláció $\sqrt{s} \approx$ M energia értéknél

$$\sigma(s;\ e^+e^- \to \text{hadronok}) = R\ \sigma\ (s;\ e^+e^- \to \mu^+\mu^-),$$

$$s = 4E^2_{\text{nyaláb}}$$

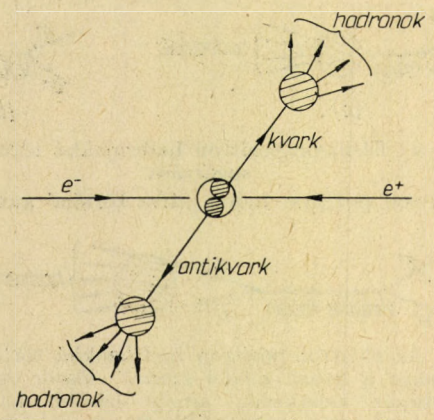
reláció, ahol R mindazon kvark-párok töltéseinek négyzetösszege, amelyek lényegesek az elérhető hadron végállapotok kialakításában Ha a hadronokká való átalakulás a Gell-Mann-Zweig-féle kvarkok segítségével történik:

$$R = \left(\frac{2}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 = \frac{2}{3}.$$

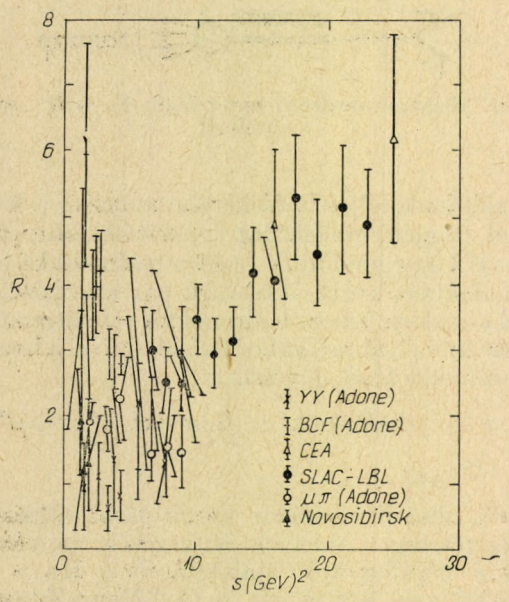
Ez a kép nem marad érvényes, ha a virtuális foton tömege megegyezik egy semleges vektor mezon tömegével. Ilyenkor a foton életének egy részét vektor-mezonként tölti el (8. ábra), az e^+e^- annihiláció hadronokká való átalakuásának fázistere beszűkül, valószínűsége megnő, a hatáskeresztmetszetben rezonancia csúcsot kell találnunk. Tehát a kvarkmodel jóslása az $R(s)$ arányra:

$$R(s) = \frac{\sigma(e^+e^- \to \text{hadronok})}{\sigma(e^+e^- \to \mu^+\mu^-)} + \text{rezonancia csúcsok.}$$

A kvarkmodell egy másik fontos következménye az ún. „jet-struktúra". Ha a hadronokká való szétsugárzás kvark-antikvark páron keresztül történik, a végállapotbeli hadronok egy adott tengely (a kvark-antikvark pár szétrepülési iránya) körül kell elhelyezkedniük. (9. ábra.) E kép kialakulásához elengendően nagy energia szükséges. Kísérleti bizonyításához a végállapotbeli hadronokat kell analizálni, ami nagy eseményszámot igényel.



9. ábra. JET-szerkezet $e^+e^- \rightarrow$ hadronok folyamatban.



10. ábra. $R(s)$ ismert értékei 1974 augusztusában

Nagy jelentőségű előrelépést jelent, hogy 1975 nyarán $\sqrt{s} = 7$ GeV körüli tartományban sikerült a jet szerkezetet kísérletileg kimutatni.

Az $R(s)$ arányt először néhány évvel ezelőtt az olasz elektron-pozitron tárológyűrű segítségével határozták meg. (Frascatiban van, Róma mellett.) A nyaláb maximális energiája 1,5 GeV volt így $\sqrt{s} = 2E = 3$ GeV-ig lehetett $R(s)$-t kimérni. 1972-ben a harvardi Cambridge Electron Gyorsítón (CEA) megmérték R értékét $\sqrt{s} = 4$ és 5 GeV-nél. Stanfordban 1973-ban kezdődtek el a mérések (jóval intenzívebb nyalábokkal). 1974 nyarára a 10. ábrán látható mérési pontok voltak ismertek. Az ábra nagy feltűnést keltett a fizikusok között, mert a SPEAR-rel nyert adatok megerősítették a CEA és a Frascati adatait, amely szerint $R(s) \neq 2/3$, hanem értéke 2 körül van, amely $\sqrt{s} = 4$ GeV körül 5–6-ra nő. Az, hogy R miért 2 és nem 2/3, nem okozott volna még túl nagy problémát, mivel spektroszkópiailag is voltak argumentumok arra, hogy a három kvark model talán túl naiv. A korrigált kvarkmodellekben a kvarkoknak még egy szabadsági fokot, szint (color) tulajdonítottak. Így beszélünk piros, sárga és kék kvarkokról. Összesen tehát kilenc kvarkunk van. A színnel asszociált kvantumszámot azért nem sikerül észrevenni ezen elképzelés szerint, mert minden hadron színtelen. A hozzáférhető energiatartományokban a szín-kvantumszám még nem gerjesztődik. Ebben az esetben $R = 3\frac{2}{3} = 2$ kell hogy legyen. De mi ad magyarázatot a $s = 4$ GeV körüli újabb növekedésre? Új kvantumszám gerjesztődik, azaz újfajta hadronok keletkeznek? Talán vannak nehéz leptonok s azok produkciója ad járulékot? Vagy a gyenge kölcsönhatás egyik hordozóját lehet $\sqrt{s} = 4$ körül produkálni? Mindenki világosan látta a kvark model jóslása és a kísérlet között határozott ellentmondás van.

1974 őszére sikerült a SPEAR nyalábjainak intenzitását tovább növelni, pontosabb mérésre nyílt lehetőség.

III. A pszionok

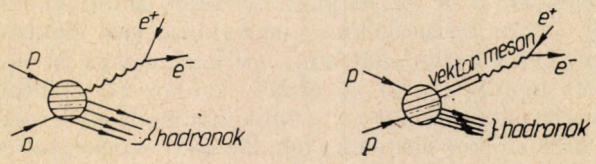
A) A két pszi részecske (3100) és (3700)

1974 nyarán, miközben Stanfordban a SPEAR továbbfejlesztésén dolgoztak New Yorkban, a brookhaveni 32 GeV-es bevatronnál S. C. Ting és csoportja egy nagy igényű mérés befejezéséhez közeledett. Egy nagyon nagy érzékenységű berendezéssel a

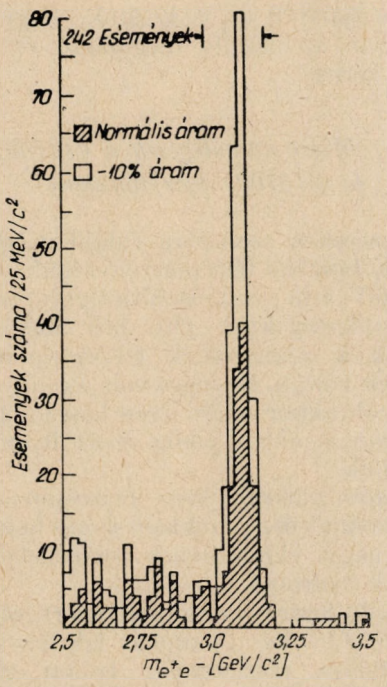
$$p+p \rightarrow e^+ + e^- + \text{hadronok}$$

reakciót tanulmányozták. A kvantumelektrodinamika szerint a folyamatot úgy képzelhetjük el, hogy a proton-proton ütközésben hadronok és egy virtuális foton keletkezik, majd a virtuális foton e^+e^- párrá alakul (11. ábra). Mivel a foton keletkezéséhez és e^+e^- párrá való átalakulásához elektromágneses kölcsönhatás kell, ezért ez másodrendű elektromágneses folyamat, melynek valószínűsége mintegy százezerszer kisebb az erős folyamatokénál.

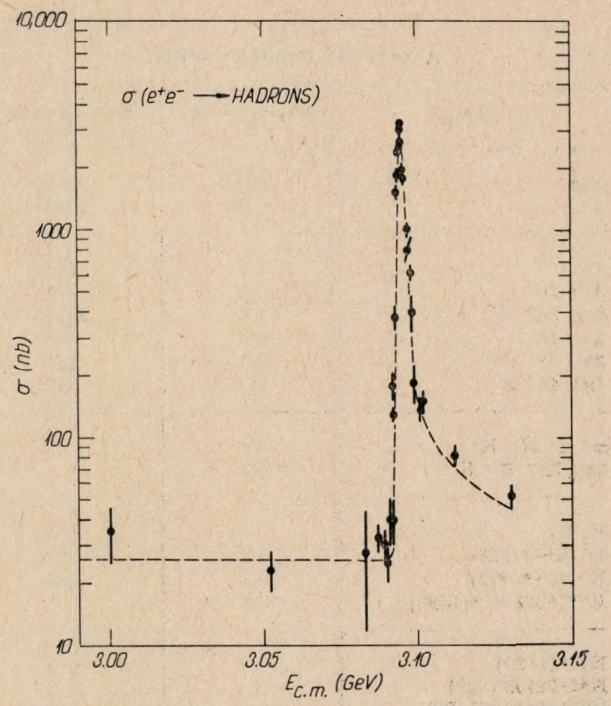
Olyan berendezést kellett konstruálniuk, amely nagyon nagy proton, pion és kaon fluxus mellett is érzékeny bír maradni az e^+e^- párokra és amely különbséget tud tenni a hadron bomlásokból származó e^+e^- párok és a folyamatban közvetlenül keletkező párok között. Berendezésük csúcsteljesítményt jelentett, mert kibírt 2×10^{12} proton/pulzus beeső proton fluxust, 10^8-szor erősebb h^+h^- hadron fluxus esetén is érzékeny tudott maradni



11. ábra. a) e^+e^- pár keltése rugalmatlan proton-proton szórásban
b) e^+e^- pár keltése vektor-mezon képződésen keresztül



12. ábra. A BNL-MIT csoport mérési eredménye, a $p + p \to e^+e^- +$ hadronok folyamatban keletkezett e^+e^- pár tömegspektrumára



13. ábra. A SPEAR-en kapott $\psi(3095)$ rezonancia csúcs a $\sigma(e^+e^- \to$ hadronok) hatáskeresztmetszetben

az e^+e^- párokra, a végállapotbeli e^+e^- pár energiáját ± 5 MeV pontossággal meg tudta határozni 2 GeV-es tartományt lefedve. A kísérlet szenzációs eredménnyel járt.

A végállapotbeli elektron-pozitron pár tömegspektrumában 3.1 GeV/c körül nagyon éles rezonancia csúcsot találtak. (12. ábra.) Az effektust először augusztusban figyelték meg. Novemberig a különböző ellenőrző kísérleteket hajtották végre. Mind pozitív eredményt adott: az effektus valódi — hosszú élettartamu új részecske van 3.1 GeV-nél.

A SPEAR különösképpen alkalmas az e^+e^- csatornában előállítható részecskék tanulmányozására. De ha nem ismert a részecske tömege, szélessége pedig nagyon keskeny, pici lépésekben szabad csak az energiát növelni, különben félő, hogy a rezonancia csúcson átlépnek és nem látnak semmit.

1974 júliusában az egyik csoport a 3 *GeV* körüli tartományban a hatáskeresztmetszet erős változását tapasztalta. Az $R(s)$ arány nagy energiákon való kimérését azonban mindenki sokkal fontosabbnak érezte, így a problémához csak novemberben, egy szabad szombat délután tértek vissza. Az eredményt a 13. ábra mutatja.

A felfedezés váratlan volt. De ha tudtuk volna, hogy létezik ilyen részecske akkor sem lehetett volna a SPEAR-nél ideálisabb berendezést konstruálni a tanulmányozásukra. Óriási intenzitással indult meg a munka a ψ részecske tulajdonságainak megállapítására.

Ha $\sqrt{s} \sim 3.1$ GeV tartományban vagyunk, a kvantumelektrodinamika szerint két lehetőség van $e^+e^- \to \mu^+\mu^-$ folyamatra: *i)* vagy egyszerűen az e^+e^- fotonná sugárzódik szét, majd a foton elbomlik $\mu^+\mu^-$ párra, vagy *ii)* az e^+e^- ψ-részecskévé alakul, majd a ψ bomlik $\mu^+\mu^-$ párra. Mivel nem állapítható meg melyik altertaníva érvényesül, a két lehetőség valószínűségi amplitúdója interferál — a $\frac{d\sigma}{d\Omega}(e^+e^- \to \mu^+\mu^-)$ hatáskeresztmetszetben

IVa. Táblázat

A ψ'J és ψ néhány tulajdonsága

Tulajdonságok	$\psi(3095)$	$\psi(3684)$
J^{pc}	1^{--}	1^{--}
Tömeg	3095 $\pm$ 0.004 GeV	3864 $\pm$ 0.005 GeV
Bomlási szélességek		
$\psi \to e^+e^-$		
$\psi \to \mu^+\mu^-$	4.8 $\pm$ 0.6 keV	2.2 $\pm$ 0.3 keV
$\psi \to$ hadronok	59 $\pm$ 14 keV	220 $\pm$ 56 keV
$\psi \to$ bármi	69 $\pm$ 15 keV	225 $\pm$ 56 keV
$\psi \to$ hadronok / $\psi \to$ bármi	0.86 $\pm$ 0.02	0.981 $\pm$ 0.003
$\psi \to e^+e^-$ / $\psi \to$ bármi	0.069 $\pm$ 0.009	0.0097 $\pm$ 0.0016
Hatáskeresztmetszetek értékei a csúcsban (nanobarn)		
$\psi \to e^+e^-$	130 nb	40 nb
$\psi \to \mu^+\mu^-$	100 nb	6 nb
$\psi \to$ hadronok	2300 nb	560 nb

IVb. Táblázat

A ψ(3095) bomlási módjai

Modus	Elágazási arány %	Megfigyelt események száma
e^+e^-	6.9	2000
$\mu^+\mu^-$	6.9	2000
$\varphi\pi$	1.3	153
$2\pi^+ 2\pi^-$	0.4	75
$2\pi^+ 2\pi^- \pi^\circ$	4.0	675
$3\pi^+ 3\pi^-$	0.4	32
$3\pi^+ 3\pi^- \pi^\circ$	2.9	181
$4\pi^+ 4\pi^- \pi^\circ$	0.9	13
$\pi^+\pi^- K^+ K^-$	0.4	83
$2\pi^+ 2\pi^- K^+ K^-$	0.3	
$K_s K_L$	—	< 1
$K^\circ K^{\circ *}(892)$	0.2	57
$K^+ K^{+*}(892)$	0.3	87
$K^{\circ *}(892)\, K^{\circ *}(1420)$	0.4	30
$KK^*(1420)$	—	< 3
$K^*(892)\, \varkappa^*(892)$	—	< 3
$K^*(1420)\, \varkappa^*(1420)$	—	< 3
$K^*(892)\, K^*(1420)$	—	< 3
$p\bar{p}$	0.2	105
$\Lambda\Lambda$	0.2	19
$p\bar{p}\pi^\circ$ $n p \pi^-$ $\bar{p} n \pi^+$	0.4	87

IVc. Táblázat

A ψ'(3684) bomlási módjai

Mód	Elágazási arány
e^+e^-	1.0
$\mu^+\mu^-$	1.0
ψ(3095) bármi	97
$\psi(3095)\, \pi^+ \pi^-$	32
$\psi(3095)\, \eta$	4
$\psi(3095)\, \gamma\gamma$	6.6
$\varrho^\circ \pi^\circ$	< 0.1
$2\pi^+ 2\pi^- \pi^\circ$	< 0.7
$p\bar{p}$	< 0.03

metszetnek a $\sqrt{s}$ függvényében interferencia struktúrát kell mutatnia. E struktúra függ attól, hogy mi a ψ részecske spinje, paritása, töltésparitása. A kísérletek bizonysága szerint csak a $J^{Pc} = 1^{--}$ érték van egyezésben a tapasztalattal. Hasonlóan tanulmányozták a ψ' részecskét is. Mivel a hatáskeresztmetszet nagyon nagy a rezonancia helyén, a ψ részecskék bomlás módjait részleteiben is sikerült meghatározni. A ψ és ψ' ismert tulajdonságai a IV. Táblázatban vannak összefoglalva. Bomlásmódjaikból az is kitűnik, hogy a ψ, ψ'-k bomlásaiban az izospin megmarad és a ψ, ψ'-k izospinje zérus.

B) *Miért különlegesek a ψ(3100) és ψ'(3700) tulajdonságai?*

A ψ-részecskék szokatlan tulajdonsága: hadronokra való bomlási félértékszélességük $\approx$ 65 keV, ill. $\approx$ 20 keV, ami jóval kisebb a tipikus hadronikus bomlási szélességeknél. (60—160 MeV). Mivel a szélességek a ψ-részecskék felfedezésével együtt ismeretesek voltak, kétséges volt a ψ-k természete: ha hadronok akkor miért ilyen hosszú életűek, ha nem hadronok, akkor pedig miért ilyen rövid az élettartamuk.

Mivel azóta kiderült, hogy az izospin megmarad, a ψ-bomlásoknak és a ψ-nukleon szórás hatáskeresztmetszete nagy, eldöntöttnek tekinthetjük a kérdést: a ψ-k hadronok.

Ha a ψ-k hadronok, akkor miért olyan kicsi $\Gamma(\psi)$ és $\Gamma(\psi')$? Ez dinamikai kérdés, amelynek megválaszolása részletesebb fizikai elképzelést igényel. Lényegében két lehetőség vetődött fel reálisan:

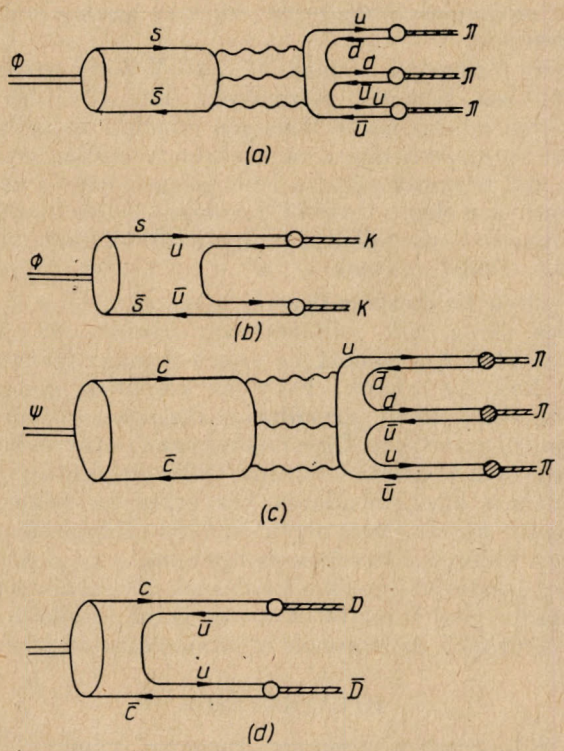
i) Szín-modell

A ψ-részecskék olyan új kvantumszámot hordoznak, amely erős kölcsönhatásban megmarad, de elektromágneses kölcsönhatásokban nem, ezért lehet elektromágnesesen ψ-t kelteni és ezért olyan kicsi $\Gamma(\psi)$ értéke. A ψ' ekkor ψ-re és hadronokra gyorsan el tud bomlani, de a $\psi' \to$ *közönséges hadronok* bomlás nem megengedett. A modell megköveteli töltött ψ_ϱ-k létezését is, továbbá a $\psi \to \gamma +$ *hadronok* bomlásnak domináns bomlás módnak kell lennie. Mindkét követelmény ellentétben áll a tapasztalattal, ezért kevesen gondolják ma már fenntarthatónak a színmodellt.

ii) Báj-modell, Zweig-szabály

E szerint az elképzelés szerint létezik egy olyan kvark, ami nincs benn az eddig talált részecskékben, ezt bájos (charmed) kvarknak nevezzük. (Egy negyedik kvark létezésére már előzőleg született elméleti érv a hadronok gyenge kölcsönhatásának tanulmányozásából.) E negyedik kvark tömegét jóval nagyobbnak gondoljuk (2 GeV) mint a közönséges kvarkokét. A bájos kvark spinje 1/2, töltése 2/3 és van egy új kvantumszáma a báj, ami csak gyenge kölcsönhatásban nem marad meg.

E model szerint a ψ részecske azért hosszú életű, mert közönséges hadronokká való bomlása csak a c és $\bar{c}$ kvarkok szétsugárzásával lehetséges, és dinamikai okokból ennek valószínűsége kicsi (Zweig-szabály). A Zweig-szabály nem a ψ-részecskék miatt született. 1964-ben Zweig a Φ-mezon bomlási módusait próbálta így magyarázni. Ugyanis a Φ-mesonnak a $K\bar{K}$ mezonokra történő bomlási valószínűsége $\approx$ 20-szor nagyobb a



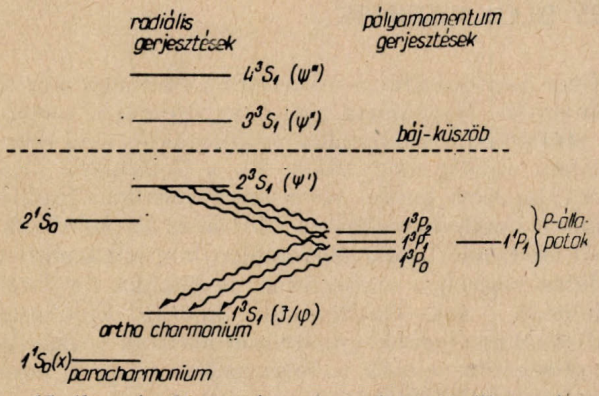
14. ábra. A Zweig-szabály illusztrálása „kvark-diagramokkal".
a) A $\Phi \to \pi\pi\pi$ bomlás Zweig-tiltott, mert a kezdeti állapotban levő kvarkoknak annihilálódniuk kell.
b) A $\Phi \to K\bar{K}$ bomlás Zweig-megengedett, mert a kezdeti állapotban levő kvarkok tovább élnek a végállapotbeli K és $\bar{K}$-ban
c) A $\psi \to \pi\pi\pi$ bomlás Zweig-tiltott, mert a kvark-párnak szét kell sugároznia
d) A $\psi \to DD$ bomlási pár Zweig-megengedett, nem megy végbe, mivel $2m_D < m\psi$.

$\pi^+\pi^-\pi^\circ$-re való bomlás valószínűségénél. Ha a Φ-mezon s-kvark-s-antikvark kötött állapota, akkor a 3π-re való bomlásnál a kezdeti $s\bar{s}$ kvarknak szét kell sugárzódnia, míg $K\bar{K}$-ra való bomlásnál nem, hiszen az s a K-ban, $\bar{s}$ az $\bar{K}$-ban tovább él (14. ábra). A ψ részecske bájos mezonokra gyorsan bomlana, de feltételezzük, hogy a $u\bar{c}$, $d\bar{c}$, $s\bar{c}$, $\bar{u}c$, dc, $\bar{s}c$ kötött állapotoknak megfelelő részecskék tömege olyan nagy, hogy energia megmaradás miatt nem lehetséges a bomlás. Ezt úgy mondjuk, hogy a ψ és ψ' a bájküszöb alatt van.

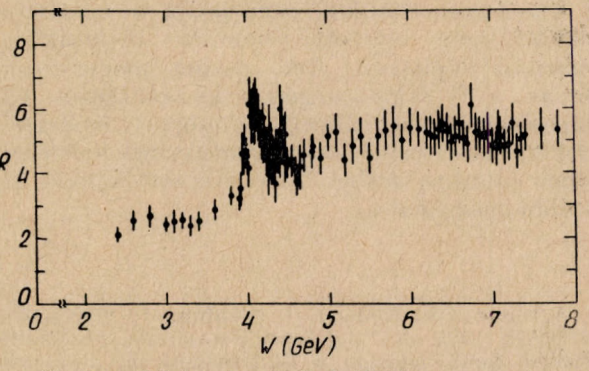
c) Charmonium

Ha a ψ-részecske nehéz feles-spinű bájos kvark és bájos antikvark $(c\bar{c})$ kötött állapota, és a kvarkok mozgása a kötött állapoton belül nem relativisztikus, akkor az elektron-pozitron kötött állapotához (a pozitróniumhoz) hasonló rendszerrel van dolgunk, csak jóval nagyobb energián. Egy ilyen kötött állapotnak van két alapállapota (párhuzamos spinállásnak (orthocharmonium), ellentétes spinállásnak (paracharmonium) megfelelően, továbbá vannak radiális és impulzusmomentum gerjesztései. Az ortocharmoniumot a $\psi(3095)$-tel, első, radiálisan gerjesztett állapotát (3700)-zal azonosíthatjuk. Foton emisszió révén a ψ el tud bomlani spin-szinglett párjára, a paracharmoniumra (η_c). Egyszerű potenciál képben a $J^{pc} = 0^{++}, 1^{++}, 2^{++}$, $L = 1$ pályamomentum gerjesztések ψ' és ψ között helyezkednek, el és ψ' fotont emittálva le tud bomlani a 0^{++}, 1^{++}, 2^{++} P-állapotokra és η_c radiális gerjesztésére η_c'-re. A P-állapotok bizonyos valószínűséggel el tudnak bomlani egy fotonra és ψ-re. Komoly bizonyítékként hozható fel a charmonium-kép mellett, hogy a ψ' és ψ ilyen egy fotonos bomlásait sikerült kimutatni. A P-állapotoknak a bevezetőben említett χ-állapotok felelnek meg. Ott lehet közöttük η_c' is, míg $x(2800)$-at a paracharmoniummal azonosíthatjuk (15. ábra). A széles 4 GeV körüli rezonanciákat úgy értelmezhetjük, mint magasabb pályamomentum és radiális ferjesztéseket. E rezonanciák azért szélesek, mert a báj küszöb felett vannak, azaz energetikailag bájos mezonokra való bomlásuk nem tiltott, és az ilyen bomlások Zweig-megengedettek. Végül azért nő meg $R(s)$ hirtelen $\sqrt{s} \approx 4$ GeV körül, mert ott indul be a bájos mezonok keletkezése (16. ábra).

Bár a charmonium — úgy látszik — többé-kevésbé helyes magyarázatot tud adni a részecskék számára és elhelyezkedésére, a pozitrónium analógiára támaszkodó naiv leírás kvantitatív jóslásai a spektrumvonalak egymás közötti távolságára, az egy fotonos átmenetek valószínűségére stb. általában nem fogadhatók el. Nem világos az sem,



15. ábra. A charmonium és gerjesztett állapotai.



16. ábra. $R(s)$ mért értékei (1975 augusztus).

hogyan kell a 4.1 GeV körüli három rezonanciát értelmezni. Bár történtek próbálkozások a charmonium kép alapján az $R(s)$ $\sqrt{s} = 4$ GeV körüli viselkedésének magyarázatára, az $R(s)$ báj-model szerinti viselkedése még nincs pontosan tisztázva.

IV. Bájos mezonok, nehéz leptonok, még több kvark?

Már említettük a bevezetőben, hogy vannak Stanfordban anomális $\mu^{\pm}e^{\pm}$ események, Chicagóban $\nu_{\mu}N$ szórás végtermékeiben nagyenergiájú $\mu^{+}\mu^{-}$ párt találnak, és arról is volt szó, hogy a νN ütközésekről készített buborékkamrás (Chicago és Genf) felvételek között 12 olyan eseményt találtak, amelyeket legtermészetesebben bájos mezonok létezésével lehet megmagyarázni. Mivel elsősorban a pszionok fizikáját akartuk ismertetni e kísérletek analízisére itt nem vállalkozhatunk.

Megelégszünk annyival, hogy megjegyezzük

i) Az $e^{+}e^{-} \rightarrow$ hadronok folyamat viselkedése a $\sqrt{s} = 3-8$ GeV tartományban csak a bájos kvark feltételezésével nem magyarázható meg. De kielégítő magyarázat adódik, ha feltételezzük, hogy $\sqrt{s} \rightarrow 4.1$ GeV körül a bájos részecskéken kívül nehéz lepton is keletkezik.

ii) A ν nukleon ütközések független bizonyítékokat szolgálnak a bájos részecskék és a nehéz lepton létezésére.

iii) Valószínű vannak 6—7 GeV körül további pszi-khez hasonló részecskék. Ez, továbbá a gyenge kölcsönhatás bizonyos elméleti modelljeinek konzisztenciája arra utal, hogy esetleg szembe kell néznünk azzal a lehetőséggel, hogy a négy kvark sem elég, s további kvarkokat kell bevezetni.

Aggodalomra adhat okot, hogy túl sok fundamentális valódi (leptonok: $e^{\pm}$, $\mu^{\pm}$, $\nu^{\pm}$, ν_e ($\tilde{\nu}_e$), ν_{μ} ($\tilde{\nu}_{\mu}$), ν_{μ} ($\tilde{\nu}_{\mu}$)) és hipotetikus (kvark: u, d, s, c, $\bar{u}$, $\bar{d}$, $\bar{s}$, $\bar{c}$ piros sárga kék változatban, összesen 12—18) részecskét használnak az elméleti magyarázatok. El kell ismernünk, hogy az eleminek gondolt részecskék ilyen grandiózus megsokszorozódása nem túl esztétikus. Ugyanakkor azt is látnunk kell, hogy nem elméleti fizikusok túlfűtött fantáziája, hanem a kísérleti adatok közvetkezetes analízise vezette az elméletet ilyen irányba. Elképzelhető, hogy kiderül a kvarkok és leptonok sem elemiek. Úgy gondoljuk ennek a kérdésnek a vizsgálata távolabbi jövő feladata. A ma és holnap fizikája az új hadronok és leptonok tanulmányozását jelenti.

HIVATKOZÁSOK

1. S. L. Glashow Scientific American October 1975, 38. old.
2. Kunszt Z. Fizikai Szemle XVIII. pp. 209—215 és 249—257 (1968)

RENORMÁLÁSI CSOPORT ÉS BLOKK-SPINEK

Kenneth G. Wilson
USA

Nagy megtiszteltetés számomra a Boltzmann érem elnyerése. Hozzájárul ahhoz az örömhöz, melyet a statisztikus mechanikai problémákon való munkában mindig megtalálok. Ez a Boltzmann által megalapozott terület továbbra is izgalmas problémákat kínál, melyekben a kihívás az alapkérdésekből ered, nem pedig lényegtelen komplikációkból. Hálás vagyok a statisztikus mechanika területén dolgozó sok barátomnak, köztük különösen Michael Fischernek, amiért csatlakoztak hozzám és segítségemre voltak a renormálási csoport módszerek kidolgozásában.

Érdekes észrevenni, hogy az $e^{-\beta H}$ Boltzmann-eloszlás a fizika egyik legstabilabb kifejezése. Sem a kvantummechanika, sem pedig a relativitáselmélet nem vezetett semmiféle módosításhoz ebben a képletben. Ami viszont megváltozott, az az $e^{-\beta H}$ átlósösszegének kiszámítására való képességünk. A renormálási csoport módszer a Boltzmann-elosztás következményeinek kiértékelésében és megértésében bekövetkezett fejlődés legutóbbi mozzanata.

A Sp $e^{-\beta H}$ számolásában durván a bonyolultság három szintjét különböztethetjük meg. A legegyszerűbb szint a molekuláris térelméletet jelenti, annak különböző változataiban. Ezen a szinten az alapgondolat abban áll, hogy megkeressük a fizikai rendszer legvalószínűbb konfigurációját, és az átlósösszeg számításakor csak ezt a konfigurációt vesszük figyelembe.

A bonyolultság második szintjén találjuk a Sp $e^{-\beta H}$ diagrammkifejtéseinek legtöbbjét. Ezek egyike a magashőmérsékleti sorfejtés. Ezekben a számolásokban már figyelembe vesszük a legvalószínűbb konfiguráció körüli ingadozásokat, de csak egyetlen hullámhossz-skálán elhelyezkedő fluktuációkat veszünk tekintetbe. Például a magashőmérsékleti sorfejtés csak a néhány Angström hullámhosszúságú vagy ennél rövidebb hullámhosszú fluktuációkat foglalja magában. Az Ising model speciális esetében ez abból a tényből következik, hogy a magashőmérsékleti sorfejtés diagrammjai (pontosabban azok összefüggő részei) csak néhány rácspontot fednek le, és a rácstávolság a fizikai mágnesekben 1 Å nagyságrendű.

A bonyolultság harmadik szintjét a renormálási csoport módszerek és a hozzájuk kapcsolódó diagramm-felösszegzési módszerek jelentik. A bonyolultságnak ez a harmadik szintje akkor lép fel, mikor a fluktuációkat a hullámhosszak széles

A Nemzetközi Elméleti és Alkalmazott Fizikai Unió (IUPAP) 1975. évi budapesti Nemzetközi Statisztikus Fizikai Konferenciáján a Boltzmann-érem átvételekor tartott előadás. Fordította Kondor Imre.

skáláján kell figyelembe vennünk. Ez a kritikus pont körül válik szükségessé, ahol a korrelációs hossz sokkal nagyobb, mint 1 Å. A renormálási csoport vizsgálatok megmutatták, hogy amikor a korrelációs hossz, ξ, nagy (például $\xi = 1000$ Å), akkor *minden* a rácsállandó és ξ közé eső hullámhosszú fluktuáció fontossá válik.

Ebben a cikkben a kritikus pont körüli fluktuációk okozta nehézségeket fogjuk áttekinteni. Ezután kifejtjük a renormálási csoport módszertmint e nehézségek megoldásának eszközét. Az eredetileg Kadanoff [1] által bevezetett, újabban pedig Niemeyer és Van Leeuwen, ill. Kadanoff és mások [2] által továbbfejlesztett blokk-spin módszert fogjuk felhasználni a renormálási csoport módszer illusztrációjára. A szükséges számolásokat egyszerűsíteni fogjuk: bizonyos technikai komplikációktól eltekintünk. Az alább kifejtendő speciális módszer („spin-tizedelés") gondosabb tárgyalására nézve lásd [3]. A renormálási csoport módszer egyéb összefoglalóira vonatkozóan lásd pl. [4—6].

A sok különböző hullámhossz-skála szerepe egy kritikus pont körül kísérletileg is megfigyelhető. Gondoljunk a vízre kritikus hőmérséklete és nyomása körül. A kritikus ponthoz elég közel kritikus opaleszcencia, azaz erős fényszórás lép fel. A fényszórást a fény hullámhosszával (~ 1000 Å) összemérhető hullámhosszú fluktuációk okozzák. Ezek a fluktuációk akkor lépnek fel, mikor ξ 1000 Å nagyságrendű lesz. Ha viszont még közelebb megyünk a kritikus ponthoz, úgyhogy most már ξ sokkal nagyobb, mint 1000 Å, a kritikus opaleszcencia akkor sem tűnik el. A fényszórás ugyanolyan erős marad, mintha ξ 1000 Å körül volna. Így az 1000 Å-ös skálájú fluktuációk akkor is fontosak maradnak, ha ξ már sokkal nagyobb, mint 1000 Å. Ugyanez igaz minden hullámhosszra, kezdve az atomi hosszúságoktól egészen ξ-ig.

Sp $e^{-\beta H}$ számítása különösen akkor válik nehézzé, mikor sok különböző skálájú fluktuáció lép fel. A magashőmérsékleti sorfejtésben a hosszú hullámhosszú fluktuációkat olyan diagrammok írják le, melyek sok rácspontot fednek le, és ezek a diagrammok igen magas rendben lépnek be. A kritikus pont körül ezek a diagrammok fontossá válnak, és a magashőmérsékleti sor divergenciáját okozzák. Bizonyos egyszerű esetekben a nagyon magas rendű diagrammok hatását meg lehet becsülni különféle összegzési módszerek, például a Padé approximánsok módszere, segítségével. Mindazonáltal ezek az összegzési módszerek nem magyarázzák meg a kritikus pont fizikáját. Továbbá ezek az összegzési módszerek nem alkalmasak összetett problémák (mint pl. két különböző típusú kritikus viselkedés közti váltás — crossover) kezelésére.

Vannak olyan más diagramm módszerek, melyekben a sok különböző hullámhossz szerepe az egyes diagrammokban is szembetűnő. Ez igaz speciálisan az ε-sorfejtés grafikus megfogalmazására [5]; $\varepsilon = 4 - d$ és d a tér dimenziószáma. A sok különböző hullámhossz hatása most abban áll, hogy az egyes diagrammok divergálnak a kritikus pontban. A divergencia legegyszerűbb formájában egy logaritmikus integrál alakjában lép föl,

$$\int_{1/\xi}^{1} \frac{dk}{k} = \ln \xi, \tag{1}$$

ahol k a fluktáció hullámvektorának abszolút értéke. Ha k-t a rácsállandó reciprokának egységeiben mérjük, akkor a fontos k tartomány: $1/\xi < k < 1$. Ha $\xi \to \infty$, az integrál divergál. A sok különböző hullámhossz szerepe nyilvánvaló ebben az integrálban. A hullámszámok egyetlen adott nagyságrendű tartománya, mondjuk k_0-tól $2\,k_0$-ig,

$$\int_{k_0}^{2k_0} \frac{dk}{k} = \ln 2 \tag{2}$$

járulékot ad. Ez a járulék véges. A $\xi = \infty$ esetében fellépő divergencia onnan ered, hogy ($1/\xi = 0$ és 1 között) a lehetséges k értékek végtelen sok különböző nagyságrendű tartománya helyezkedik el, és ezek mindegyike egyforma járulékot ad az integrálhoz.

Bonyolultabb diagrammok a $\ln \xi$ magasabb hatványaival divergálnak. Így egyáltalán nem triviális a diagramm-kifejtés összegét $\xi = \infty$ körül kiszámítani.

A renormálási csoport elméletnek három összetevője van. Az első abban áll, hogy a sokszoros hullámhossz skálák problémáját azonosítsuk; ez a probléma a kritikus jelenségeken túl a fizika egy sor további ágára is jellemző, beleértve a turbulenciát, a relativisztikus térelméletet, stb. (További diszkusszióra vonatkozólag lásd [7]). A második összetevő a sokszoros hullámhossz skálák problémájának leküzdésére szolgáló terv kidolgozása: ezt alább kifejtjük. Végül pedig a renormálási csoport-számolások eredményeinek leírására egy külön nyelv szolgál: „fix-pontok", „univerzalitás", stb. A következőkben (részben) ezt a nyelvet is megmagyarázzuk.

Itt közbevetünk egy rövid történeti visszapillantást. A logaritmikusan divergáló diagrammok problémája először a kvantumelektrodinamikában lépett föl. A Bethe, Schwinger, Feynman és mások (lásd [8]) által kidolgozott klasszikus renormálási módszerek révén sikerült a kvantumelektrodinamika divergenciáit eltávolítani. Ezeknek a renormálási módszereknek a fizikai értelme azonban nem volt világos; a divergenciák alapvető oka magyarázat nélkül maradt. A renormálási csoport Gell-Mann és Low [9], Petermann és Stückelberg [10] és Bogoljubov és Sirkov [11] által 1954 körül megadott első tárgyalásai mind a kvantumelektrodinamikára vonatkoztak. Az általuk kezdeményezett számolások jellemzőek a renormálási csoport megközelítésre és Gell-Mann és Low bevezették a fix-pont gondolatát is. Mindazonáltal az általuk felállított keret rendkívül misztikus volt, bizonyos részben azért, mert a Feynman gráfok egy mate-

matikai tulajdonságából indultak ki, nem pedig a sokszoros hullámhossz skálák fizikájából.

1965-ben Kadanoff a statisztikus mechanikában fellépő kritikus indexek közti skálatörvények értelmezésére bevezette a blokk-spinek gondolatát. A mai renormálási csoport módszerek abból a próbálkozásból alakultak ki, hogy a blokk-spinek és a köztük lévő kölcsönhatások Kadanoff-féle intuitív képét a térelméleti renormálási csoport formálisabb módszereivel kombináljuk. Egyetlen új gondolatot vezettünk be. Kadanoff úgy képzelte el a blokk-spineket, hogy azok egy egyszerű első-szomszéd csatoláson keresztül hatnak kölcsön, ugyanúgy, mint az Ising modellben. Hasonlóan ehhez, a Gell-Mann és Low-féle egyenletek is csak egyetlen csatolási állandót tartalmaznak. Ezzel szemben az újabb kvantitatív renormálási csoport módszerek ennél sokkal bonyolultabb formát adnak meg a blokk-spin kölcsönhatásra, olyat, ami valójában minden lehetséges sok-spin csatolást tartalmaz. Mindazonáltal az alábbiakban tárgyalandó számolásokban az első szomszéd kölcsönhatás az egyetlen ténylegesen fontos tag. A szerző azt, hogy az ilyen bonyolult kölcsönhatások kezelhetők lehetnek, először egy rögzített forráshoz csatolt mezonok mesterkélt modelljének tanulmányozásából tanulta meg [12].

Az elmúlt néhány évben óriási mennyiségű és változatosságú munkát végeztek a renomálási csoport kidolgozásában és annak a kritikus jelenségekre, ill. ezekhez kapcsolódó problémákra való alkalmazásában. Megújult érdeklődés mutatkozott e módszerek kvantumtérelméleti alkalmazásai iránt is. Az alkalmazások kiterjednek a trikritikus pontok, a dipólerők és kristály anizotrópiák problémáira, a polimér-oldatok elméletére, a véletlen Ising rendszerek elméletére, stb. A [2—6] hivatkozások, valamint e konferencián előadott többi munkák további példákkal és referenciákkal szolgálnak.

Az előző IUPAP statisztikus mechanikai konferencián tartott előadásomban áttekintettem az ε sorfejtés fizikáját [13]. Ezért ebben az előadásomban a renormálási csoport módszert egy másik technika segítségével fogom illusztrálni, mégpedig a blokk-spin módszer segítségével.

A blokk-spin gondolat illusztrációjára a kétdimenziós, elsőszomszéd csatolásos Ising modellt fogjuk felhasználni. Ennek a modellnek rendelkezésre áll ugyan az Onsagertől származó egzakt megoldása, de úgy fogjuk itt tárgyalni, mintha még keresnünk kéne ezt a megoldást. Az Ising modell Hamilton-függvénye a következő:

$$H = -J \sum_n \sum_i s_n s_{n+\hat{i}}\,, \tag{3}$$

ahol $\hat{i}$ ($i = 1$ vagy 2) egy egyszerű síkrács egységvektorai és n egy kétkompnonensű vektor, amelyik a rácspontokat indexeli. Az s_n egy klasszikus spin változó, melynek lehetséges értékei ± 1. Az $e^{-\beta H}$ átlósösszege az s_n spinek minden konfigurációjára vett összeg. Legyen

$$K = \beta J. \tag{4}$$

Ekkor az állapotösszeg a következő:

$$Z = \sum_{\{n\}} e^{K \sum_n \sum_i s_n s_{n+\hat{i}}} \tag{5}$$

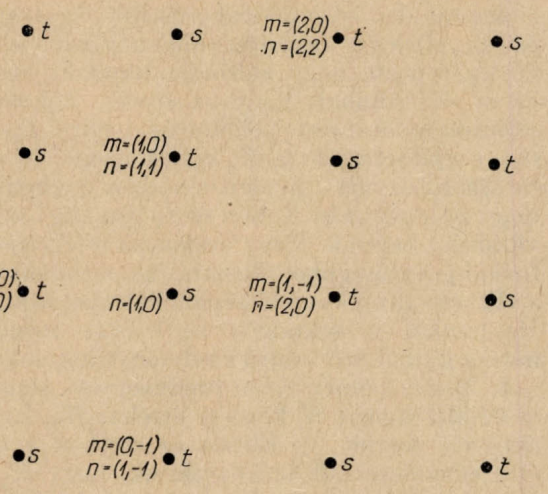
Tegyük fel, a hőmérséklet közel van a kritikus hőmérséklethez és a ξ korrelációs hossz körülbelül 1000 rácsállandó. Ez azt jelenti, hogy K közel van kritikus értékéhez, K_c-hez. Tegyük fel, hogy Z-t elegendően pontosan akarjuk kiszámítani ahhoz, hogy belőle olyan termodinamikai mennyiségeket számolhassunk, mint például a fajhő. Ehhez a számoláshoz minimálisan egy ξ méretű rácsra van szükségünk, azaz egy akkora rácsra, amely körülbelül $\xi^2 = 10^6$ rácspontot tartalmaz. Ennél kisebb rács nem felel meg, mert különben elhanyagolnánk a korrelációs effektusokat.

Egy ilyen véges rácson elképzelhető, hogy az állapotösszeget minden lehetséges konfigurációra való összegzéssel, egzaktul számítsuk ki, s ily módon elkerüljünk mindenféle sorfejtési módszert. Sajnos, egy 10^6 rácspontból álló rács konfigurációinak száma 2^{10^6}; ez messze meghaladja a rezonábilis idő alatt felösszegezhető konfigurációk számát. (Egy rezonáblis digitális számítógépi számolás 10^9 nagyságrendű összeadást vagy szorzást foglal magában.)

Hogy legalább egy 1000×1000 rácspontból álló rácsot kell használnunk, annak az oka az, hogy figyelembe kell vennünk minden fluktuációt egészen a ξ-vel összemérhető hullámhosszakig. A renormálási csoport módszer alapötlete abban áll, hogy ezt az összes hullámhosszakra kiterjedő egyetlen számolást helyettesítse a számolásoknak egy olyan sorozatával, melyben egy adott lépésben a hullámhosszaknak csak egyetlen nagyságrenden belüli tartománya ad járulékot. Ennek az eljárásnak az illusztrációjaképpen a Kadanofftól és a szerzőtől származó egyszerű módszert, a „spin-tizedelést" fogjuk felhasználni. A „spin-tizedelési" sorozat első lépéseként részleges összegzést hajtunk végre, mégpedig úgy, hogy a rácson a spinek felét rögzítve tartjuk, míg a többi spinre elvégezzük az összegzést. A rögzített spinek a rács váltakozó átlói mentén helyezkednek el.

A spinek felének rögzítésével az a célunk, hogy a hosszú hullámhosszú spin fluktuációkat „befagyasszuk". Az előfordulhat, hogy egy rövid hullámhosszúságú fluktuáció csak a kiátlagolt spineket érinti, de egy hosszú hullámhosszú fluktuáció kiterjedne a rögzített spinekre is. Így ehhez a részleges összeghez csak a rövid hullámhosszak adnak járulékot.

Ezt a részleges összegzést egzaktul végre lehet hajtani .Vegyük a határozottság kedvéért az (1,0) rácspontban ülő spint (lásd az 1. ábrát). Jelöljük ezt a spint s-sel. Ez csatolva van négy legközelebbi szomszédjához. Ezek a legközelebbi szomszédok mind rögzítettek. Jelöljük őket t_1, t_2, t_3, t_4-gyel. Az s spin szerinti összeg ekkor ilyen alakú:



1. ábra. Síkrács (t-vel jelölt) rögzített spinekkel a spin-tizedelési számolásban. Azokat a spineket, melyekre kiösszegzünk, s-sel jelöljük. A rácspontokat az n indexeli. A rögzített spinek rácsát az m-mel indexeljük.

$$\sum_{s=\pm 1} e^{Ks(t_1+t_2+t_3+t_4)} = 2\cosh K\,(t_1 + t_2 + t_3 + t_4)\,. \tag{6}$$

Az egész rácsra vett részleges összeg egyszerűen ilyen cosh függvények szorzata, minden kiösszegzett spinhez tartozik egy. Más szavakkal, az egyes spinekre vett összegek függetlenek a többi spinre vett összegekről, mert minden kiösszegzett spin csak rögzített spinekhez csatolódik.

A spin-tizedelés első lépésének eredményeképpen a rögzített spinek egy függvényét kapjuk. A rögzített spinek rácsa maga is négyzetrács. Ennek az új rácsnak a tengelyei az eredeti rács átlói és az új rácsállandó $\sqrt{2}$-ször nagyobb a régi rácsállandónál. Az új rács spinjeit t_m-el jelölhetjük, ahol m az új rács rácspontjait indexeli. Például a régi rács $n = (1,1)$ indexű rácspontján az a t_m rögzített spin ül, melyre $m = (1,0)$.

A spin-tizedeléssel kapott összeg pozitív, így felírható a következő exponenciális alakban: $e^{H_1[t]}$. Az állapotösszeg most az $e^{H_1[t]}$-ben fellépő minden egyes t spinre vett összegzéssel kapható meg:

$$\mathcal{Z} = \sum_{\{t\}} e^{H_1[t]} \tag{7}$$

$H_1[t]$ kifejezhető t polinomjainak segítségével, s minthogy t csak ± 1 lehet, ezért mindössze három tagot kapunk: egy elsőszomszéd csatolású spin-spin tagot, $\sum_m t_m\, t_{m+\hat{i}}$, egy átlós elsőszomszéd csatolást leíró tagot $\sum_m t_m\, t_{m+\hat{i}+\hat{j}}$ és egy 4-spin kölcsönhatást $\sum_m t_m\, t_{m+\hat{i}}\, t_{m+\hat{j}}\, t_{m+\hat{i}+\hat{j}}$ ($\hat{i}$ és $\hat{j}$ rács-egységvektorok). További tagok nem lépnek fel, mert a spin-tizedelés csak olyan t_m spinek között generál csatolást, melyeknek a régi rácson volt egy közös s_n legközelebbi szomszédjuk. A tárgyalás egyszerűsítésének érdekében ezt az új négy-spin csatolást el fogjuk hanyagolni, az új két-spin csatolásokra pedig egyszerű közelítéssel élünk, mégpedig az új két-spin csatolásokat egy a K hatványai szerint haladó sorfejtésben K^2 rendig számoljuk. A következő eredményt kapjuk:

$$H_1[t]\,K \simeq {}_1 \sum_m \sum_i t_m\, t_{m+\hat{i}} + L_1 \sum_m \sum_{\pm} t_m\, t_{m+\hat{i}\pm\hat{2}} \tag{8}$$

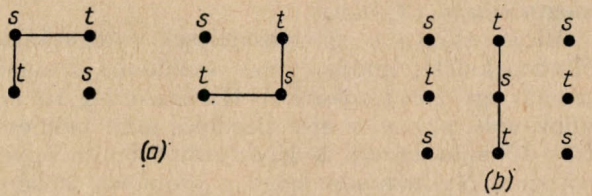
ahol

$$K_1 = 2\,K^2 \tag{9}$$

$$L_1 = K^2 \tag{10}$$

(egy pontosabb számolásra nézve lásd [3]).

Ezek az eredmények grafikusan is beláthatók: K_1-hez két gráf ad járulékot (2a ábra) míg L-hez csak egy (2b ábra).



2. ábra. A spin-tizedelési számolásban a K szerinti sorfejtést adó diagrammok. A 2a ábra mutatja azokat a tagokat, melyek K_1-et határozzák meg, a 2b ábra az L_1-et meghatározó tagot mutatja. A diagrammban az első szomszédokat összekötő kapcsok $Ks_n\, s_{n+i}$ típusú szorzatokat jelentenek. Az s spinre való összegzés egy a rögzített spinektől függő függvényt ad.

Összegezve: $H_1[t]$ olyan effektív kölcsönhatás, amely mind legközelebbi szomszéd, mind pedig átlós legközelebbi szomszéd csatolást is tartalmaz, de a legközelebbi szomszéd csatolás egy 2-es tényezővel nagyobb az átlós legközelebbi szomszéd csatolásnál.

A spin-tizedelés következő lépései hasonlóak az első lépéshez, a spinek felére kiösszegzünk, míg a másik felét rögzítjük. Ennek eredményeképpen a $H_l[t]$ effektív kölcsönhatásoknak egy sorozatát generáljuk:

$$e^{H_l[t]} = \sum_{\{\}} \{ \prod_m \delta_{t_m,\, s_{n(m)}} \} e^{H_{l-1}\{s\}}. \tag{11}$$

Ugyanúgy, mint az első lépésben, a rögzített spineket t_m-mel jelöljük; ezek az s_n spinek rácsának átlói által alkotott négyzetrács rácspontjaiban helyezkednek el. Az $n(m)$ mennyiség megadja az n régi rácspont indexet mint az új m index függvényét (lásd pl. az 1. ábrát).

Az első lépésen túl a spin-tizedelést már nem lehet egzaktul végrehajtani. Ennek az az oka, hogy $H_{l-1}[s]$-ben már átlós elsőszomszéd csatolások is fellépnek. Ez az átlós kölcsönhatás csatolja a kiösszegzendő spineket (például az 1. ábrán $s_{(0,1)}$ csatolva van $s_{(1,0)}$-hoz, és mind a kettőre összegezni kell). Mindazonáltal, minthogy az átlós elsőszomszéd kölcsönhatás viszonylag gyenge, el lehet képzelni, hogy ezt az átlós csatolást pertubációként kezelhetjük. Ennek eredményeképpen az első-

szomszéd és az átlós elsőszomszéd csatolásra egy rekurziós képletet nyerünk:

$$K_l = 2\,K_{l-1}^2 + L_{l-1} \tag{12}$$

$$L_l = K_{l-1}^2 \tag{13}$$

Ezekben a képletekben az egyszerűség kedvéért csak K_{l-1}^2 és L_{l-1} rendű tagokat vettünk figyelembe.

Egy teljesebb számolásban azt találjuk, hogy $H_2[t]$-ben és az ezt követő effektív kölcsönhatásokban minden lehetséges, tetszőlegesen sok spinre kiterjedő csatolások is fellépnek. Egyedül az elsőszomszéd és az átlós elsőszomszéd csatolást megtartani, ez a dolgok erős túlegyszerűsítése, de mégis elegendő lesz arra, hogy a módszer alapgondolatait megmagyarázzuk. Egy gondosabb, több mint 200 csatolást tartalmazó számolás leírása megtalálható [3]-ban.

Mi az előnye a spin-tizedelések sorozatának? Mindenekelőtt, minden lépés csökkenti a spinek számát egy 2-es tényezővel. Ha eredetileg 10^6 spinünk volt, akkor az első tizedelés után már csak $1/2 \cdot 10^6$ spin marad. 20 lépés után talán ha egyetlen spin. Nyilvánvaló, hogy a probléma 20 lépés után óriási mértékben egyszerűsödik.

Másodszor, azt remélhetjük, hogy a spin-tizedelés minden lépését sokkal kisebb erőfeszítéssel tehetjük meg, mintha nekiállnánk a 10^6 spinre vett összeg nyers erővel való kiszámításának. Az első lépés triviális volt: mindössze egyetlen olyan spint kellett tárgyalnunk, mely négy legközelebbi szomszédjához van csatolva ((6) egyenlet). Egy komoly számolásban a következő lépések már bonyolultabbak az átlós első szomszéd csatolás miatt, de ha ezt a perturbációszámítás valamilyen alacsony rendjében tárgyaljuk, akkor csak néhány rácsállandónyi távolságra elhelyezkedő spinek között fog csatolást eredményezni, ugyanúgy, mint a magashőmérsékleti sorfejtés alacsony rendű tagjai. Ez azt jelenti, hogy egy adott spinre, mondjuk az $s_{(1,0)}$-ra vett összegzésben csak néhány közeli spin játszik szerepet, nem pedig az egész rács. A fizika emögött a következő. A spin-tizedelés l.-dik lépésében olyan rácshoz jutunk, melyben a rácsállandó $2^{l/2}a$, ahol a az eredeti rácsállandó. A spin-tizedelés durván szólva a $2^{l/2}a$ effektív rácsállandó nagyságrendjébe eső hullámhosszakat veszi figyelembe. Az ennél sokkal hosszabb hullámhosszú fluktuációk be vannak fagyasztva, minthogy a spinek fele rögzített. Mivel a spin-tizedelési összegzésben csak egyetlen hullámhossz tartomány játszik szerepet, érthető, hogy a számolás egy adott pillanatban csak néhány rácspontra terjed ki. A kritikus effektusokat nem hanyagoljuk viszont el: a spin-tizedelést addig ismételjük, míg minden hullámhosszat, egészen ξ-ig, figyelembe nem vettünk.

Ez az iteratív jelleg a renormálási csoport számolások sajátos jellemzője. A kritikus pont közelében sok iterációra lehet szükség, és ez különös következményekre vezethet. Speciálisan megtörténhet, hogy az eredeti K kölcsönhatási állandó kis módosítása minden interációval erősödik, úgyhogy a K_l és L_l effektív csatolási állandókban mondjuk 20 lépés után, nagy változást kapunk. Fordítva, az is előfordulhat, hogy az eredeti kölcsönhatás jelentős módosítása, például úgy, hogy L_0-t 0-ról 0,5-re változtatjuk (a K_0 ennek megfelelő változtatásával együtt) minden lépésben gyengül, úgyhogy 20 lépés után K_l-ben és L_l-ben alig észlelhető változást kapunk. Hogy ezeket az effektusokat és fizikai jelentőségüket illusztráljuk, a továbbiakban a (12) és (13) rekurziós képleteket vizsgáljuk meg. Ha ezeket a rekurziós képleteket megoldjuk, három különböző típusú eredményt kapunk:

1. Magas hőmérsékleti eredmények. Magas hőmérsékleteken a K kezdeti értéke, K_0, kicsi (L_0 definíció szerint 0). Ebben az esetben a (12) és (13) egyenletekből az következik, hogy K_1 és L_1 sokkal kisebbek, mint K_0, és a következő K_l és L_l értékek még kisebbek. Az $l \to \infty$ határesetben K_l és $L_l \to 0$. Ennek az a fizikai oka, hogy l növekedtével az effektív rácsállandó növekszik. Következésképp a H_l effektív kölcsönhatáshoz tartozó korrelációs hossz csökken (feltéve, hogy ξ_l-t az effektív rácsállandó, $2^{l/2}a$, egységekben mérjük). Az eredeti ξ korrelációs hossz nem változik, ezért $\xi_l = 2^{-l/2}\xi$. Amint $l \to \infty$, a ξ_l korrelációs hossz nullához tart. Ahhoz pedig, hogy a ξ_l korrelációs hossz nullához tartson, a H_l-ben fellépő csatolásoknak kell nullához menniük.

2. Alacsony hőmérsékleti eredmények. Alacsony hőmérsékleteken K_0 nagy. Ebben az esetben a $\{K_l\}$ és $\{L_l\}$ sorozatok gyorsan nőnek l-lel. Az $l \to \infty$ határátmenetben K_l és L_l határértéke végtelen. Alacsony hőmérsékleten a ξ_l korrelációs hossz megint zérushoz tart, de ebben az esetben a zérus korrelációs hossz a spinek tökéletes korrelációját jelenti, ami akkor érhető el, ha K_l és L_l végtelen. Vegyük azonban észre, hogy a K_{l-1} és L_{l-1} hatványai szerinti sorfejtés használata (mint az a (12) és (13) egyenletekben történt) nevetségessé válik, ha K_{l-1} és L_{l-1} nagyok.

3. A kritikus hőmérséklet. A K_0-nak van egy olyan speciális értéke, mégpedig $K_0 = K_c \simeq \simeq 0{,}3921$, melyre a $\{K_l\}$ és $\{L_l\}$ sorozatok sem nullához, sem végtelenhez nem tartanak. (Ez a 0,3921 érték próbálgatással található meg.) Ehelyett, ha $K_0 = K_c$, ezek a sorozatok egy fix-ponthoz tartanak. A fix-pont a K és L egy olyan K^*, L^* értékpárja, amelyik a spin-tizedelés során reprodukálja magát, azaz

$$K^* = 2\,K^{*2} + L^*, \tag{14}$$

$$L^* = K^{*2}. \tag{15}$$

Ennek (nullától és végtelentől különböző) megoldása a következő:

$$K^* = 1/3 \tag{16}$$

$$L^* = 1/9 \tag{17}$$

$K_0 = 0{,}3921$ esetén az $l \to \infty$ határmenetben $K_l = K^*$ és $L_l = L^*$. Ha $K_0 < 0{,}3921$, az $l = \infty$ határértékek zérusok; ha $K_0 > 0{,}3921$, az $l = \infty$

határértékek végtelenek. A $K_0 = 0{,}3921$ érték definiálja a kritikus pontot. Mivel K_l és L_l sem végtelenhez, sem nullához nem tart, a ξ_l korrelációs hossz sem megy zérushoz, ha $l \to \infty$. Ez csakis akkor lehetséges, ha az eredeti korrelációs hossz végtelen volt, és ez jellemzi a kritikus pontot.

Mint az a kétdimenziós Ising modell Osanger-féle egzakt megoldásából ismeretes, a K_0 egzakt kritikus értékét $K_c = 0{,}441$ adja.

A spin-tizedelés módszere felhasználható az univerzalitás megalapozására. Az univerzálitás azt jelenti, hogy nagyon sok kiindulási Hamilton-függvényhez ugyanaz a kritikus viselkedés tartozik. Tételezzük fel, hogy már eredetileg is jelen van a legközelebbi szomszéd csatolás is, azaz hogy sem K_0, sem pedig L_0 nem zérus. A spin-tizedelést ugyanúgy végrehajthatjuk, mint előbb; megint három különböző típusú eredményt kapunk. Speciálisan az L_0 minden értékéhez tartozik egy olyan $K_0 = K_c\,(L_0)$, melyre a $\{K_l\}$ és $\{L_l\}$ sorozatok határértéke az $l \to \infty$ esetben a K^*, L^* fixpont. A kritikus viselkedés $K_0 = K_c(L_0)$ esetén független L_0-tól. A fizika emögött az, hogy a spin-tizedelés minden egyes lépésében, azaz a fluktuációk egy adott nagyságrendű tartományára való kiátlagoláskor, az effektív kölcsönhatásnak az L_0-tól való függése gyengül. A nagyon hosszú hullámhosszak ($l \to \infty$) esetében az effektív kölcsönhatás függetlenné válik L_0-tól. Ehelyett a kölcsönhatás határértékét, H^*-t, az $l \to \infty$ esetben az a követelmény fogja meghatározni, hogy az reprodukálja önmagát a spin-tizedeléskor:

$$e^{H^*[t]} = \sum_{\{s\}} \prod_m \delta_{t_m, sn(m)}\, e^{H^*[s]} \qquad (18)$$

Ez a követelés (legalábbis a mi egyszerűsített közelítésünkben) teljes egészében rögzíti a H^* kölcsönhatást, úgyhogy az már nem függhet L_0-tól.

A renormálási csoport transzformációnak sok különböző változata van: a spin-tizedelés csak egy példa arra, hogyan átlagolhatunk ki a hullámhosszak egy adott tartományára egy lépésben. A blokk-spin módszerek általában nem az egyes spineket, hanem a spinekből álló blokkok összegét tartják rögzítve: erre [2]-ben találhatók példák. A renormálási csoport transzformációk más változatai nem rácson, hanem folytonos téren működnek: lásd pl. [5].

Realisztikus számolásokban kettőnél sokkal nagyobb számú paraméter léphet fel, nemcsak K és L. Ezek a számolások egyszerűsíthetők az olyan ügyes fogások alkalmazásával, mint a Kadanofféi [14].

Fel kell hívnunk az olvasó figyelmét arra, hogy a komoly blokk-spin számolások nem garantáltan sikeresek. Megtörténhet, hogy a blokk-spin számolás sokszori iterálásával hosszú hatótávolságú kölcsönhatások fejlődnek ki, ami az első szomszéd dominancia feltevését érvényteleníti [15].

Arra törekedtem itt, hogy a spin-tizedelés példáját felhasználva a renormálási csoport alapvető fizikáját hangsúlyozzam, nem pedig az ε sorfejtés erőteljesebb számolási eljárásait. Ennek az az oka, hogy ha azokat a mély problémákat, melyek a renormálási csoporttal való tárgyalásra várnak, kezdve a turbulenciától az erős kölcsönhatásokig, kezelni akarjuk, akkor az alapvető fizika ismerete a lényeg. Mindazonáltal el kell ismernem, hogy a fejlődés néha furcsa utakat választ, gondolok itt arra az újabb felismerésre, mely szerint a polimér problémák és a véletlenszerű rendszerek olyan spin-rendszereknek feleltethetők meg, ahol a spin egy 0 komponensű vektor [16—19].

IRODALOM

[1.] L. P. Kadanoff, Physics *2*, 263 (1966)
[2.] Lásd Th. Niemeyer és J. M. J. Van Leeuwen összefoglalóját Domb and Green kötetében [6.].
[3.] K. G. Wilson, Revs. Mod. Phys. *47*, 773 (1975), különösen a VI. fejezet.
[4.] G. Toulouse és P. Pfeuty, *Introduction au Groupe de Renormalization et à ses Applications* (Presses Univ. de Grenoble, Grenoble, 1975).
[5.] K. G. Wilson és J. Kogut, Phys. Repts. *12C*, 75 (1974).
[6.] C. Domb és M. S. Green, *Phase Transitions and Critical Phenomena*, Vol. 6 (Academic, London, nyomdában).
[7.] K. G. Wilson, Advances in Mathematics *16*, 170 (1975).
[8.] J. Schwinger, Quantum Electrodynamics (Dover, New York, 1958).
[9.] M. Gell-Mann és F. E. Low, Phys. Rev. *95*, 1300 (1954).
[10.] E. C. G. Stückelberg és A. Petermann, Helv. Phys. Acta *26*, 499 (1953).
[11.] N. N. Bogoliubov és D. V. Shirkov, *Introduction to the Theory of Quantized Fields* (Interscience, New York 1959), Ch. VIII.
[12.] K. G. Wilson, Phys. Rev. *D2*, 1438 (1970).
[13.] K. G. Wilson, Physica (Utr) *73*, 119 (1974).
[14.] L. Kadanoff, Phys. Rev. Lett. *34*, 1005 (1975).
[15.] T. Bell és K. G. Wilson, Phys. Rev. *B10*, 3935 (1974).
[16.] P. G. de Gennes, Phys. Lett. *38A*, 339 (1972).
[17.] V. J. Emery, Phys. Rev. *B11*, 239 (1975).
[18.] G. Grinstein és A. Luther, Illinois preprint.
[19.] J. de Cloiseaux (szóbeli közlés).

MOLEKULASPEKTROSZKÓPIAI ISKOLA MAGYARORSZÁGON

Vajda Pál
Budapest

Bunsen és Kirchhoff első közleménye a színképelemzés terén elért eredményekről (1858) világszerte gyors és erős visszhangot vert, nem csoda tehát, hogy rövid idő múlva már Magyarországon is megjelentek ilyen tárgyú közlemények. Elsőként a kor jónevű vegyésze, *ThanKároly* végzett figyelmet érdemlő spektroszkópiai vizsgálatokat. Nemzetközi viszonylatban is jelentős volt már három csillagász munkássága: *Konkoly Thege Miklós* az égitestek színképtípusainak tanulmányozá-

sában, *Gothard Jenő* a színkép-fényképzés terén, *Kövesligethy Radó* pedig a folytonos színkép elméletének kutatásában ért el nagy jelentőségű eredményeket.

Figyelemre méltó Konkoly Thege terjedelmes vizsgálatsorozata a *szénhidrogén gázok molekulaspektrumairól*, amelyet az üstökösök jellegzetes színképével vetett egybe. Az 1874—1914 között végzett észlelés sorozata és laborkísérletek százai természetesen csak leíró jellegűek lehettek, de a CH spektrum viselkedésének igen aprólékos és sokféle körülményre vonatkozó leírását adják. (Konkoly Thege és kortársai úgy vélték, hogy az üstökösök színképére igen jellemző ún. Swan-sávok a szénhidrogénektől származnak; jelenleg már tisztázott, hogy C_2 molekulától eredő molekulasávok.) Ugyancsak érdekesek voltak Gothard — sajnos csak kis részben publikált — tanulmányai az N_2 *molekulának* az ibolyántúli tartományhoz közel eső sávrendszereiről.

E korai vizsgálatok természetesen csak leíró természetűek lehettek, illetve csak kvalitatív megállapításokra szorítkozhattak. A mai értelemben vett molekulaspektroszkópia az atomszerkezet felismerésével, és a kvantummechanika fejlődésével párhuzamosan, az 1920-as években bontakozhatott ki. A gerjesztett molekulák színképeinek tanulmányozása egyre több, elméleti és gyakorlati jelentőségű eredménnyel kecsegtetett, de ugyanakkor igen sok, főként technikai jellegű nehézséget is le kellett küzdeni. A korszerű molekulaspektroszkópia terén *Schmid Rezső* (1904—1943) vette fel hazánkban a kutatások két évtizede megszakadt fonalát az 1920-as évek végén. Szorgos munkája nyomán nemcsak világviszonylatban is jelentős hazai eredmények láttak napvilágot, de kibontakozott egy „magyarországi iskola" körvonala is. Ennek a csoportnak jelentős kutatói: Schmid munkatársa, a fiatalon elhunyt *Gerő Loránd*, majd az 1930-as évek közepétől két évtizeden át *Budó Ágoston*, napjainkban pedig — széles körben elismert eredménnyel — *Kovács István*.

Schmid Rezső 1904. január 10-én született Munkácson, és fiatalon, 39 esztendős korában hunyt el Budapesten (1943. okt. 2.). Vegyészmérnöki oklevelet szerzett (1926), majd a Műegyetem Gépész- és Vegyészmérnöki Karán Pogány Béla professzor adjunktusa és a Tudományegyetem magántanára lett. Figyelme rövidesen a molekulaspektroszkópia felé fordult; első ilyen tárgyú közleménye, Pogány Bélával közösen, 1928-ban jelent meg (23)*, de ugyanebben az évben teljesen önálló cikket is publikált (2).

Nagyobb lendületet kapott munkássága, amikor 1931-ben, egyéves tanulmányi ösztöndíjjal részt vehetett Chicagóban, a már akkor világhírű, később Nobel-díjas Mullikan professzor által vezetett molekulaspektroszkópiai központ kutatásaiban. Hazatérte után egy ideig még az ottani tartózkodása idején készített felvételek alapján tette közzé közleményeit, de csakhamar az ő javaslatára a Műegyetem Fizikai Intézete beszerzett egy akkor világviszonylatban is kiemelkedő jelentőségű, 6,5 m átmérőjű, nagy konkáv Rowland rácsot, amely 1,2 Å/mm diszperziójú, tehát igen nagy felbontóképességű volt. Schmid úgy gondolta, hogy most már semmi sem áll útjában egy nagyszabású kutatási program végrehajtásához, azonban csakhamar csalódnia kellett. Kiderült, hogy a nagy költséggel beszerzett rács csak nagyon korlátozott mértékben használható, mivel az egymáshoz igen közelfekvő karcolatokat végző gép periodikus hibái miatt a színképekben ún. „szellemek" jelennek meg, más szóval egy ugyanazon színképvonal többszörösen is szerepel és így a rendkívüli sűrűségű színképvonal halmazból az eredeti és a szellem-vonalak nem különböztethetők meg egymástól, ami az analízist teljesen illuzórikussá teszi. Röviddel ezután, még a harmincas évek első felében, Schmid egy féléves berlini ösztöndíjat kapott, ahol megismerkedett egy Hochheim nevű mérnökkel, aki egy, róla elnevezett ötvözetet fedezett fel, amelylyel a csillagászati távcsövek tükreit szokták bevonni, hogy a reflexióképességet növeljék. Schmid arra gondolt, hogyha a műegyetemi rácsot is bevonnák ezzel az ötvözettel, annak is növelhető lenne a reflexióképessége. Meg is állapodott Hochheimmel, aki el is végezte ezt a munkát. És ekkor jött a nagy meglepetés: nemcsak a reflexióképessége nőtt meg nagymértékben a rácsnak, hanem *eltűntek a szellemek* is. Ekkor azonban már egy valóban kiemelkedő jeletőségű spektroszkópiai műszer állt rendelkezésére és megindulhatott a nagy program: a magyarországi spektroszkópai iskola megalapítása.

Első vizsgálatai a mágneses térben felhasadó színképvonalak ún. Zeeman-effektusára vonatkoztak az NO molekula színképében és e téren már új eredményekre jutott (2, 23). Majd fontos eredményként kimutathatta, hogy a színképben előforduló ún. deltasávrendszer dublett szerkezettel bír (3). Ugyancsak új eredmény volt az ún. epszilon sávrendszer rotációs analízise is, amelyet a Műegyetem kutatói végeztek el (116). Sok munkát tett közzé a semleges és ionizált CO molekula spektrumáról, ezek ún. predisszociációs analíziséről, a gerjesztett elektron-állapotok energiáit jelző termszkéma elemzéséről és kiegészítéséről (12, 14—18, 22, 27, 29—34, 37—41, 43—45, 49, 54, 100, 103). Ezt a vizsgálatot később kiterjesztette a CN molekulára is (42). Ezenkívül tanulmányozta még az O_2, N_2, és C_2, valamint a CH, CN stb. molekulákat (9, 21, 23, 35, 42, 52, 55, 56, 105—113), továbbá a különböző hidridmolekulákat is (48, 101, 104, 115). Nagyon sokat foglalkozott a molekulakötések szétbontásához szükséges ún. disszociációs energiák kérdésével (17—19, 33, 36, 39, 42, 46, 48, 51, 52, 101, 104, 108, 114, 117). Mindezek a vizsgálatok hamar ismertté tették nevét a nemzetközi tudományos világban, és így nem csodálható, hogy Gerővel együtt 1937-ben közös publikációt tett közzé a később Nobel-díjas Herzberg professzorral (100).

* A zárójelben álló számok a dolgozat végén közölt irodalomjegyzékre vonatkoznak.

„Nagyon kell szeretni a spektroszkópiát ahhoz, hogy a sok türelmet és kínos pontosságot igénylő, rendkívül hosszadalmas számításokkal megküzdve, örömet okozzon a nehezen megszerzett eredmény" — írja Schmid Rezső életmunkájának összeállítója, Deézsi Irén, majd hozzáteszi: Schmid Rezső nagyon szerette a spektroszkópiát. Valóban elismerésre méltó teljesítményt jelent ez a munka hiszen a molekulaszínkép nem egyes vonalakból, hanem vonalsorozatokból álló sávrendszerekből tevődik össze. Egy-egy sáv sokszáz vonalból is állhat, ezek lefényképezése, majd a fényképen a vonalak (esetleg többezer vonal) helyzetének lehetőleg nagy pontosságú kimérése türelmet és energiát igényel.

Schmid Rezső emlékét az Eötvös Loránd Fizikai Társulat az 1950-től minden évben kiosztásra kerülő és róla elnevezett Schmid-díjjal örökítette meg.

Schmid Rezső — és munkatársai — elsősorban a molekulaszínképek akkor még kevéssé ismert részleteinek kísérleti feltárása és értelmezése terén végeztek alapvető munkát. Schmid Rezső 22 önálló (1–22) és 52 társszerzővel (23–56, 100, 101, 103–118) (főként Gerő Loránddal) írt, összesen 74 közleményt publikált. Ilyen mennyiségű kifejezetten *tudományos* közleményt a felszabadulás előtti magyar fizika történetében — Eötvös Loránd is beleértve — senki sem publikált.

Állandó szerzőtársa volt első jelentősebb tanítványa *Gerő Loránd* (1910–1945). Gerő 1935-ben disszertációjában (84) bemutatott egy empirikus eljárást, amelynek segítségével a rotációs színképvonalak szabályos egymásra következésében mutatkozó hullámszámbeli eltéréseket, ún. perturbációkat igen egyszerűen fel lehet fedezni. Ezen eljárás alkalmazásával Gerő számos új perturbációt fedezett fel az AgH, C_2, PbH, CO, NO és más molekulák színképein (85–88, 96, 97, 115) és nem egy esetben a számos perturbáció által annyira keresztül-kasul szabdalt sávokban, hogy szinte egyetlen színképvonal sem maradt eredeti helyén, kizárólag az általa felfedezett eljárás segítségével lehetett a bravúros analízist elvégezni. Gerő munkái is eleinte a CO molekula sávjainak a korábbinál jelentősen pontosabb elemzéséhez fűződik (89–95). Gerő Loránd 16 önálló (84–99) és 46 társszerzővel (27–34, 36–54, 100–118) — egy híján mind Schmid Rezsővel — írt, összesen 62 közleményt publikált. Utolsó közös munkáik már nem láthattak napvilágot szerzőik életében, ezeket részben *Valatin János* rendezte sajtó alá (118, 83).

Schmid kimagasló tehetsége és varázsos egyénisége csakhamar vonzani kezdte a fiatal kutatókat. Így nemsokára egész kutatói gárda vette körül, ami kettős előnnyel járt. Egyfelől ezek a fiatal emberek lehetőséget kaptak egy korszerű kutatócentrumba való bekapcsolódásra, és Schmid és munkatársai irányítása alatt általában két év alatt megírhatták doktori értekezésüket, másrészt a Schmidék által nyújtott segítség ellenértékeként részt vettek a kutatómunkában, elvégezték a még nem nagy szakértelmet követelő munkát és így értékes segítséget nyújtottak a kutatómunkához, megoldva az akkor nem kis problémát jelentő tudományos segéderőhiány kérdését, miután fizetéses állások abban az időben a kezdő fiatalok részére csak elvétve álltak rendelkezésre. Különösen a kísérleti munkákba kapcsolódtak sokan. Ezek egy része időközben meghalt, mások pedig más területeken dolgoznak tovább. Jelentősebbek közülük a fiatalon elhunyt *Cavalloni Ferenc* (59, 60) és *Bródy Éva* (74) (akit édesapjával, a világhírű nagy magyar elméleti fizikussal, Bródy Imrével együtt hurcoltak el a fasiszták), *Beer Borbála* (66, 67), a nemrég elhunyt *M. Zemplén Jolán* (42, 63), továbbá a később csillagásszá lett *D. Balázs Júlia* (61), majd *Bozóky László* (55, 56, 64, 65) jelenleg az MTA levelező tagja és az Országos Onkológiai Intézet osztályvezetője), *A. Lőrinczy Katalin* (68, 69, 102), a már említett és ugyancsak korán elhunyt *Deézsi Irén*, és még sokan mások. Schmid és Gerő tanítványai 38 értekezést (23 kísérleti, 15 elméleti) (57–84, 120–123, 126, 127, 134–137) írtak és 9 kísérleti értekezésben szerepeltek társszerzőként.

A Schmid-iskola azonban nemcsak a kísérleti kutatókat vonzotta, az elméleti kutatók számára is nagy lehetőségeket nyitott. Itt ugyanis első kézből lehetett hozzájutni a molekulaspektroszkópia legaktuálisabb és legégetőbb problémáihoz. Schmid maga ugyan kísérleti érdeklődésű kutató volt, hasonlóan Gerőhöz, azonban az elméleti problémák megoldásában, azok kijelölésében felülmúlhatatlan volt.

Itt kezdte meg kutatásait a háborúban korán elhunyt, nagy tehetségű elméleti fizikus *Singer István* (79), aki Kovács Istvánnal tett közzé egy értekezést három molekulaterm kölcsönhatásáról (185), valamint *Gáspár Rezső* (80), aki jelenleg az MTA levelező tagja, az ismert kvantum-kémikus, a KLTE Elméleti Fizikai Tanszékének professzora is.

A laboratórium egyik legjelentősebb elméleti munkatársa *Budó Ágoston* (1914–1969) volt. Bár tevékenysége nem kapcsolódott olyan kizárólagosan a molekulaspektroszkópiához, mint mesteréé, e téren is igen jelentős eredményeket ért el. Első munkája 1935-ben jelent meg, a dublett sávok Zeeman-komponenseinek intenzitásviszonyairól (119). Még egyetemi hallgató korában megírt doktori értekezésében (122) egy új triplett formulát közölt, amelynek megoldásával előtte sikertelenül kísérleteztek. Ez egész munkássága legjelentősebb alkotásának bizonyult és mind a mai napig számtalanszor idézik. További munkáiban — Kovács Istvánnal közösen — főleg a magasabb multiplicitású molekulatermek multiplett szerkezetének, intenzitásviszonyainak és perturbációinak vizsgálatával foglalkozott (126–133, 184, 186, 187, 189). Budó Ágoston a molekulaspektroszkópia területén 7 önálló (119–125) és 13 társszerzővel (egy híján mind Kovács Istvánnal — 35, 126–133, 184, 186, 187, 189) írt, összesen 20 közleményt publikált. 1941-ben a Tudomány-

egyetem magántanára, majd 1950-ben az MTA levelező tagja lett, 1951-ben Kovács Istvánnal együtt megkapta a Kossuth-díj II. fokozatát, majd 1960-ban az MTA rendes tagjává választották. 1950-től haláláig a JATE Kísérleti Fizikai Intézet vezetője és a MTA Lumineszcencia- és Félvezető Tanszéki Kutatócsoport vezetője volt.

A Schmid-iskola ma is tevékenykedő, nemzetközileg elismert, elméleti kutató tagja *Kovács István*. Budapesten született 1913. december 16-án, a matematika-fizika szakos oklevelet 1936-ban szerezte. Szinte csak szerencsés véletlen, hogy doktorátusát a spektroszkópia tárgyából jelentette be, Schmid Rezsőnél. Ettől kezdve a molekulaszínképek tanulmányozása vált életcéljává. Munkáját 1936-tól 1954-ig részben Budó Ágostonnal végezte. A Műegyetem Fizikai Tanszékén 1945-ig gyakornokként, 1946-tól a Tudományegyetem magántanáraként dolgozott, de még ebben az évben a budapesti Tudományegyetem Elméleti Fizikai Tanszékére került adjunktusként, majd intézeti tanárként. Két évvel később ismét a Műegyetemen találjuk. 1949-ben megválasztották az MTA levelező tagjának, 1950-ben pedig megbízták a Központi Fizikai Kutató Intézet (KFKI) megszervezésével, illetve vezetésével (144, 148, 149). Az Akadémia rendes tagságát 1967-ben nyerte el. A KFKI élérő1 1956-ban — saját kérésére — ismét a Műszaki Egyetemre került (Atomfizika Tanszék). Széles körű tevékenysége a tudományos kutatáson kívül a szervezésre és oktatásra is kiterjed. Ezeket az eredményeit mind a hazai, mind a külföldi szervezetek és intézmények méltányolják is.

Doktori értekezésében (1937) a kvantummechanika alkalmazásával megadta a perturbációk felfedezésére szolgáló Gerő-féle empirikus eljárás elméleti alapjait, továbbá kiterjesztette azt a perturbációk felfedezésén túlmenően a perturbációt okozó ismeretlen molekulaterm típusának megállapítására és állandóinak kiszámítására is (134). Az a tény, hogy ennél az eljárásnál nem szükséges sem a perturbált termek perturbálatlan értékeinek ismerete, sem pedig a perturbációs matrixelem ismerete, annyira meglepő, hogy amikor 1949-ben Kovács István Stockholmban járt, az ottani spektroszkópusok eleinte el sem akarták hinni, hogy ilyen eljárás létezhet. Csak amikor együtt megvitatták a kérdést, akkor ismerték fel ennek az eljárásnak minden más eljárással szemben mutatkozó előnyét, és azóta is állandóan alkalmazzák. Ennek segítségével sikerült a BaO színképében (188), majd később a SrO infravörös sávrendszerében (202), valamint a CaO színképében mutatkozó számos perturbációból nemcsak az egyes perturbáló termek állandóinak kiszámítása, hanem a perturbáló termrendszerek egész termszkémáinak felállítása is. Ettől kezdve alkalmazták ezt az eljárást széles körben kiváló eredménnyel. Főként ennek alapján alakult ki később az a már 25 éve tartó tudományos együttműködés a magyar és a svéd kutatócentrumok között, mely közös publikációban (188), kölcsönös tapasztalatcserében, a svéd kísérleti kutatók által felvetett elméleti problémák megoldásában (201, 202) és egymás eredményeinek kölcsönös felhasználásában nyert kifejezést.

A KFKI 1950-ben történt megalakításakor Kovács létrehozott ott egy Spektroszkópiai Osztályt, ahol Budó és Kovács irányítása mellett, *Mátrai Tibor* vezetésével (Deézsi Irén, M. Koczkás Edit) tovább folyt a Schmidék által elkezdett és nagy sikerrel folytatott kísérleti molekulaspektroszkópia (204, 205, 207—213), amelynek során Budó és Kovács az SrO molekula kék sávjairól közös kísérleti munkát is közzétettek (189). Itt a munkát 1958-ig végezték, majd ezután a kutatások a Műegyetem Atomfizikai Tanszékén folytatódtak főleg a BiO, SrO, NO, CsD molekulák színképeinek kísérleti vizsgálatával (214—216, 220, 221, 223).

1937-től 1954-ig Kovács részben egyedül, részben Budóval együttműködve vizsgálta a különböző típusú és muktiplicitású termek közötti perturbációkat (126, 127, 132, 134—137, 185, 188), magasabb multiplicitású átmenetek során kialakuló intenzitásviszonyokat (128, 184), magasabb multiplicitású termek finomszerkezetét (187, 131, 133) és az ún. lambda-típusú dublett felbomlásait (129), a predisszociáció egy különleges esetét, az ún. akcidentális predisszociációt (186), melyet 28 évvel később két amerikai kutató kísérletileg is megtalált, valamint tovább fejlesztette a perturbáló molekulatermek állandóinak meghatározására szolgáló eljárását (140, 143, 145, 146).

Ezután már főleg egyedül folytatta kutatásait. 1958-ban közzétett egy nagyobb terjedelmű, két részes munkát a spin-pálya kölcsönhatásról a kétatomos molekulákban (150, 151), amely világszerte nagy érdeklődést keltett, ma is számos esetben hivatkoznak rá. A következő években folytatta a molekulasávok intenzitás eloszlásával (154, 162, 170, 175, 190, 191, 193, 199), multiplett szerkezetével kapcsolatos elméleti kutatásait. Ez utóbbiak kapcsán az addig megállapított elméleti formuláktól (többek között a Budó-féle triplettformulától) mutatkozó eltérések elméleti értelmezését adta az addig tekintetbe nem vett kölcsönhatások, mint pl. a spin-spin, spin-pálya, spin-rotáció kölcsönhatás, valamint a centrifugális effektus figyelembe vételével. Elméleti megállapításait az O_2^+, NH, HgH, YO, N_2, PH, NO, PF, CO, TiO molekulák színképein igazolta (152, 153, 155—160, 164—166, 168, 169, 172, 174, 176, 192, 194, 196—198). Legutoljára pedig az irodalomban eddig észlelt legmagasabb multiplicitású term analitikailag már nem tárgyalható finomszerkezetét értelmezte *Pacher Pál*lal, számítógépes eljárás alkalmazásával az MnH molekulában (200).

Kovács István munkásságának gerincét a *kétatomos molekulák* színképeinek tanulmányozása alkotja. E téren nemcsak alapvető, hanem sok vonatkozásban úttörő munkát is végzett. A molekulák színképéből kiolvasható sajátságainak értelmezését jelentős mértékben kiterjesztette. Eredményeit egy több mint 300 oldalas — angol nyelven kiadott — műben összegezte, amely 1969-ben

jelent meg a budapesti Akadémiai Kiadó és a londoni A Hilger Kiadó együttműködéseként „Rotational Structure in the Spectra of Diatomic Molecules" címmel (A kétatomos molekulák színképének rotációs szerkezete) (173). Rövidesen az amerikai Elsevier Kiadó (New York) is kiadta e monográfiát. Ez a munka az első az irodalomban, amely rendszerezett áttekintést ad a kétatomos molekulák színképeinek rotációs szerkezetéről közölt tanulmányokról. Emellett azonban számos olyan eredményt is tartalmaz, amelyet szerzője állapított meg, de még más helyütt nem közölt. Így érthető, hogy Kovács István könyve nemzetközi feltűnést keltett, és hogy az egész molekulaspektroszkópia iskola összes tanulmányai közül a legtöbb, mintegy 150 azoknak a különböző szerzőktől eredő szakközleményeknek a száma, amelyek erre a könyvre már mint standard műre hivatkoznak. Érdemes talán ezek közül megemlíteni azt a hivatkozást, amelyben *P. Caroll* dublini spektroszkópus a könyvben első ízben megjelent elméleti intenzitáseloszlási formulákat alkalmazza az N_2 molekulában általa észlelt átmenetekre és ragyogó egyezést talált.

Külföldi szakemberek egyébként egyhangú elismeréssel adóztak mind a nagy rendszerezésért, mind a szerző saját eredményeiért. Így pl. *J. T. Hougen* méltatása G. Herzberg addig egyedülálló és standard műnek számító nagy monográfiájával helyezi egy szintre („Journal of Optical Society of America", *60*, 1268, 1970). Hasonló értelemben nyilatkozott a „Physics Today" hasábjain *W. Lichten* is. (*25*, 54, 1972.) *J. A. Pentin* pedig a következőket írja: „A kétatomos molekulák rotációs spektrumai általános elméletének alapjait már régen kidolgozták és kifejtették, pl. Herzberg jól ismert monográfiájában (Molecular Spectra and Molecular Structure I.), az elmúlt 20 év során azonban új, jelentős sikereket értek el ennek az elméletnek fejlődésében. *Kovács nagy elméleti munkájában megoldotta azt a feladatot, hogy általánosítsa és rendszerezze ezeket az eredményeket.*" (Novie Knigi za Rubezson, *4*, 101, 1970.)

Kovács István 1976-ig 50 önálló (134—183) és 25 társszerzővel (részben Budó Ágostonnal, részben másokkal) (184—200, 126—133) írt, összesen 75 közleményt (köztük 1 monográfiát) publikált. A Kovács István közreműködése, irányítása alatt készült munkák, illetve a tanítványok munkáinak száma 27 (19 kísérleti, 8 elméleti) (201—223, 34, 74, 78, 80), és a tanítványok 9 elméleti közleményben vettek részt társszerzőként.

Eredményeinek fontosságát, jelentőségét legjobban talán azzal mérhetjük le, hogy cikkeire a nemzetközi szakirodalomban közel 600 tanulmányban, közleményben hivatkoznak. Emellett szakmai tekintélyét jelzi többek között az is, hogy 1963-ban a VII. Európai Molekulaspektroszkópiai Kongresszust Budapestre hozták és annak megszervezésével, az MTA védnöksége alatt, őt bízták meg (163). Ezt követően számos, külföldön rendezett nemzetközi molekulaspektroszkópiai konferencia szervező bizottságába kérték fel közreműködőként, plenáris és szekció ülések elnökeként, valamint meghívott előadóként (171, 179). Számos hazai és külföldi tudományos szervezet választotta tagjai, illetve vezetői sorába, így többek között az Európai Fizikai Társaság Atomfizikai Diviziója és Kémiai Fizikai Szekciója Tanácsának tagja, Molekulafizikai Szekciójának elnöke, a Tiszta és Alkalmazott Fizika Nemzetközi Uniója (IUPAP) Spektroszkópiai Bizottságának, illetve Unióközi Spektroszkópiai Bizottságának tagja, a Magyar Tudományos Akadémia Spektroszkópiai Bizottságának elnöke stb. Munkássága során kapcsolatot teremtett a világ összes jelentős spektroszkópiai központjával, amelynek során sokszor kérik fel külföldön készült disszertációk bírálójának, valamint elméleti problémák megoldására (201—203, 217—219, 222), ami nem egyszer közös nemzetközi publikációkra vezet (svéd (188), francia (192), kanadai (199) szerzőkkel). Szovjet, indiai, francia, jugoszláv, arab kutatók keresik fel hosszabb, rövidebb tanulmányi időre, és ez szintén közös publikációkat eredményez (194—197). Ezenkívül igen sok külföldi meghívást kap, így többek között a Nobel-díjas G. Herzberg meghívására három hónapot töltött Ottawában a Nemzeti Kutatási Alap Intézetében, 1969-ben ugyanennyi időt Moszkvában a Szovjetunió Tudományos Akadémiája Spektroszkópiai Intézetében, 1972-ben egy hónapot Dublinban a Haladó Tudományok Intézetében, majd egy évvel később a Nobel-díjas A. Kastler felkérésére a Nemzetközi Elméleti Fizikai Központ 3 hónapos molekulaspektroszkópiai kurzusát szervezte meg Triesztben (mely Intézet levelező tagjává választotta), és ott maga is tartott előadásokat (180). Bejárta Európa úgyszólván minden országát, előadásokat tartott az ottani egyetemeken, intézetekben, konferenciákon (Párizs, Stockholm, Moszkva, Liege, Leningrád, Bologna, Jéna, Tours, Oxford, Koppenhága, Madrid, Prága, Bukarest, Belgrád, Wroclaw stb.), sőt Amerikán kívül még Indiában és Japánban is.

A molekulaszínképek terén végzett 40 éves kutatómunkája során elért eredményeiért, valamint a nagysikerű monográfiájáért a Kossuth-díj után kormányunk, felszabadulásunk harmincadik évfordulóján, 1975-ben az Állami Díj I. fokozatával tüntette ki.

*

A magyarországi molekulaspektroszkópiai iskola munkásságával kapcsolatosan 223 publikáció jelent meg, amely összesen 57 szerző műve, ezek közül 39 magyar és 18 külföldi.

IRODALOM

SCHMID REZSŐ MUNKÁSSÁGA

1. Schmid Rezső: A kékszínű cobaltchloridoldatokban foglalt complex összetételéről. — Disszertáció 1927.
2. R. Schmid: *a)* Über die Banden der dritten positiven Stickstoffgruppe. — Z. Phys. *49*, 428, 1928.

b) Az NO sávos színkép harmadik pozitív csoportjának sávjairól (γ-sávok). — Mat. és Termtud. Ért. *45*, 481, 1928.

3. R. Schmid: *a)* Über den Einfluss des magnetischen Feldes auf die Linien der NO-β Banden und über den Dublett-Charakter der NO-δ Banden. — Z. Phys. *59*, 42, 1929. *b)* A mágneses tér befolyásáról az NO-β sávok vonalaira; az NO-δ sávok kettős karakteréről. — Mat. és Termtud. Ért. *47*, 379, 1930.
4. R. Schmid: *a)* Über die Intensitätsverhältnisse der NO Banden — Z. Phys. *59*, 850, 1930. *b)* A nitrogénoxid sávjainak intenzitásviszonyairól — Mat. és Termtud. Ért. *47*, 366, 1930.
5. R. Schmid: *a)* Neuere Untersuchungen über die NO-β und γ-Banden — Z. Phys. *64*, 84, 1930. *b)* Újabb vizsgálatok az NO-β és γ-sávok szerkezetéről — Mat. és Termtud. Ért. *47*, 485, 1930.
6. R. Schmid: *a)* Über die NO δ Banden — Z. Phys. *64*, 279, 1930. *b)* A nitrogénoxid δ sávjairól — Mat. és Termtud. Ért. *47*, 534, 1930.
7. Schmid Rezső: A spektroszkópiai izotópmeghatározásokról — Magyar Chem. F. *36*, 1930.
8. Schmid Rezső: Az elektronizomériáról — Magyar Chem. F. *37*, 157, 1931.
9. R. F. Schmid: Zeeman Effect of the Third Positive Carbon Bands — Phys. Rev. *39*, 538, 1932.
10. R. F. Schmid: Excitation of the CO_2 Emission Spectrum in a Back Box. — Phys. Rev. *39*, 539, 1932.
11. R. F. Schmid: Rotational Analysis of Some CO_2 Emission Bands. Part I. — Phys. Rev. *41*, 732, 1932.
12. R. F. Schmid: Rotational Analysis of the First Negative Bands of the CO^+ Molecule. — Phys. Rev. *42*, 182, 1932.
13. R. Schmid: Über die Struktur und den Zeemaneffekt des CO_2 Emission-Dublettbandes bei 2900 Å. — Z. Phys. *83*, 711, 1933.
14. R. Schmid: Dublett und Staggering in den einfachen Emissionsbanden des Kohlenoxydspektrums. — Z. Phys. *85*, 384, 1933.
15. R. Schmid: Zeeman-Effekt an Triplettbanden Einfluss des Magnetfeldes auf die Linien der dritten positiven Kohlenoxydbanden. — Z. Phys. *89*, 701, 1934.
16. R. Schmid: Zur Deutung der Beobachteten Zeemaneffekte der NO γ-und CO^+-Kometenschweifbanden. — Zeeman Verhandelingen 175, 1935.
17. R. Schmid: *a)* Über die Dissoziationsenergie des Kohlenoxyds. — Műegyetem B. és K. mérnöki oszt. Közl. *7*, 172, 1935. *b)* Vizsgálatok a szénatom kötőenergiájáról. — Mat. és Termtud. Ért. *54*, 769, 1936.
18. R. Schmid: Zur Deutung der Elektronenstossversuche an CO und Konsequenzen bezüglich der Bindungsenergiewerte C—C und H—C auf Grund der Annahme: D(CO) = 6,9 Volt. — Z. Phys. *99*, 274, 1936.
19. R. Schmid: Über die Dissotiationsprodukte des CN Moleküls auf Grund der vorgeschlagenen Dissoziationsenergie CO 6,9 Volt. — Z. Phys. *99*, 562, 1936.
20. R. Schmid: Zur Deutung der Stosspotentiale von C^+ und C^{++} Ionen im CO_2 Gas auf Grund der Annahme D(CO) = 6,9 Volt. — Z. Phys. *99*, 626, 1936.
21. R. Schmid: Zeeman Effect in the Atmospherie Oxygen Bands. Production of a Strong Magnetic Field over a Length of 80 cm. — Phys. Rev. *19*, 271, 1936.
22. R. Schmid: Zur Prädissoziationsgrenze des CO bei 11,6 Volt. — Phys. Z. *37*, 55, 1936.
23. B. Pogány, R. Schmid: *a)* Über den Einfluss des Magnetfeldes auf die Bandenlinien der dritten positiven Sticksoffgruppe. — Z. Phys. *49*, 162, 1928. *b)* Az NO sávos színkép ún. harmadik pozitív csoportjához tartozó sávok vonalainak Zeeman jelenségéről. — Mat. és Termtud. Ért. *45*, 472, 1928.
24. B. Pogány, R. Schmid: *a)* Über die Intensität der NO-γ Banden — Z. Phys. *54*, 779, 1929. *b)* Az NO γ-sávok intenzitásáról. — Mat. és Termtud. Ért. *46*, 677, 1929.
25. R. Schmid, T. Neugebauer, D. Farkas, Charlotte Barabás: Die Gültigkeit der Hill und Vleckschen Intensitätsformeln für die NO- Banden. — Z. Phys. *65*, 541, 1930.
26. E. Bródy, T. Millner, R. Schmid: *a)* Die Verschiebung der relativen Konzentration der paramagnetischen ($^2\Pi_{3/2}$) und diamagnetischen ($^2\Pi_{1/2}$). — Moleküle in Stickoxydgas — Z. Phys. *68*, 395, 1931. *b)* A paramágneses ($^2\Pi_{3/2}$ elektronállapotú) és diamágneses ($^2\Pi_{1/2}$ elektronállapotú) molekulák viszonylagos mennyiségének a hőmérséklettel való eltolódásáról nitrogénoxidgázban. — Mat. és Termtud. Ért. *48*, 417, 1931.
27. R. Schmid, L. Gerő: Zur Rotationsanalyse der $^2\Sigma \rightarrow {}^2\Sigma$ und $^2\Pi - {}^2\Sigma$ Banden des CO^+. — Z. Phys. *86*, 297, 1933.
28. R. Schmid, L. Gerő: Über den Zeemaneffekt der Kometenschweifbanden. — Z. Phys. *86*, 314, 1933.
29. R. Schmid, L. Gerő: Über $B^1\Sigma \rightarrow A\ ^1\Pi$ und $C^1\Sigma \rightarrow$ $\rightarrow A\ ^1\Pi$ Banden des Kohlenoxyds. — Z. Phys. *93*, 656, 1935.
30. R. Schmid, L. Gerő: Über den Zeeman Effekt der Störungsstellen des $A\ ^1\Pi$ Zustanden in CO. — Z. Phys. *94*, 386, 1935.
31. R. Schmid, L. Gerő: Zur Struktur der 5 B-Banden des CO-Spektrums. — Z. Phys. *96*, 198, 1935.
32. R. Schmid, L. Gerő: Prädissoziation am $C^1\Sigma$ Zustand des CO. — Z. Phys. *96*, 546, 1935.
33. R. Schmid, L. Gerő: Prädissoziation am $A\ ^1\Pi$-Zustand des CO. Dissoziationsenergie des Kohlenoxyds bei 6,9 Volt. — Z. Phys. *99*, 281, 1936.
34. R. Schmid, L. Gerő: Über die Rotationskonstanten der IV. Pos. CO Banden. — Z. Phys. *101*, 343, 1936.
35. R. Schmid, A. Budó (mit Versuchsergebnissen der Dissertation von Jolanthe Zemplén): Über den Zeeman-Effekt der atmosphärischen Sauerstoffbandenlinien. — Z. Phys. *103*, 250, 1936.
36. R. Schmid, L. Gerő: Über die Grenzkurve der Dissoziation an Bandenspektroskopischer Grundlage. — Z. Phys. *104*, 724, 1937.
37. R. Schmid, L. Gerő: Zur Vervollständigung des Termschemas von Kohlenoxyd I. Schwingungsterme und Rotationskonstanten des $a'\ ^3\Sigma^+$-Zustandes. — Z. Phys. *105*, 36, 1937.
38. R. Schmid, L. Gerő: Zur Vervollständigung des Termschemas von Kohlenoxyd II. — Z. Phys. *106*, 205, 1937.
39. R. Schmid, L. Gerő: *a)* Dissoziationsenergie des Kohlenoxyds. — Z. Phys. Chem. B. *36*, 105, 1937. *b)* Die Verdampfungswärme des Kohlenstoffs. — Műegy. B. és K. mérnöki oszt. Közl. *9*, 173, 1937.
40. R. Schmid, L. Gerő: Rotabschattierte Banden des CO in der Gegend von 2670—3310 Å. — Die Naturwissenschaften *25*, 90, 1937.
41. R. Schmid, L. Gerő: Lichtstarke Emissionsaufnahmen der $a\ ^3\Pi \rightarrow X^1\Sigma$ (Cameron) Interkombinationbandes des CO, unter hoher Dispersion. — Die Nauturwissenschaften *25*, 90, 1937.
42. R. Schmid, L. Gerő, J. Zemplén: *a)* Das Dissoziations-schema des CN-Moleküls. — Die Naturwissenschaften *24*, 558, 1937. *b)* Dissociation Energy of the CN Molecule. — Proc. Phys. Soc. London *50*, 283, 1938. *c)* A cianmolekula disszociációs energiájának meghatározása. — Mat. és Termtud. Ért. *57*, 189, 1938.
43. R. Schmid, L. Gerő: *a)* Rotational Analysis of the „3*A*" Bands of CO — Nature *139*, 928, 1937. *b)* A szénmonoxid „3*A*" sávrendszerének rotációs analízise. — Mat. és Termtud. Ért. *56*, 854, 1937.
44. R. Schmid, L. Gerő: *a)* Structure of a New System of CO Bands. — Nature *140*, 508, 1937. *b)* A szénoxyd új sávjairól. — Mat. és Termtud. Ért. *57*, 625, 1938.

45. Schmid Rezső, Gerő Loránd: A szénoxid molekula energiaállapotairól. — Mat. és Termtud. Ért. *55*, 691, 1937.
46. Schmid Rezső, Gerő Loránd: Széntartalmú vegyületek és gyökök képződési és disszociációs energiáiról. — Mat. és Termtud. Ért. *56*, 865, 1937.
47. R. Schmid, L. Gerő: Über die graphische Darstellung der Energiezustände eines zweiatomigen Moleküls auf Grund von bandenspektroskopisch erforschten Daten. — Ann. d. Phys. *33*, 70, 1938.
48. R. Schmid, L. Gerő: Über das Dissoziationsschema einiger Metallhydride. — Die Naturwissenschaften *26*, 108, 1938.
49. R. Schmid, L. Gerő: Prädissoziation in CO Spektrum bei 8,83 Volt. — Phys. Z. *39*, 460, 1938.
50. R. Schmid, L. Gerő, Katalin Lőrinczi, G. Neu: Revision of Al I Terms. — Nature *141*, 1017, 1938.
51. Schmid Rezső, Gerő Loránd: Széntartalmú vegyületek és gyökök képződési és disszociációs energiáiról II. — Mat. és Termtud. Ért. *57*, 637, 1938.
52. R. Schmid, L. Gerő: *a)* Dissociation Energy of the NO Molecule — Dissociation Energy of the N_2 Molecule. — Csillagászati Lapok *6*, 101, 1943. *b)* A nitrogénoxyd molekula energiaállapotairól. — Mat. és Termtud. Ért. *62*, 101, 1943. *c)* Az N_2 molekula disszociációs energiája. — Mat. és Termtud. Ért. *62*, 416, 1943.
53. R. Schmid, L. Gerő: *a)* Homogene Störungen im Bandenspektrum des Silberhydrids. — Die Naturwissenschaften *30*, Heft 50/51, 1942. *b)* Homogeneous Perturbations in Band Spectrum of AgH Molecule. — Phys. Rev. *70*, 226, 1946.
54. R. F. Schmid, L. Gerő (MS received from J. G. Valatin and communicated by W. Jevons 1946): Photochemical Decomposition of CO. — Proc. Phys. Soc. *58*, 701, 1946.
55. L. Bozóky, R. Schmid: Additional First Negative Oxygene Bands. — Phys. Rev. *48*, 465, 1935.
56. L. Bozóky, R. Schmid: Zeeman Effect in the First Negative Oxygen Bands. — Phys. Rev. *48*, 466, 1935.

Lásd még a következő társszerzős publikációkat: 100., 101., 103—118, összesen 18 db.

SCHMID REZSŐ javaslatára, közreműködésével készült dolgozatok, valamint a tanítványok munkássága:

a) kísérleti munkák

57. Farkas Dénes: Újabb vizsgálatok az NO γ-sávjainak finomszerkezetéről. Disszertáció 1929.
58. Kőnig Theodora: Újabb vizsgálatok az NO β-sávjainak finomszerkezetéről. Disszertáció 1930.
59. Cavalloni Ferenc: *a)* Intenzitásmérések az aktív nitrogén $N_2\,\alpha$ és NO β-sávjain. Disszertáció 1932. *b)* Über die Verteilung der Intensitäten in den $N_2\,\alpha$-und NO β-Banden. — Z. Phys. *76*, 527, 1932.
60. F. Cavalloni: Über die Relativen Intensitäten der Bandes des $N_2\,\alpha$-Systems, gemessen im Vakuumbogen und im Nachleuchten des aktiven Stickstoffes. Anregungsfunktion des Stickstoffnachleuchtens. — Z. Phys. *90*, 342, 1934.
61. Balázs Júlia: A NO és CO^+ molekula $^2\Sigma—^2\Pi$ sávjainak Zeeman-effektusa. — Bud. Asztr. Obsz. Csill. Ért. *1*, Disszertáció 1935.
62. Kelemen Szulpic: Újabb vizsgálatok a szénmonoxid molekula IV. pozitív sávrendszeréről. — Pann. Füz. *18*, Disszertáció 1936.
63. Zemplén Jolán: Az atmoszférikus oxigénsávok Zeeman jelenségéről. — Mat. és Term. Ért. *55*, 373, 1936. Disszertáció
64. Bozóky László: Újabb vizsgálatok az ionizált oxigén-molekula sávos színképén. — Mat. és Term. tud. Ért. *54*, 557, 1936. Disszertáció
65. L. v. Bozóky: Rotationsanalyse von 0_2^+-, $^2\Pi \rightarrow {}^2\Pi$-Banden. — Z. Phys. *104*, 275, 1937.
66. Beer Borbála Zsuzsanna: A két szabad vegyértéket mutató CO-módosulat színképéről. — Mat. és Term. tud. Ért. *56*, 525, 1937.
67. B. S. Beer: Rotationsanalyse der 0 → 4-, 0 → 5-, 1 → 4- und 1 → 5-Banden des III. pos. CO-Systems. — Z. Phys. *107*, 73, 1937.
68. Lőrinczi Katalin: Újabb vizsgálatok a nemesgázok színképvonalainak Zeeman jelenségéről. — Mat. és Term. tud. Ért. *56*, 158, 1937.
69. Katalin Lőrinczi: Über die g-Faktoren der Edelgasterme der d-Elektronen enthaltenden Konfigurationen. — Z. Phys. *109*, 175, 1938.
70. Scheffer Károly: A CH gyök disszociációjának spektroszkópiai vizsgálata. Disszertáció 1939.
71. Szabó Ferenc: Az aktivált szénmonoxidmolekula disszociációjának spektroszkopikus vizsgálata. Disszertáció 1939.
72. Jegesi Edit: A nitrogénmolekula IV. pozitív sávrendszerének finomszerkezeti analízise. Disszertáció 1940.
73. Fischmann Éva: A carbondeuterid molekula színképéről. Disszertáció 1941.
74. Bródy Éva: Perturbációk a C_2 molekula színképén. Disszertáció 1942.
75. Mészáros Károly: Homogén perturbációk befolyása a molekulaszínképek izotópia felbontására. Disszertáció 1943.
76. Doktorits István: Rezonancia jelenségek (perturbációk) az ezüsthidrid molekula színképén. Disszertáció 1943.
77. Szily Frigyes Kelemen: A nitrogénoxid molekula disszociációs energiájának spektroszkopikus meghatározásáról. Disszertáció 1943.
78. Ballenegger Katalin: Perturbáció és predisszociáció a nitrogénoxid molekula sávos színképén. — Mat. és Fiz. Lapok *51*, Disszertáció 1944.

b) elméleti munkák

79. Singer István: Spin-átmenetek homogén magnetosztatikus és reá merőleges rádiófrekvenciás elektromos, illetve mágneses térbe helyezett gázban. Disszertáció 1941.
80. Gáspár Rezső: Intenzitáseloszlás az AgH molekula $^1\Sigma—^1\Sigma$ perturbált sávrendszerében. — Mat. és Fiz. Lapok *50*, Disszertáció 1943.
81. Valatin János: A kétatomos molekula tárgyalása a kétcentrumrendszer nélkül. Disszertáció 1943.
82. J. G. Valatin: Electronic States and Potential Curves of Diatomic Molecules. — Proc. Phys. Soc. *58*, 695, 1946.
83. J. G. Valatin: Addendum to Discussion on the Paper by R. F. Schmid and L. Gerő entitled „Photochemical Decomposition of CO". — Proc. Phys. Soc. *58*, 701, 1946; *59*, 502, 1947.

Lásd még a következő dolgozatokat: 84., 120—123., 126., 127., 134—137, összesen 11 db.

GERŐ LORÁND MUNKÁSSÁGA

84. Gerő Loránd: Új módszer perturbációk felismerésére a molekulák színképein különös tekintettel a szénmonoxid $A^1\Pi$ energianívójára. Disszertácó 1935.
85. L. Gerő: Über den $A^1\Pi$-Zustand des CO. — Z. Phys. *93*, 669, 1935.
86. L. Gerő: Störung und Predissotiation im $b^3\Sigma$-Term des CO-Bandspektrums. — Z. Phys. *95*, 747, 1935.
87. Gerő Loránd: Új eljárás alkalmazása perturbációk felismerésére a CS, CO^+ és N_2 molekulák színképén. — Mat. és Term. Ért. *53*, 331, 1935.
88. L. Gerő: Zur Deutung der Störungen in den zweiten positiven Stickstoffbanden. — Z. Phys. *96*, 669, 1935.

89. L. Gerő: Über $A^1\Pi \rightarrow X^1\Sigma$-(IV. Pos.) Kohlenoxydbanden I. — Z. Phys. *99*, 52, 1936.
90. L. Gerő: Über $A^1\Pi \rightarrow X^1\Sigma$-(IV. Pos.) Kohlenoxydbanden II. — Z. Phys. *100*, 374, 1936.
91. L. Gerő: Rotationsanalyse der (1,0) $b^3\Sigma \rightarrow a^3\Pi$ CO-Banden. — Z. Phys. *101*, 311, 1936.
92. L. Gerő: Rotationsanalyse des $a^3\Pi \rightarrow X^1\Sigma$-CO-Bandensystems. — Z. Phys. *109*, 204, 1938.
93. L. Gerő: Rotationsanalyse des $c^3\Sigma^+ \rightarrow a^3\Pi$-CO-Bandensystems. — Z. Phys. *109*, 210, 1938.
94. L. Gerő: Rotationsanalyse von $a^3\Sigma^+ \rightarrow a^3\Pi$-Banden des CO. — Z. Phys. *109*, 216, 1938.
95. L. Gerő: Über Struktur der Triplettbanden ($d^3\Pi \rightarrow a^3\Pi$) des Kohlenoxyds. — Ann. d. Phys. *53*, 597, 1939.
96. L. Gerő: Dissoziationsschema von einigen zweiatomigen Hydrid- und Deuterid-Molekülen. — Physica *7*, 155, 1940.
97. L. Gerő: Zur Vervollständigung des Termschemas von Bleihydrid. — Z. Phys. *116*, 379, 1940.
98. L. Gerő: Das Bandenspektrum des CD-Moleküls. — Z. Phys. *117*, 709, 1941.
99. L. Gerő: Vervollständigung der Analyse der CH-Banden. — Z. Phys. *118*, 27, 1941.
100. L. Gerő, G. Herzberg, R. Schmid: On the Cameron Bands ($^3\Pi - {}^1\Sigma$) of Carbon Monoxide. — Phys. Rev. *52*, 467, 1937.
101. L. Gerő, R. Schmid: Über die Dissoziationsschemata der Zweiatomigen Hydride und Deuteride. — Z. Phys. *111*, 588, 1939.
102. L. Gerő, Katalin Lőrinczi: Rotationsanalyse der $a'^3\Sigma^+ \rightarrow a^3\Pi$-CO-Banden. — Z. Phys. *113*, 449, 1939.
103. L. Gerő, R. Schmid: Zur Vervollständigung des Termschemas von Kohlenoxyd III. — Z. Phys. *112*, 676, 1939.
104. L. Gerő, R. Schmid: Über die Dissoziationsschemata der zweiatomigen Hydride und Deuteride II. — Z. Phys. *115*, 47, 1940.
105. L. Gerő, R. Schmid: Über die Deutung der Störungen in Stickstoffbanden. — Z. Phys. *116*, 246, 1940.
106. L. Gerő, R. Schmid: Rotationsanalyse der IV. positiven Banden des N_2 Moleküls. (Zugleich Messergebnisse der Dissertation von Edith Jegesi enthaltend) — Z. Phys. *116*, 598, 1940.
107. L. Gerő, R. Schmid: Prädissoziationserscheinungen in den CH- und CD-Banden. — Z. Phys. *118*, 210, 1941.
108. L. Gerő, R. Schmid: Über Dissoziation isotoper Moleküle. — Z. Phys. *118*, 250, 1941.
109. L. Gerő, R. F. Schmid: Rotational Analysis, Perturbation und Predissociation in the CD und CH Bande — Phys. Rev. *59*, 528, 1941.
110. L. Gerő, R. Schmid: *a)* Vibrational Analysis of CD and CH Bands in the Region of 2260—2500 Å. — Phys. Rev. *60*, 363, 1941. *b)* Schwingungsanalyse von ultravioletten CD- und CH Banden. — Die Naturwissenschaften *29*, 504, 1941.
111. L. Gerő, R. F. Schmid: Isotope Effect in the Predissociation Phenomena of the CH and CD Molecules. — Phys. Rev. *60*, 911, 1941.
112. L. Gerő, R. Schmid: Über die „isolierte Liniengruppe" in den 4300 Å-Banden im CH- und CD-Spektrum. — Die Naturwissenschaften *29*, 239, 1941.
113. L. Gerő, R. Schmid: *a)* On Perturbations Causing Apparent Convergence in the C_2 Spectrum. — Phys. Rev. *62*, 82, 1942. *b)* Über eine angebliche Konvergenzgrenze im C_2-Spektrum. — Die Naturwissenschaften *30*, Heft 27, 1942.
114. Gerő Loránd, Schmid Rezső: A spektrális termek egymáshozrendelése és a potenciálgörbék át nem metszésének hipotézise. — Mat. és Termtud. Ért. *61*, 835, 1942.
115. L. Gerő, R. Schmid: Über das Bandenspektrum des Silberhydrids (Zugleich Messergebnisse der Dissertationen von I. Doktorits und K. Mészáros enthaltend. — Z. Phys. *121*, 459, 1943.
116. L. Gerő, R. Schmid, K. F. von Szily: *a)* Über das ε-Bandensystem des NO-Moleküls. — Die Naturwissenschaften *31*, Heft 16/19, 1943. *b)* Rotationsanalyse der ε-Banden des NO-Moleküls. — Physica *11*, 144, 1944.
117. Gerő Loránd, Schmid Rezső: Disszociációs kontiniumok észlelésének feltételeiről. — Mat. és Term. tud. Ért. *62*, 384, 1943.
118. L. Gerő, R. Schmid: (MS. communicated by J. G. Valatin after the death of both authors: received 25. June 1947. — Proc. Phys. Soc. *60*, 533, 1948.

Lásd még a következő társszerzős dolgozatokat: 27—34., 36—54. összesen 27 db.

Gerő Loránd is részt vett tanácsaival a következő dolgozatok elkészítésében: 62., 66—78., 80—83., 134. összesen 19 db.

BUDÓ ÁGOSTON MUNKÁSSÁGA

119. A. Budó: Intensitätsverteilung in den Zeemankomponenten von $^2\Sigma - {}^2\Pi$ Banden. — Zeeman Verhandelingen, Haag, 166, 1935.
120. A. Budó: Über die Triplett-Bandentermformel für den allgemeinen intermediären Fall. — Z. Phys. *96*, 219, 1935.
121. A. Budó: Die Rotationskonstanten B, D und Y der $^3\Pi$-Terme von TiO, C_2, CO, PH, AlH, NH. — Z. Phys. *98*, 437, 1936.
122. A. Budó: A triplett molekulatermekről és a triplett sávok intenzitásáról. — Mat. és Term. tud. Ért. *54*, 387, 1936.
123. A. Budó: Rotationsstruktur von $^4\Sigma - {}^4\Pi$-Banden. — Z. Phys. *105*, 73, 1937.
124. A. Budó: Intensitätsformeln für die Triplettbanden. — Z. Phys. *105*, 579, 1937.
125. Budó Ágoston: Matematikai módszerek a molekulafizika egyes területein. — Mat. és Term. tud. Közl. *1*, 173, 1951.
126. A. Budó, I. Kovács: Über die Singulett-Triplettstörungen in Bandenspektren. — Z. Phys. *109*, 393, 1938.
127. A. Budó, I. Kovács: Über die Störungen zwischen Σ-Termen von verschiedener Multiplizität. — Z. Phys. *111*, 633, 1939.
128. A. Budó, I. Kovács: Intensitätsverteilung in den Quartett-Dublettbanden I. — Z. Phys. *116*, 639, 1940.
129. A. Budó, I. Kovács: Über die Λ-Verdoplung der $^4\Pi$-Terme. — Phys. Zeitschr. *45*, 122, 1944.
130. Budó Ágoston, Kovács István: Molekulaszínképek — Mérnöki Továbbképző Intézet kiadv., G. 86, 1948.
131. A. Budó, I. Kovács: On the Fine Structure of $^4\Sigma$-States of Diatomic Molecules. — Hung. Acta Phys. *1*, 7, 1948; Phys. Rev. *73*, 1120, 1948.
132. A. Budó, I. Kovács: Über die Störungen in Bandenspektren. — Acta Phys. Hung. *1*, 84, 1951.
133. A. Budó, I. Kovács: *a)* Über den $^4\Pi$-Zustand des O_2^+-Moleküls. — Acta Phys. Hung. *4*, 273, 1955; Exp. Techn. Phys. *3*, 1, 1956. *b)* Vizsgálatok az O_2^+ molekula $^4\Pi$ energiaállapotán. — M. Fiz. Folyóirat *3*, 67, 1955.
c) On the $^4\pi$ State of the O_2^+ Molecule. — Journ. Chem. Phys. *23*, 751, 1955.

Lásd még a következő társszerzős munkákat: 35., 184., 186., 187., 189. összesen 5 db.

Budó Ágoston is részt vett tanácsaival a következő dolgozatok elkészítésében: 204 a, b.

KOVÁCS ISTVÁN MUNKÁSSÁGA

134. Kovács István: Kétatomos molekulatermek állandóinak meghatározása a perturbáció alapján. — Mat. és Term. tud. Ért. *56*, 126, 1937.
135. I. Kovács: Über die Berechnung der Rotationskonstanten von zweiatomigen Molekültermen auf Grund von Störungsdaten. — Z. Phys., *106*, 431, 1937.
136. I. Kovács: Über die Triplett-Triplettstörungen in Bandenspektren. — Z. Phys. *109*, 387, 1938.
137. I. Kovács: Über die Störungen zwischen Σ-Termen von gleicher Multiplizität. — Z. Phys., *111*, 640, 1939.
138. Kovács István: A kétatomos molekulák elméletének alapjai. — Mat. Fiz. Lapok *48*, 334, 1941.
139. Kovács István: Különböző molekuláris vektorkapcsolódások elmélete I. — Mat. és Term. tud. Ért. *61*, 533, 1942.
140. I. Kovács: Über die Berechnung der Rotationskonstanten von zweiatomigen Molekültermen auf Grund von Störungsdaten. II. — Acta Phys. Hung. *1*, 97, 1951., KFKI. közl. *1*, 4, 1953.
141. Kovács István: Harmadfokú szekuláris egyenletek közelítő megoldásának fizikai alkalmazásai. — Mat. és Term. tud. Közl. *1*, 181, 1950.
142. Kovács István: Vizsgálatok a stronciumoxid kék sávjain. — MTA III. (Mat. Fiz.) Oszt. Közl. *2*, 41, 1952.
143. Kovács István: Általánosított eljárás a perturbáló molekulatermek állandóinak kiszámítására a perturbációs adatok alapján. — MTA III. (Mat. Fiz.) Oszt. Közl. *2*, 161, 1952., KFKI. Közl. *1*, 4, 1953.
144. Kovács István: A Központi Fizikai Kutató Intézet. — Fiz. Szemle, *2*, 29, 1952.
145. Kovács István: Újabb eljárás a perturbáló molekulatermek állandóinak meghatározására. — Fizikai Szemle *2*, 155, 1952.
146. I. Kovács: Über die Berechnung der Rotationskonstanten von zweiatomigen Molekültermen auf Grund von Störungsdaten III. — Acta Phys. Hung. *2*, 141, 1952.
147. Kovács István: Újabb magyar eredmények a spektroszkópia terén. — Magy. Fiz. Foly. *2*, 197, 1954.
148. Kovács István: A Központi Fizikai Kutató Intézet szerepe a felszabadulás utáni magyar fizika kialakításában. — A Magyar Tudomány Tíz Éve, Bp. 1955.
149. I. Kovács: Razvitije fizicseszkih iszledovanyij v Vengrii. — Veszt. Ak. Nauk SzSzSzR *4*, 1956.
150. I. Kovács: On the Spin-Orbit Interaction in Diatomic Molecules I. — Can. J. Phys. *36*, 309, 1958.
151. I. Kovács: On the Spin-Orbit Interaction in Diatomic Molecules II. — Can. J. Phys. *36*, 329, 1958.
152. I. Kovács: On the Structure of Multiplet States in Diatomic Molecules (With an application for the $^7\Sigma$ State of the MnH Molecule). — Proc. Roy. of the Ir. Acad. *60A*, 15, 1958.
153. I. Kovács: On the Role of Spin-Spin Interaction in the Multiplet Splitting of the $^4\Pi$ State of the O_2^+ Molecules. — Acta Phys. Hung. *10*, 255, 1959., Advances in Molecular Spectroscopy, Pergamon Press, 251, 1961.
154. I. Kovács: Intensities in Σ-Δ and Π-Δ Transitions of Diatomic Molecules. — Can. J. Phys. *38*, 955, 1960.
155. On the $A^3\Pi$ State of the NH Molecule. — Acta Phys. Hung. *12*, 67, 1960.
156. I. Kovács: Investigations of the $^3\Pi$ State of the PH Molecules. — Acta Phys. Hung. *13*, 303, 1961.
157. I. Kovács: O vazajmodejsztvij mezsdu vrascsonjem i szpinom v dvuhatomnik molekulah. — Zsurn. Opt. i Spectr. *12*, 17, 1962.
158. I. Kovács: Similarity between the Spin-Spin and Spin-Orbit Interactions in the Diatomic Molecules. — Phys. Rev. *128*, 663, 1962.
159. I. Kovács: On the Anomalous Splitting of the Multiplet Σ States in Diatomic Molecules I. (With an Application to the HgH, YO, N_2 Molecules. — Acta Phys. Hung. *14*, 1962. — Bol. Scient. della Fac. di Chim. Ind. di Bologna, *21*, 44, 1963.
160. I. Kovács: On the Anomalous Splitting of the Multiplet Σ States in Diatomic Molecules II. — Acta Phys. Hung. *15*, 337, 1963.
161. I. Kovács: On the $H^2\Sigma^+ - H'^2\Pi$ perturbations of the NO Molecule. — Helv. Phys. Act. *36*, 699, 1963.
162. I. Kovács: Intensity Formulae for $^3\Delta - ^3\Pi$ Bands. — Nuov. Cim. *29*, 1088, 1963.
163. Kovács István: VII. Európai molekulaspektroszkópiai kongresszus, Budapest 1963. — Magy. Tud. 774, 1963; Fiz. Szemle *13*, 385, 1963.
164. I. Kovács: Some New Results in the Spectroscopical Investigation of Diatomic Molecules. — Act. Phys. Hung. *17*, 67, 1964.
165. I. Kovács: Rotational Fine Structure of the $^3\Pi$ State of PF. — Can. J. Phys. *42*, 2180, 1964.
166. I. Kovács: The Rotational Structure of the $d^3\Delta$ State of the CO Molecule. — Acta Phys. Hung. *18*, 105, 1965.
167. Kovács István: Pieter Zeeman. — Fiz. Szemle *14*, 161, 1965.
168. I. Kovács: On the Triplet Terms of the TiO Molecule. — J. Mol. Spectr. *18*, 229, 1965.
169. I. Kovács: Rotational Fine Structure of Diatomic Molecules. — Rev. Roum. de Chim. *10*, 1173, 1965.
170. I. Kovács: Formulae of the Rotational Intensity Distribution for the Triplet Transitions in the Diatomic Molecules. — Astrophys. J. *146*, 634, 1966.
171. I. Kovács: VIII. European Congress on Molecular Spectroscopy, Copenhagen 1965. — Appl. Opt. *5*, 126, 1966.
172. I. Kovács: Rotational Structure of the Spectra of Diatomic Molecules. — International Conference on Spectroscopy, Bombay 1967, 101. 1967.
173. I. Kovács: Rotational Structure in the Spectra of Diatomic Molecules. *a)* Akadémiai Kiadó, Budapest és Adam Hilger Ltd., 1969. *b)* American Elsevier Publ. Comp., New York 1969. pp. 320.
174. I. Kovács: General Forms of the Centrifugal Terms in the Rotational Spectra. — Acta Phys. Hung. *27*, 5, 1969.
175. I. Kovács: On the Intercombination Transition in N_2 Molecule. — Optika i Spektroskopia *28*, 444, 1970.
176. I. Kovács: Centrifugal Distortions and Multiplet Structure. — Acta Phys. Hung. *32*, 5, 1972.
177. Kovács István: Gerhard Herzberg az 1971-es kémiai Nobel-díj nyertese. — Fiz. Szemle *22*, 94, 1972.
178. Kovács István: Az atomszínképek szerepe az atomszerkezet megismerésében. — Fiz. Szemle, *23*, 65, 1973.
179. I. Kovács: XIth European Congress on Molecular Spectroscopy, Tallin 1973. — Europhys. News. *4*, Nr. 7. 1973.
180. I. Kovács: Foundation of the Theory of Diatomic Molecules. — Int. Atom. Energy Agency-SMR-12/11, 377, 1974. Vienna
181. I. Kovács: Molecular Spectroscopy. — Buduscse Nauki, Moszkva, 80, 1975.
182. Kovács István: Gustav Hertz (1887—1975) emlékezete és az atomelmélet kialakulása. — Fiz. Szemle, *26*, 1976. és Magy. Tud. *21*, 1976.
183. I. Kovács: Singlet-Triplet Perturbation in the Spectra of Diatomic molecules. — Acta Phys. Hung. *39*, 1976.
184. I. Kovács, A. Budó: Intensitätsverteilung in den Quartett-Dublett Banden II. — Z. Phys. *117*, 612, 1941.
185. I. Kovács, S. Singer: Über die Wechselwirkung von drei Spektraltermen. — Phys. Z. *43*, 362, 1942.
186. I. Kovács, A. Budó: On the Theory of Accidental Predissociation. — J. Chem. Phys. *15*, 166, 1947.
187. I. Kovács, A. Budó: Zur Theorie der Molekülterme und ihrer Zeeman-Aufspaltung im intermediären Hunschen Kopplungsfall b—d. — Hung. Act. Phys. *1*, 1, 1949.

188. I. Kovács, A. Lagerqvist: *a)* Die Störungen in dem Bariumoxydspektrum. — Ark. f. Fys. *2*, 411, 1950. *b)* Perturbations in the BaO Spectrum J. Chem. Phys. *18*, 1683, 1950.
189. I. Kovács, A. Budó: Untersuchungen über die blauen Banden des SrO. — Acta Phys. Hung. *1*, 469, 1952., Ann. Phys. *12*, 17, 1953.
190. I. Kovács, O. Scari: Intensitätsverteilung in einer besonderen Interkombinationsbande. — Acta Phys. Hung. *8*, 425, 1958.
191. I. Kovács, O. Scari: Intensity Formulae for $^7\Pi - ^7\Sigma$ Band. — Acta Phys. Hung. *9*, 423, 1959.
192. I. Kovács, S. Weniger: Sur l'Interprétation de la Séparation Anomale des Componentes du Multiplet de l'état $^4\Pi$ de la Molécule d'Oxygéne Ionisée. — Journ. de Phys. et la Rad. *23*, 377, 1962.
193. I. Kovács, R. Török: The Intensity Distribution of the Triplet Bands of the CO Molecule. — Acta Phys. Hung. *18*, 104, 1965.
194. I. Kovács, V. M. Korvar: On the Anomalous Multiplet Splitting of the Triplet Terms of the N_2 Molecule. — Acta Phys. Hung. *29*, 85, 1970.
195. I. Kovács, V. M. Korwar: Re-investigation of the Coupling Constans of the Revised Molecular States of TiO. — Acta Phys. Hung. *29*, 399, 1970.
196. I. Kovács, V. M. Korwar: General Theory of the Rotational Structure of $^4\Sigma$ States of Diatomic Molecules I. — J. Phys. B. *4*, 759, 1971.
197. I. Kovács, B. Vujisich: Centrifugal Distortion of the Spin-Orbit and Spin-Rotation Interaction for Doublet Terms. — J. Phys. B. *4*, 1123, 1971.
198. I. Kovács, P. Pacher: General Theory of the Rotational Structure of $^4\Sigma$ States of Diatomic Molecules II. — J. Phys. B. *4*, 1633, 1971.
199. E. E. Whiting—J. A. Paterson—I. Kovács—R. W. Nicholls: Computer Checking of Rotational Line Intensity Factors for DiatomicTransitions. — J. Mol. Spectr. *47*, 84, 1973.
200. I. Kovács—P. Pacher: Fine Structure of $^7\Sigma$ and $^7\Pi$ States in Diatomic Molecules. — J. Phys. B. *8*, 796, 1975.

Lásd még a következő társszerzős munkákat: 126—133. összesen 8 db.

KOVÁCS ISTVÁN javaslatára, közreműködésével készült dolgozatok, valamint a tanítványok munkássága:

201. A. Lagerqvist, E. Lind, R. F. Barrow: The Band Spectrum of Barium Oxyde. — Proc. Phys. Soc. *63*, 1132, 1950.
202. G. Almkvist, A. Lagerqvist: Perturbations in the Infrared Bands of SrO. — Ark. f. Fys. *2*, 233, 1950.
203. A. E. Douglas, G. Herzberg: Predissosiation and Dissotiation of the N_2 Molecule. — Can. J. Phys. *29*, 294, 1951.
204. Deézsi Irén, Koczkás Edit, Mátrai Tibor: *a)* Újabb vizsgálatok a stronciumoxid kék sávjain. — Fiz. Szemle *2*, 156, 1952. *b)* Rotationsanalyse einiger blauen Banden des SrO-Moleküls. — Act. Phys. Hung. *3*, 98, 1953.
205. Scari Ottó: A bizmutoxid (BiO) molekula színképének vizsgálata. — Kandidátusi disszertáció, Bp. 1953.
206. Zs. Náray: Wellenmechanische Berechnung einiger Konstanten des HF-Moleküls. — Acta Phys. Hung. *3*, 259, 1954.
207. Deézsi Irén: Schmid Rezső tudományos munkássága. — Fiz. Szemle *5*, 178, 1955.
208. Deézsi Irén: A nitrogénoxid-molekula ún. γ-, ε-, β- és δ-sávjairól. — Magy. Fiz. Foly. *4*, 489, 1956.
209. O. Scari: *a)* Das Emissionsspektrum des BiO-Moleküls. — Acta Phys. Hung. *6*, 73, 1957. *b)* A BiO molekula emissziós színképe. — KFKI Közl. *2*, 13, 1954; *3*, 341, 1955.
210. Scari Ottó: Paschen-Runge típusú optikai rácsos spektrográfok jusztirozásáról. — KFKI Közl. *4*, 183, 1956.
211. I. Deézsi, T. Mátrai: *a)* Further Bands in the γ, ε and β-Band System of the Molecular Spectrum of Nitric Oxide. — Act. Phys. Hung. *7*, 111, 1957. *b)* Újabb sávok az NO-molekula színképének γ, ε- és β-sávrendszerében. — Magy. Fiz. Foly. *5*, 201, 1957.
212. I. Deézsi: A recent Rotational Analysis of the γ Bands of the NO Molecule. — Acta Phys. Hung. *9*, 125, 1959.
213. E. Koczkás: The Rotational Analysis of the Bands (2,5) an (2,6) in the γ Band System of the NO Molecule. — Acta Phys. Hung. *10*, 117, 1959.
214. I. Deézsi: β-Bands of the Upper Vibration State No. 7. in the Spectrum of the NO Molecule. — Acta Phys. Hung. *11*, 155, 1960.
215. R. Tőrös: On the Anomalous Multiplet Splitting of the Triplet Terms of the TiO Molecule. — Acta Phys. Hung. *20*, 91, 1966.
216. M. L. Császár, E. Koczkás: *a)* Das Elektronenbandspektrum des CsD-Moleküls im sichtbaren Spektralgebiet. — Acta Phys. Hung. *23*, 211, 1967. *b)* A CsH és CsD molekula elektronsávszínképéről. — KFKI Közl. *12*, 135, 1964.
217. R. Colin, W. E. Jones: The $b^1\Sigma^+ - X^3\Sigma^-$ Band System of NCl. — Can. J. Phys. *45*, 301, 1967.
218. H. Meinel: Spektroskopischer Nachweis zweier CH- und C_2-Gruppen unterschiedlicher Rotationsverteilung. — Z. Naturforsch. *25a*, 302, 1970.
219. D. L. Lambert, E. A. Mallia: The SiH $A^2\Delta - X^2\Pi$ (0,0) Band in the Fraunhofer Spectrum. — Mon. R. Astr. Soc. *148*, 313, 1970.
220. P. Pacher: General Form of the Second Centrifugal Correction of Rotational Terms of Diatomic Molecules. — J. Phys. B. *4*, 887, 1971.
221. P. Pacher: Fine Structure of Septet States in Diatomic Molecules, the $X^7\Sigma$ State of MnH. — Acta Phys. Hung. *35*, 73, 1974.
222. A. Schadee: Theory of First Rotational Lines in Transitions of Diatomic Molecules. — Astron. and Astrophys. *41*, 203, 1975.
223. Pacher Pál: A kétatomos molekulák elektronszínképeinek multiplett felbomlása. — Kandidátusi disszertáció, Bp. 1976.

Lásd még a következő dolgozatokat: 34., 74., 78., 80, összesen 4 db.

Összesítés

	Önálló dolg.	Társszerz. dolg.	Összesen	Együtt	Tanítv.	Együtt
Schmid Rezső	22	51,5	73,5	90,5	38	38
Gerő Loránd	16	46	62		19	
Budó Ágoston	7	12,5	19,5	82,5	1	27
Kovács István	50	25	75		27	

A magyarországi molekulaspektroszkópiai iskola 4 vezető tagja összesen 173 db (92 kísérleti és 81 elméleti) publikációt tett közzé.

Miután Schmid kivételével a másik három vezető kezdetben szintén tanítvány volt, továbbá, mivel a tanítványok dolgozatai közül több közös irányítással született, így a 38 + 27 dolgozat összesen csak 50 különböző (38 kísérleti, 12 elméleti) munkát tesz ki. Ezekkel együtt az iskola összesen 223 (130 kísérleti, 93 elméleti) munkát publikált eddig.

MIT TANÍTSUNK FIZIKÁBÓL ÉS MIÉRT?

Roman U. Sexl
Bécs

A legújabb osztrák iskolareform alkalmat jelentett számomra, hogy újra végig gondoljam a középiskolai fizikatanítás célkitűzését és módszereit. Tagja voltam a tanterv reformot kidolgozó bizottságnak, és így véleményt kellett kialakítanom ilyesféle kérdésekről: Miért tanítunk fizikát? Kinek és mennyit tanítsunk? Milyen korban történjék ez?

Gondolkozzunk a következő problémán: ha valakivel találkozva azt mondjuk, hogy fizikusok vagyunk, akkor ismerősünk rendszerint előáll azzal a megjegyzéssel, hogy a középiskolában sohasem értette a fizikát. Legtöbb ember boldog, hogy jórészt vagy egészen elfelejtette ezt az undok és félelmes tárgyat. Általában nem tartják lényegesnek vagy fontosnak a műveltség szempontjából, szerintük nem is tartozik az ún. „úri műveltséghez".

Sok középiskolai tankönyv olvasása bennem is olyasféle meggyőződést keltett, hogy ezeknek az embereknek igazuk van: a fizikának valóban nem lehet köze az élethez. A könyvek rengeteg tényt közölnek és köztük kevés összefüggést. A tényeket rendszerint egzakt törvények alakjában tartalmazzák: a termodinamika első törvénye, a második törvény, Ohm törvénye, Coulomb törvény, Kirchhoff törvények stb. A tanulók megtanulják ezeket a törvényeket és a vizsga után azonnal el is felejtik. Maguk a tanárok szolgáltatják ehhez a legjobb példákat: szerintük nem is lehet elvárni a tanulótól, hogy emlékezzék pár hónappal ezelőtt tanult törvényekre, amikor alkalmazni kellene azokat. Miért tanítjuk akkor a törvényeket, és miért kell azokat egyáltalában tudni? Számomra a középiskolai fizika tankönyvek igen sok fejezete elé oda lehetne írni Robert Musil „Der Mann ohne Eigenschaften" c. nagy könyvének az első fejezete előtt álló címet: „Woraus bemerkenswerter Weise nichts hervorgeht" (Amiből megjegyzésre méltó módon semmi sem következik).

Ezt a nézetet igen világosan fejezi ki Thomas Kuhn „The Copernican Revolution" c. könyvéhez írt előszavában James Conant:

„Azt, hogy az irodalmi hagyomány helyébe a természettudományi hagyomány lépett volna, még azokra az iskolákra sem mondhatjuk, melyekben a tanítási idő nagyobb részét a természettudományok tanítására fordítják. Legfeljebb annyit lehet mondani, hogy az egyetemre jelentkező német hallgatók szereztek valamelyes ismereteket fizikából is. Teljesen nyitott kérdés azonban, hogy ezek az ismeretek befolyásolják-e valamilyen mértékben is azoknak a beállítottságát, akik későbbi tanulmányaik során természettudománnyal nem fognak foglalkozni. A tanítás módszerének változása sem jelent javulást a humán pályák felé irányulók természettudományi műveltségének előmozdításában. Így egyáltalában nem csodálkozunk, ha az elsősorban irodalmi műveltségű társadalom a természettudományok megértését csak a mérnökök és természettudósok számára tartja fontosnak vagy lényegesnek.

Az Amerikai Egyesült Államokban a hagyományos európai műveltség már kb. 100 éve vagy egyáltalában nem alapvető fontosságú része a tanításnak, vagy felismerhetetlenségig megváltozott, helyébe azonban nem alakult ki a fizikán, matematikán és modern nyelveken alapuló műveltség".

Ez a diagnózis. Mit tehetünk a gyógyítás érdekében?

A német tantervek igen részletes és alapos elméletre támaszkodnak, amilyennel pl. az Institut für Pädagogik der Naturwissenschaften foglalkozik Kielben. Gondosan elemzik a tanítás célkitűzéseit. Ez kétségkívül fontos lépés annak tisztázására, hogy a tanulóknak ma mit tanítsanak, de nem hiszem, hogy megoldás az alapvető problémákra. Túl sokat foglalkoznak a részletekkel és keveset az általános problematikával.

Mi az alapvető probléma? Miért kell egyáltalában fizikát tanulni? Mi a cél a fizika tanításánál? Pár hét alatt elfelejtett törvények aligha visznek előbbre.

Mielőtt ezekre a kérdésekre megkísérelnénk feleletet adni, térjünk vissza Conant előszavára. Néhány sorral odább így folytatja:

„Az Egyesült Államokban és Európa modern iskoláiban tapasztalat igazolta, hogy milyen nehéz feladat a természettudományi tárgyakat megközelítőleg az irodalom, művészet vagy a zenei ismeretek szintjére emelni. Mérnökök és természettudósok be tudnak kapcsolódni szellemes, értelmes módon képekről, könyvekről vagy színdarabokról szóló vitába, de nagyon nehéz beszélgetést folytatni fizikáról egy olyan társaságban, melynek többsége nem mérnök vagy természettudós . . .

Világos, hogy a középfokú vagy felsőfokú iskolák tanulóinak agyában a természettudomány vagy az irodalom tanulása nem ugyanolyan nyomot hagy. A fémek kémiája és Shakespeare színdarabjai teljesen különböző jellegű ismereteket jelentenek, ha az emberek igényét tekintjük. . . . Egyszerűen kifejezve: A különbség abban mutatkozik: Shakespeare színdarabjairól vég nélkül vitatkoztak a múltban és vitatkoznak ma is, stílusát és karaktereit minden elképzelhető szempontból bírálták és bírálják, a csodálat és elítélés hangjai állandóan hallhatók. Fémeket és azok sóit senki sem csodálja és senki sem ítéli el."

Lehet a fizika társalgási téma? Tehető-e érdekessé szélesebb közönség számára? Ha a közönség támogatására szükségünk van, akkor ez kétségkívül jó lenne. Conant szerint a cél eléréséhez a legjobb módszer az lenne, ha a fizikát történeti keretben tanítanánk.

Szerintem a fizika tanításának történeti módszerrel való megközelítése egy másik szempontból fontos és más célja is van. Mint már láttuk, a fizikatanítás általában egzakt törvények közléséből áll, hiányzik köztük az összefüggés és hiányzik a kapcsolat más tárgyakkal, más területekkel. A fizika ugyanis nem egzakt törvények gyűjteménye, hanem az ezek által alkotott épület. Ma az iskolában ennek az épületnek a szerkezetét homály borítja, a tanulók egy sereg épületelem között botladoznak látható cél nélkül. A fizika pedig maga is egy tégla az emberiség kulturális örökségének hatalmas épületében; törvényeinek, az egész tudománynak csak ebben a kapcsolatban van értelme.

A nem fizikusok számára szerintem éppen azt kell megmutatnunk, hogy a fizika kulturális örökségünknek milyen fontos részét képezi. Bepillantást kell nyújtanunk a természet világába, megértetni a nem természettudományos pályákon mozgóknak, hogyan határozza meg a természet és a történelem a jelenben az emberi létet. A fizika részleteinek megértése nem lehet cél.

Az egzakt törvényeket példaként használjuk fel a cél elérése érdekében, mikor megmutatjuk, milyen módszerekkel dolgozik a tudomány. Coulomb törvényének ismerete nem lényeges célja a fizikatanításnak — lényegessé akkor válik, amikor megmutatjuk, milyen szerepet játszik a természet törvényeinek felderítésében, és hogyan változtatta meg az emberiség történetét. Ne értsenek félre: szeretném nyomatékosan hangsúlyozni, hogy a fizika törvényeinek alapos ismerete nélkülözhetetlen — a természettudományok hatalmas épületét csak szilárd tömbökből

---

Roman U. Sexl az elméleti fizika tanára a bécsi egyetemen. Vitaindító előadása Visegrádon hangzott el 1975 május hónapban a Dunamenti Országoknak a természettudományok tanításával foglalkozó második szemináriumán résztvevő osztrák, horvát, holland, angol, német, szlovák és magyar fizika pedagógusok előtt. Ford. Kunfalvi Rezső.

lehet felépíteni. De nem ezek a tömbök jelentik a végső célt.*

A fizikatanítás így értelmezett céljának elérésében nehézséget jelent az is, hogy szoros kapcsolatra van szükség más területekkel. A jelenlegi iskolarendszer azoknak a tanulóknak kedvez, akiknek az agya 10—12 gondosan elkülönített fiókra van osztva, köztük kevés, vagy semmiféle kapcsolattal. A fizika és a kémia között gyenge a koordináció, a biológiának szinte semmi köze sincs ezekhez a területekhez. (Lásd Marx György cikkét a tudomány szerkezetéből eredő nehézségekről a középiskolai tantárgyak koordinálásánál.) A legtöbb történelem könyv meg sem említi az elektromosságra vonatkozó ismereteinknek a 19. században történt óriási fejlődéséből származó következményeket, melyek visszavonhatatlanul átalakították az emberi társadalmat.

Csak akkor remélhetjük, hogy a fizikát az emberi kultúra lényeges részeként adjuk át, ha a középiskolai oktatásban a különböző tárgyak között legalább minimális kapcsolatot lehet létrehozni. A magyar reformtervek igen fontos lépést jelentenek ebben az irányban. Én magam tanfolyamokat rendezek tanárok számára, melyeken az interdiszciplináris összefüggéseket hangsúlyozzuk, és remélem, hogy egy későbbi konferencián be tudok már számolni a szerzett tapasztalatokról.

*Egyes tantervkészítők annyira beleszeretnek az épületelemek gyártásába, hogy egészen elfeledkeznek arról, hogy az elemekből valamit építsenek.

AZ IMPULZUST ELŐSZÖR: ALTERNATÍV ÚT NEWTON TÖRVÉNYEIHEZ

J. M. Ogborn
Nuffield, London

Komoly ellenvetés nélkül, régóta elfogadott álláspont, hogy az iskolában Newton mozgástörvényeit legjobban valamilyen erő mozgó testekre gyakorolt hatásának tanulmányozásával lehet megközelíteni, ami az „erő" egyenlő tömeg-szer-gyorsulás" eredményhez vezet. A vélemények legfeljebb abban különböznek, hogy az impulzus (azaz a mozgásmennyiség, ill. lendület) milyen szerepet játszon ezen a szinten, hogy mikor általánosítsuk a II. törvényt az „erő egyenlő a lendület változási gyorsaságával" formává.

A newtoni mozgástörvények kritikai elemzése azt mutatja, hogy ezek nem olyan egyszerű tapasztalati törvények, amilyennek felületesen nézve tűnhetnek [1, 2, 3], de általános egyetértés van abban, hogy valamiféle mély filozófiai taglalásuk tanítványaink többségének nem való. Abban is egyetértünk, hogy kísérleti bevezetés szükséges, a vele járó logikai nehézségek ellenére is. Az Atwood-féle ejtőgép vagy a Fletcher-féle kiskocsis elrendezés, amelyben az „erőt" egy tömeggel is bíró „súly" képviseli, további elvi, a világos tanítást gátló buktatókat hoz magával, és sok komoly erőfeszítés történt olyan kísérletek tervezésére, amelyek ezen nehézségeket kikerülik, amennyire csak lehet. A P.S.S.C.* és mások egy sor új eszközt és kísérleti összeállítást konstruáltak: dinamikai kiskocsik vagy szánok, nyomjelzős időmérő, elektromos indítású órák, légpárnás korongok és sínek állnak rendelkezésre. Ezek az eszközök lehetővé tették a lendületmegmaradás (impulzusmegmaradás) vizsgálatát, és rehabilitálták Newton törvényeit az iskolai fizikában, ahonnan az utóbbi időkben szép csendben kifelé csúsztak.

Arról szeretném most meggyőzni az olvasót, hogy az új eszköztár lehetővé teszi a dinamika egy másféle megközelítését, és hogy azok az okok, amelyek a tanárokat a szokásos felépítési módra kényszerítették, ma már nem állnak fenn. Azt is szeretném megmutatni, hogy ez a felépítésmód különleges didaktikai előnyökkel jár, s azt hiszem, egy felépítési módot ennek alapján kell megítélni: a logikai konzisztencia fontos, és befolyásolja a didaktikai értéket, de az utóbbinak kell döntően megszabnia választásunkat. Érdemes előbb áttekinteni, hogyan vált gondolkozásunkban uralkodóvá az erő—gyorsulás-megközelítés, már csak azért is, hogy lássuk: ez történelmi fejlődés eredménye, nem pedig a tárgy belső struktúrájából következik.

Newton a *Principia* második *Scholium*ában* körvonalazza a Törvényeket alátámasztó kísérleti tényeket. Leír egy ballisztikus ingával végzett kísérletsorozatot, miután a II. törvényt a következő alakban mondta ki: „A mozgás változása egyenlő a mozgásbahozó erővel." A *Principia* 2. és 4. definíciójából világos, hogy a „mozgás itt mozgásmennyiséget (lendületet) jelent, a „mozgásbahozó erő" pedig erőlökést (erő szorozva idővel). Ez az alak a törvényt közvetlenül a ballisztikus kísérletekhez kapcsolja, megkímélvén Newton olvasóit a gyorsulás fogalmának (a változási gyorsaság változási gyorsaságának) megragadásától, amit — tanítványaink többségéhez hasonlóan — nehéznek találtak volna.

Nyilvánvaló azonban, hogy a ballisztikus inga nem való egy elemi fizika-kurzusba, így kialakult az a gyakorlat, hogy a Törvényeket közvetlenül „rohamozzuk meg", olyan erőket próbálva előidézni, amelyek gyorsulást okoznak, mely utóbbit aztán meg lehet mérni. Ezt az eljárást ösztönözte az erőfogalom növekvő fontossága a klasszikus fizikában, továbbá (mint gyaníthatjuk) a matematikusok előszeretete a differenciálegyenletekből való indulás iránt. Az ilyen megközelítésnek azonban megvannak a nehézségei. A II. törvény a maga teljességében nem fogható meg kísérletileg: van kísérletileg ellenőrizhető tartalma, de az erő definícióját is tartalmazza, valamint a tömegre vonatkozó rejtett feltevéseket. Az erődefinícióval kapcsolatos nehézségeket át lehet hidalni az intuícióra való támaszkodással, konstans feszültségű rugók vagy rugalmas fonalak kifejtette erőket alkalmazva, az erőt a párhuzamosan kötött rugók számával változtatva. Ilyen megközelítés van részletesen kidolgozva Roger professzor „*Physics for Enquiring Mind*" (O.U.P.) c. könyvében vagy a P. S. S. C. „Physics" (Heath and Co.) tankönyvében. Nem vitatom e módszer logikáját, és ha nem lenne más alternatíva, nagyon kielégítő megoldásnak lehetne tekinteni.

Vannak azonban további, didaktikai természetű nehézségek is. A gyorsulás nehéz fogalmát alaposan meg kell ragadni, mégpedig korán, hogy egyáltalán belekezdhessünk a dinamikába, és fennáll az a veszély, hogy a tanulók az egyenletesen gyorsuló mozgást kezdik a mozgás egyetlen „igazi" alakjának tekinteni, pusztán azért, mert fontos volt, hogy ezzel alaposan megismerkedjenek. Miután ezt a fogalmat többé-kevésbé biztosan magukévá tették, három új dolgot kell *egyszerre* megragadniuk: hogy állandó erő állandó gyorsulást produkál; hogy a gyorsulás arányosan nő az erővel, de az erő egységét a gyorsulásra hivatkozva definiáljuk; hogy a tömeg növekedésével csökken az adott erő által előidézett gyorsulás. Ezen összefüggések közül az első az intuíciót kapcsolja a kísérlethez, a második definícióra is hivatkozik, a harmadik pedig végső soron olyan további kísérletekre támaszkodik, amelyek a tömeg additivitását és a tömegarányok dinamikai konzisztenciáját mutatják meg. Ennek az eszme-komplexumnak a tanítási problémáira léteznek józan didaktikai

---

Fordítás „The School Science Review" *161* (1965) 53. o.-án megjelent cikkből. Fordította Dede Miklós.

* P.S.S.C.: Physical Science Study Comittee, azaz Fizikatanítási Bizottság.

** A „Scholium"-ok Newton „Principia Matematica Rerum Naturalium" c. művének oldottabb hangvételű, tapasztalati tényeket taglaló és a törvények jelentését magyarázó fejezetei.

megoldások [4]. A munka hosszabb időre való széthúzása és a fogalmak fokozatos, nem formális definícióval történő bevezetése simábbá teheti a megismerés útját, de fennáll a végeredmény olyan mértékű előresugallásának veszélye hogy a felfedezés eleme minimálisra csökken.

Ha ezek a nehézségek elkerülhetetlenek volnának — amint széles körökben, úgy látszik, feltételezik —, a fogalmak ilyen „gyöngéd" bevezetése volna az egyetlen megoldás. Egy alternatív megközelítés, amelyről azt gondolom, hogy átvágja az említett problémák többségének gyökerét, azzal a kérdéssel kezdődik: melyek is hát a II. törvény fundamentumát képező kísérleti tények? Maga Newton adja meg a választ: *az a* fizikai törvény, amelyen a többi alapul, a lendületmegmaradás törvénye. Várom az ellenvetést, amely szerint a lendületet deduktív módon szokás bevezetni a II. és III. törvény megfogalmazása után. Remélem, meg tudom mutatni, hogy alkalmas megközelítés a „nehézség"-et nagymértékben kiküszöböli, és egy különösen gyümölcsöző tanítási kísérlet alapjául szolgálhat. Egyben a tömeg fogalmát is be lehet vezetni egyszerű és ugyanakkor szigorú módon, végül pedig az erőfogalom kialakítása is olyan módon történhet, ami a szokásosnál kevesebbet torzít az erőnek a fizikában elfoglalt tényleges helyzetén.

Tegyük fel, hogy a tanuló az alsóbb osztályokban már kvalitatív módon megismerte az erőt, mint húzást vagy nyomást, ami képes feszíteni, törni, hajlítani, testeket mozgásbahozni vagy megállítani. Valószínű, hogy hallott atomokról, amik sebesen mozognak összevissza a gázban, visszapattogva az edény faláról. Bizonyára már mért sebességet nyomjelzős időméréssel, sebességmérővel, vagy vonalzóval és stopperrel. Megfigyelhette, hogy amikor a testek sebessége megváltozott, nemcsak úgy maguktól ugrottak, hanem valami nyomta vagy húzta őket. Találkozott a súrlódással is, észrevéve, hogy az egymáson csúszó felületek között valamiféle erő hat, amely képes megállítani a testeket. Észrevehette, hogy az erő „kétoldalú ügyletnek" mutatkozik, ha például elmozdulásra képes padlón akart testeket mozgatni (játékautót indítva el műanyaggolyócskákon fekvő kártyán, vagy kipróbálva a járást egy hosszú, szabadon mozgó taligán). Az is hasznos, ha megfigyelte egy sebességmérővel felszerelt kocsi húzása közben, hogy a sebessége nő, ha elég erősen húzza. Ebben a stádiumban még nem szükséges különbséget tenni sebességnagyság és -vektor között: ami itt lényegesnek fog bizonyulni, az a sebesség nagyságának mint adott idő alatt megtett útnak a fogalma.

14—15 éves korában a tanuló már képes általánosítani. Tudatosítani lehet, hogy mindezek a változások egy test sebességének *más test által okozott* változásai voltak, és megállapodhatunk, hogy ezeket a változásokat „kölcsönhatás"-nak nevezzük (közelebbről, dinamikai kölcsönhatásnak). Játszhatunk „kölcsönhatás-vadászatot" súrlódásmentes koronggal mágnest rejtő asztalon, iránytűkkel, amelyek időről-időre titokzatosan megmozdulnak, vagy olyan ingával, amely (rejtetten egy másik ingához csatolva) periodikusan elkezdi és abbahagyja a lengést.-A tanár és tanuló leleményességének tág tere van meglepő mozgásszituációk teremtésében. Az elv, ami mindebből végül is kikristályosodik: a meglepő mozgások esetében is meg lehet találni a „tettest", és a gyanú megalapozottságát ellenőrizhetjük úgy, hogy a „gyanúsítottat" elvesszük a helyéről. Ha a „tettes" hozzádörzsölődik az „áldozathoz", a kölcsönhatást súrlódásnak hívjuk, és a legjobb, amit tenni tudunk az eltávolítására, az érintkezés gyengítése görgővel, kerékkel vagy légpárnával. Ha minden kölcsönhatást kiküszöböltünk, *nincs sebességváltozás*. Ha a tanuló még mindig úgy érzi, hogy ez az állandósult mozgásállapot további magyarázatot igényel, folytathatjuk a „kölcsönhatás-vadászatot", megmutatva, hogy bármi változás, amit teszünk, vagy közömbös, vagy a mozgás olyan változásában jelentkezik, amit éppen kölcsönhatástként értelmeztünk. Ezzel megfogtuk az I. törvény tapasztalati tartalmát: mindig képesek vagyunk megtalálni azt az objektumot, amely a mozgás megváltozását okozta.

Huszadik században élő tanítványainktól elvárhatjuk, hogy figyelmeztessenek bennünket, nincsen semmi olyan a világon, ami ne lenne képes mozogni, ami tökéletesen le volna cövekelve. Mi pedig felhívhatjuk a figyelmét, hogy a kölcsönhatásokban általában nincs éles különbség „tettes" és „áldozat" között, például a rejtett inga hol elindul, hol megáll, hasonlóan a másikhoz. A III. törvény előreveti az árnyékát, de hiba ebben a stádiumban tovább elmélkedni róla.

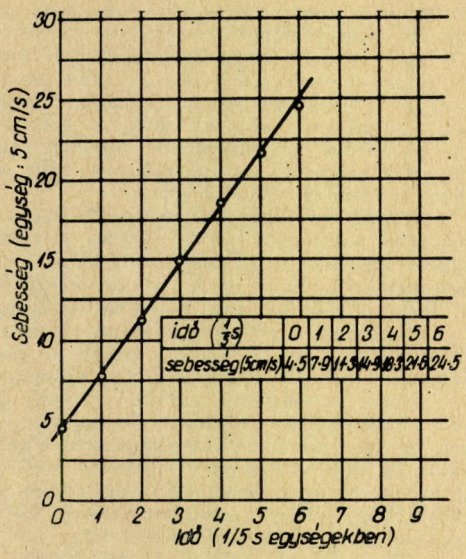
Most megkérdezhetjük: „Mi történik, ha a testek kölcsönhatásba kerülnek?" Van valami játékszabály? Az alkalmas kísérlet terve magától adódik azon egyszerű észrevételből, hogy a kölcsönhatáshoz legkevesebb két test kell, és ha ezek közül az egyik egy pad vagy egy sín, nehezen tudnánk kisütni, mi is történik lényegében, mert ezek rögzítve vannak a padlóhoz, az épülethez, a földhöz (kölcsönhatásban vannak velük). Visszautalhatunk az elcsúszó kártyán mozgó játékautóra. Így a *legegyszerűbb* vizsgálat az lehet, hogy veszünk két testet, és engedjük őket kölcsönhatásba lépni olyan kis súrlódás, ill. más testtel való érintkezés mellett, amilyet csak el tudunk érni. Az egyszerűség igénye továbbá azt sugallja, hogy először egyforma testek kölcsönhatását figyeljük meg, pl. két kiskocsiét vagy két légpárnás szánét. A légpárnás szánoknál meggyőződhetünk, hogy majdnem állandó sebességgel mozgonak a vízszintes pályán. A sebességüket mérhetjük elektromos nyomjelzővel vagy stroboszkópos fényképezéssel. A vízszintes pályán futó kiskocsik csalódást okoznak: a nyomjelző csökkenő sebességet mutat a paddal és a nyomjelzővel való kölcsönhatásuk során, de a tanulóknak megmutathatjuk (vagy sugallhatjuk, hogy rájöjjenek), hogy a kissé lejtős pályán a kocsik állandó sebességgel haladnak. A ravaszság, amivel a Föld vonzását kijátszottuk a súrlódás ellen, bizonyára örömet okoz, és a csalás érzését is oszlathatjuk, ha légpárnás sínnel meg tudjuk mutatni, hogy a lejtő nem az egyetlen lehetőség a cél elérésére, csak egyszerűen a legolcsóbb.

Tekintsünk egy egyforma kiskocsikkal végzett kísérletsorozatot, amit a tanulók némi segítséggel kieszelhetnek. Egyszerű tantermi körülmények között kapott adatok az I. táblázatban láthatók.

1. Nyugalomban levő két kiskocsi szétugrik az egyiken levő dugattyú rögzítőjének feloldásakor. Miután megnéztük, mi történik, alkalmas időmérő elrendezést lehet tervezni az ellentétesen lejtő pályákon futó kiskocsikhoz. A tanulók először vízszintes pályán figyelik meg a jelenséget a következő kísérletekben is, aztán megtervezik a maguk időmérő és sebességkompenzáló elrendezését. A légpárnás sínt aztán a tanulók által elért eredmények ellenőrzésére és a mérési pontosság növelésére lehet felhasználni. A kísérlet alapot ad néhány általánosításra: „a sebességek egyenlők", „a sebességek egyenlők és ellentétes értelműek" stb.

2. Mozgó kocsi ütközik rugalmasan egy állóval. Ezt meg lehet valósítani úgy, hogy az egyikre erősített acélszalag ütközzön a másik merev orr-darabjával, a légpárnás sínen pedig a szánok hasonló felszerelésével a történés ismételten lejátszható. Az egyik test meg fog állni, a másik pedig elindul, és ha a kocsipálya sík és sima (jó pl. egy „fornica" felület), a mért sebességek közel egyenlők. Az előző általánosítást módosítani kell; a sebességek most is egyenlő nagyságúak, de nem ellentétes értelműek, és a két sebesség nem ugyanarra az időszakra vonatkozik. A sebesség irányának jelentősége kezd felderengeni, és ösztönözhetjük tanítványainkat, hogy használják a *sebességvektor* szót az iránnyal ellátott sebességre. Előfordulhat, hogy némelyik ütközés nem elég rugalmas, és, mint az I. táblázatban látható, az első kocsinak az ütközés után marad egy kis sebessége. A tanulók hamar észre fogják venni, hogy ha ezt kivonjuk a kezdeti sebességből, az eredmény közelebb kerül a második kocsi sebességéhez. Ezt az észrevételt elteszszük magunknak, előrejelzésként a soron következő tapasztalatokra.

3. Mozgó kocsi ütközik rugalmatlanul egy állóval. Egyszerű megoldás, hogy az egyikre tűt szerelünk, amely



1. ábra. Sebesség—idő-grafikon állandó erővel húzott kiskocsira. (Állandó megnyúláson tartott rugalmas fonál.) Az időmérés elektromos nyomjelzéssel történt.

I. táblázat

Egyenlő tömegű testek kölcsönhatása
(önkényes sebességegységekkel)

A testek és a kölcsönhatás módja	A. sebessége		B. sebessége	
	előtt	után	előtt	után
Szétlökődés. Kiskocsik, beépített dugattyú. (Az indításhoz B-re kell ütni.)	0,0	+ 22,0	0,0	−20,8
Szétlökődés. Kiskocsik, fonál elégetésével kiszabadított órarugó	0,0	+ 13,4	0,0	−13,3
Szétlökődés. Légpárnás sín, elektromos nyomjelzés	0,0	+ 4,1	0,0	−4,1
Majdnem rugalmas ütközés. Kiskocsik, egyikük nyugalomban. (Ld. B. megjegyzést)	+ 5,6	0,0	0,0	+ 5,5
Majdnem rugalmas ütközés. Kiskocsik, egyikük nyugalomban. (Ld. B. megjegyzést)	+ 6,5	+ 0,4	0,0	+ 6,0
Majdnem rugalmas ütközés. Légpárnás sín, elektromos nyomjelzés	+ 7,7	0,0	0,0	+ 7,7
Rugalmatlan ütközés. Kiskocsik	+ 16,6	+ 8,2	0,0	+ 8,2
Rugalmatlan ütközés. Légpárnás sín, stroboszkópos fényképezés	+ 10,2	+ 5,1	0,0	+ 5,1
Majdnem rugalmas ütközés. Légpárnás sín, mindkét szán mozog, stroboszkópos fényképezés	+ 3,5	+ 1,2	+ 1,2	+ 3,4

A. A kiskocsik 50 ciklus/s-os elektromos nyomjelzővel voltak ellátva

B. A rugalmasabb ütközésnél feszes rugó, a másiknál lazább gumiszalag ütközött a merev orr—résszel.

beleszalad a másikra erősített dugóba. Sok tanuló előre megsejti az eredményt, bátorítsuk őket, hogy írják le érveiket — legyenek azok bizonytalanok vagy rosszak—, hogy majd később felidézhessék. Maga az, hogy egyáltalán sejtést tudnak tenni, azt sugallja, hogy az eseményekben elrejtett szabálynak egyszerűnek kell lenni. Az összes előbbi észlelésekkel összhangban levő szabályok például „az ütközés előtti és utáni sebességek átlaga egyenlő", vagy „az ütközés előtti sebességek előjeles összege egyenlő az ütközés utáni sebességekével", vagy „a két kocsi sebességváltozása egyenlő nagyságú és ellentétes értelmű". Előfordulhatnak bizonytalanabb változatok is, mint „nem lehet többletsebességet nyerni az ütközésből", mások pedig hibásnak bizonyulnak a későbbi ellenőrzés során.

4. További ütközéseket figyelnek meg kiskocsik vagy légpárnás szánok között, amelyekben mindkét jármű mozgott ütközés előtt, továbbá részben rugalmatlan ütközéseket, amíg a tanulók meg nem fogalmazzák a fenti (formálisan egyenértékű) szabályok valamelyikét, vagy többet is közülük. E szabályokat érdemes többször is ellenőrizni, különösen a kevésbé szimmetrikus ütközésekre. A légpárnás sín elektromos órával vagy polaroid fényképezőgéppel és stroboszkópos megvilágítással lehetővé teszi, hogy azonnal és gyorsan elvégezzük a tanulók által javasolt ellenőrző kísérleteket.

Ha — mint valószínű — a szabályt úgy fogalmazzák meg, hogy az átlagos vagy a teljes sebesség (vektor) változatlan marad, megkérdezhetjük tanítványainkat, hogy meg vannak-e elégedve a felfedezésükkel. A szabály megvitatásával hamar eljutunk oda, hogy úgy is lehet fogalmazni, a két test sebesség*változása* egyenlő nagyságú és ellentétes értelmű. Emlékeztethetjük őket, hogy éppen a sebességváltozások játékszabályának keresésével indultunk.

Mindez gyümölcsöző, izgalmas tapasztalatszerzés lehet, és invenciózus felfedezés. Lehetséges feltételezések a szabályra könnyen merülnek fel, rögtön ellenőrizhetők, megerősíthetők vagy cáfolhatók. Egyetlen mérendő mennyiség a fogalmilag egyszerű sebességnagyság, amely a kísérletek előrehaladtával az előjelzett sebesség, ill. sebességvektor fogalmává finomodik. A „helyes" válasz nyugtalanítóan közel van, de egyáltalán nem triviális, és a kísérletek nem adják olcsón. (Hány tanuló van, aki azt az ökölszabályt használja, hogy az iskolai fizikában minden mennyiség arányos egymással? !) Az sem rossz, ha a tanár először kétkedést mutatva fogadja a helyes szabályt, megadva aztán magát, amikor a szabály sorozatosan jól működik a különböző esetekben.

Néhány tanuló valószínűleg azt is látja, hogy ez még nem a teljes igazság. Megmutathatjuk nekik, hogyan illesszenek össze két kocsit. Egy, mondjuk szétugratós kísérlet új szabályt sugallhat, amit ismét ellenőrizni lehet a légpárnás sínen.

Új szabály merül fel: a sebességváltozások fordítva arányosak a test „méretével" és ellentétes értelműek. Az előbbi szabály ennek egy speciális esete volt. Most már jóslást kérhetünk a három kocsi kontra egy kocsi ütközési szabályára, és ellenőrizhetjük, hogy a legutóbbi szabály csakugyan érvényben marad. Az egész vizsgálódási folyamat természetesen adódik a rendelkezésre álló kísérleti eszközökből, és példát ad a kísérlet, spekuláció, sejtés, előrekövetkeztetés, ellenőrzés és fogalomfinomítás összjátékára egy fizikai probléma feldolgozásában.

Most be lehet vezetni a tömeg fogalmát, mentesen az erővel való szokásos összebonyolítástól, és a gyorsulás mérésének és megértésének szükségessége nélkül. A tanulók rögtön mondani fogják, hogy a nagy test kisebb sebességváltozása „nehezebb" voltának tudható be, de azt is gyaníthatják, hogy azért van így, mert a nehezebb test erősebben súrlódik. Ezt el lehet intézni néhány ütközés súrlódás-kompenzálás nélküli megismétlésével, amelyekből kiderül, hogy a súrlódás fokozatos sebességcsökkenést eredményez, nem pedig végig kisebb sebességet, és a szabály ilyenkor is egészen jól működik az ütközés után közvetlenül felvett sebességekre, amikor még nem volt idő jelentős súrlódásos sebességapadásra. Hosszú fonálon

II. táblázat

Szétlökődési kölcsönhatás különböző tömegarányok mellett

A szereplő testek (kezdetben mindegyik nyugalomban	A kölcsönhatás utáni sebességek (önkényes egységben)	
	„A"	„B"
Kiskocsik. Tömegarány 2 : 1. Beépített dugattyú	+ 27,0	−13,2
Kiskocsik. Tömegarány 2 : 1	+ 13,8	−6,9
Kiskocsik. Tömegarány 3 : 1	+ 17,6	−5,9
Kiskocsik. „A" kocsin 1 kg tömegű teher, „B" terheletlen	+ 18,2	−41,7
Tényleges kocsitömeg 780 g	kocsitömeg $= \frac{18{,}2 \times 1{,}0}{41{,}7 - 18{,}2} =$ $= 0{,}744$ kg	
Ingák 6 láb hosszúságú fonállal.	+ 45,5	−55,5
„A" tömege 1 kg, „B" ismeretlen tömegű vasdarab	+ 45,5	−55,5
„B" vasdarab tényleges tömege 815 g	„B" tömege $= \frac{45{,}5}{55{,}5} \times 1{,}0 =$ $= 0{,}820$ kg	

Megjegyzések:

1. Az első kivételével a szétlökődést az egyik kocsihoz erősített rugó rögzítő fonalának elégetése indította.
2. Az első három mérésben elektromos nyomjelzést, az utolsó kettőben fotocellával vezérelt elektromos órát használtunk.

függő testek ütközéséről készült stroboszkópos felvétel is segíthet, annál is inkább, mert a nagyobb tömegű, ha egyszer megindult, legalább addig leng, mint a kisebb, mutatva, hogy a surlódás a nagy test sebességét nem befolyásolja erősebben.

A „méret" vagy „súlyosság" kezd olyannak látszani, ami csak esetleges kísérője annak a lényeges jellemzőnek, amely megszabja, mekkora sebességváltozások következnek be, és bevezethetjük a „*tömeg*" szót erre a jellemzőre. Valamelyik kocsit meg lehet terhelni egy fémdarabbal, és mérni a sebességeket a szétrúgódás után. Ha megállapodunk, hogy a fémdarabot egységnyi tömegűnek tekintjük, a kocsik tömegét jó közelítéssel megmérhetjük ilyen egységben. A közönséges 750 g-os kiskocsiknál ez az egység akár 1 kg is lehet (ld. II. táblázat). Úgy is mérhetünk tömeget, hogy az ismeretlen testet és az 1 kg-ost hosszú fonálra függesztjük és ütközésükről stroboszkópos felvételt készítünk. Az elérhető pontosság korlátozott, de a mérés elveiben olyan egyszerű és direkt, hogy érdemes elvéezni akkor is, ha később majd sokkal rafináltabb tömegmérés következik, például az ugyanazon rugó hatására létrejövő rezgések vizsgálatával.

A tanulók most már meg tudják fogalmazni a végső törvényt, a

$$\frac{(\text{sebességváltozás})_1}{(\text{sebességváltozás})_2} = \frac{(\text{tömeg})_2}{(\text{tömeg})_1},$$

vagy a „tömeg-szer-sebesség változása a kölcsönható testekre egyenlő nagyságú és ellentétes értelmű" alakban, ill. mindkettőben.

A sebesség és a lendület vektor-jellege kezd felszínre kerülni, és a tanulók ezzel kapcsolatos nehézségein segíthetünk egy kicsit, ösztönözve őket, hogy maguk idézzék elő a kocsik sebességváltozását húzással-nyomással, és érzékeljék a különbséget a szükséges erőlökésben. A II. törvény csaknem minden ellenőrizhető állítás-tartalma immár fel van fedezve, bár a tanulók még messze vannak attól, hogy szavakba foglalhassák. A III. törvény is a láthatáron van. Minden kísérletben mindkét test sebességváltozást szenvedett, függetlenül attól, melyiken volt a dugattyú, a rugó vagy a tű. Ütközőnek használva az ujjunkat az összecsapódó kocsik között, mindkét oldalon nyomást érzünk. Nem látszik értelmetlen dolognak, ha a III. törvényt először kvalitatíven fogalmazzuk meg valahogy így: „mindegyik test nyomja a másikat ütközéskor".

Ezután az erő és az erőlködés fogalmát lehet megközelíteni, felvetve, hogy mi történik kölcsönhatás közben, a végeredménynél részletesebben. Elég lassan lefolyó, azaz gyenge kölcsönhatást lehet előidézni a két kocsi között kifeszített vékony rugalmas zsinórral. Megnyugodva állapíthatjuk meg, hogy a lendület-szabály az ilyen kölcsönhatásokra is kiterjeszthető, azt találván, hogy a nyugalomból induló két egyforma kocsi középen találkozik. Közvetlen észlelés vagy nyomjelzős időmérés azt mutatja, hogy a sebességek folytonosan változnak, és e változás gyorsasága attól függ, mennyire van kifeszülve a zsinór. Ösztönözhetjük a tanulókat, hogy ezekből az észlelésekből új hipotézisekre jussanak. A lendület-kísérletekben a húzás — nyomás — hasson bár rövid vagy hosszú ideig — sebesség*változást* eredményez. Akkor pedig úgy kell lenni, hogy állandó erő folyamatos változást okoz, bizonyára állandó változási gyorsasággal, másképp mondva, állandó gyorsulással.

Nem tűnik haszontalannak, ha e lépéshez előkészítjük a talajt azzal, hogy a gyorsulást mint önmagában érdekes fogalmat egy kicsit előbb bevezetjük. Első lépésként érdemes feljegyezni egy kocsi vagy bármi más sebességmérős jármű sebességváltozásait, sebesség — idő-grafikonokat rajzolni és ezeket összehasonlítani a nyomjelzővel kapott grafikonokkal. Közvetett számolásokat távolság- és idő-adatokból olyan későre célszerű halasztani, amennyire csak lehet: ennél a megközelítésnél nem kell sok időt tölteni a kinematikával és a mozgásfüggvényekkel a dinamika vizeire való evezés előtt, a kinematikát akkorra lehet hagyni, amikor már tényleg használhatjuk tényleges problémák megoldására, pl. a szabadesés gyorsulásának mérésére.

Az új erő—gyorsulás-eszmekört kell ezután vizsgálni. A gyorsulás fogalma természetes módon lép fel, hiszen már észrevettük a sebességváltozás fontosságát, és most azt kutatjuk, milyen gyorsan változik a sebesség. Egy kocsit húzhat a súrlódásra kompenzált pályán a tanuló, állandó megnyúláson tartott rugalmas zsinórral: ilyen módon érzékeli az erőt, ugyanakkor észleli a hatását, a gyorsulás állandóságát pedig meg lehet állapítani a nyomjelző szalagról készült grafikonról (ld. 1. ábra).

Ezzel az eredménnyel a nagy mű befejezéshez közeledik. Eddig az erő azt jelentette, amit mint húzást—nyomást érzékeltünk, most azonban világosabban meghatározhatjuk, mit értünk az erő nevű mennyiségen, és eljuthatunk a mérési utasításához. Az erőkkel „összekapcsolt" testek tömeg-szer-sebesség mennyisége egyenlő változást szenved, amit úgy értelmezhetünk, hogy minden pillanatban ugyanakkora „erő" hatott mindegyikükre, amennyiben feltételezzük (posztuláljuk), hogy az erő adott idő alatt a nagyságával arányos lendületváltozást okoz. Mivel pedig állandó erő állandó gyorsulást hoz létre, az eredményt úgy fogalmazhatjuk, hogy „az erő egyenlő a lendület változási gyorsaságával", az egyenlőséget (arányosság helyett) az erő mérési utasításának legegyszerűbb formája érdekében választván. Megkaptuk tehát a II. törvényt mint newtoni, mind tankönyvi alakjában, feltárva, hogy tartalma az erőnek a kísérleti tények értelmezésére felépített definíciója. Bizonyára nem nagyon nehéz világossá tenni a tanulók számára, hogy milyen mértékben önkényes ez a definíció, és az önkényes választásnak milyen határt szabnak a való világ mechanikai tényei.

A definíció alkalmas, ill. célszerű voltának végső ellenőrzését úgy végezhetjük el, hogy a kocsikat több egyforma, azonos deformációjú zsinórral húzzuk, majd különböző számú egymásra pakolt kocsit ugyanazzal a zsinórral. A tanulók meg tudják jósolni az eredményeket, és elég gyors durva mérés elegendő az ellenőrzésre. E kísérletek

jelentősége abban áll, hogy induitív elképzelésünk az erők és tömegek egyszerű összegződéséről tényleg érvényes azokra a sokkal rafináltabb és definiáltabb fogalmakra, amelyeket vizsgálataink során alakítottunk ki. Az erő—gyorsulás-egyenletet ezután használhatjuk mindazoknak az érdekes problémáknak a megoldására, amelyek körére vonatkozik, és a kinematikai egyenletekkel kombinálva kialakíthatjuk a potenciális és kinetikus energia fogalmát.

E problémák között szerepel a szabadesés. Az állandó gyorsulás a testre ható állandó erőt jelez: a Föld vonzásának a súllyal való azonosítása pedig egy lépés Newton gravitációs elmélete felé. Az a tény továbbá, hogy a különböző testek azonos gyorsulással esnek, a gravitációs erő tömeggel való arányosságát mutatja. Bármiféle olyan tanítási felépítés, amely a legkisebb keveredést is megengedi a súly és a tömeg között, ezt a pontot még mérsékelt világossággal sem érheti el. Fontos az is, hogy a tanulók lássák, a newtoni mechanikában a szabadesés problémaként merül fel, és egy magyarázó erőt kíván, míg közülük néhányan később látni fogják, hogy Arisztotelész és Einstein fizikájában a szabadesés bizonyos értelemben „természetes" mozgás.

Amikor eljön az ideje, hogy a dinamikát többdimenziós mozgásra kiterjesszük, a P.S.S.C. és mások által javasolt módszerek zökkenőmentesen illeszkednek az itt vázolt felépítési módhoz. Súrlódásmentes korongok ütközéséről készült stroboszkópos felvételek a lendület teljes vektor-jellegét mutatják, és így az értelmező mennyiségnek, az erőnek is vektor-voltához vezetnek. Ekkor lehet kimondani a II. törvény kiegészítését: „... és az erő irányába esik". Görbe pályán való mozgást lehet mágneses korongokkal vizsgálni, vagy elektromosan töltött test körül gördülő töltött golyókkal, és a test eltávolításával megmutathatjuk, hogy *egy kölcsönható test jelenléte* okozta a mozgásállapot változását. Mint előbb, erő jelenlétét posztuláljuk a testek között, de világos, hogy ez az erő nam valamiféle „dolog", ami az egyenes pályából való kitérést okoz, hanem az értelmezése (vagy inkább parametrizálása) az egyik test másikra kifejtett hatásának. Így elkerülhetjük a körbeforgás érzetét, amit az keltene, ha az I. törvényre hivatkozva állítanánk ilyen erő létezésének szükségességét.* Érdemes emlékezni rá, hogy a Föld körüli körmozgást Galilei a legegyszerűbb erőmentes mozgásnak tekintette, és Newtoné volt a felismerés: *ha a Földet el tudnánk távolítani*, a szabad mozgás egyenesvonalú lenne. Talán nem erős túlzás azt állítani, hogy a dinamika tanításának legtöbb gondja abból származik, hogy alattunk van ez a nagy tömegű golyó.

Konklúzió

A következőkben tudnám összefoglalni a leírt megközelítés előnyeit. A kölcsönhatásban levő testekkel végzett kísérletek olyanok, hogy a tanuló maga észlelhet, maga tervezheti meg a kísérleteit, hipotéziseket fogalmazhat meg és ellenőrizhet, érezheti tudásának gyarapodását. Ezt a folyamatot nem fékezi a gyorsulás előzetes ismeretének szükségessége, a végeredmény pedig nem túl könnyen látható előre az alapozó munka során. A sebesség nagyságának ismert fogalmából indulva, a többi fogalom magától nő ki a kísérletből, elméletből és ellenőrzésből, és a tanulót saját tapasztalatai és a megértésre irányuló erőfeszítései győzik meg minden új fogalom szükségétől.

A vázolt kísérletsorozat eredménye egyben „jó fizika", amit nem kell radikálisan átértelmezni, amig az impulzusmegmaradás törvényét fenntartjuk. Nem kényszerülünk a megismerési folyamat egyik stádiumában sem egy definíció „igaz" voltát vizsgálni kísérletileg, vagy azt a benyomást kelteni, mintha ezt tennénk. A tömeg természetes módon lép fel, mégis elég szabatosan ahhoz, hogy később kritikai vizsgálatnak vethessük alá, mégpedig úgy, hogy nem volt hozzá szükséges a gyorsulás komplikált fogalma. Alapjelentése — hogy a sebességváltozást relatíve kisebbé teszi — rögtön nyilvánvaló, és az is, hogy a dinamikai kísérletek csak a tömeg*arányokat* adják, az egység választása ránk van bízva. A tanulók kevésbé lesznek hajlamosak a tehetetlenséget valami, a mozgásnak ellenszegülő erőfajtának tekinteni, mert a tömeget a teljes erőforgalom kialakítása előtt vezettük be.

A jó tanításnak az is feltétele, hogy az új eszmék fokozatosan kerüljenek elő, a fogalmilag egyszerűbbtől haladva a bonyolultabb felé. Ha egy felépítésben először az erő—gyorsulás-összefüggést célozzuk meg, ez a feltétel csak részben elégíthető ki, a tanuló a lényeges kísérleteknek csak egy előzetes fázisában vehet részt. Valamely ponton két méréssorozatból (egyikben a tömeget, másikban az erőt változtatva) egyszerre kell megragadni az erő, tömeg és gyorsulás árnyalt összjátékát olyan kísérletekben, amelyek invenciózus vizsgálódások, definíciók és egységválasztások keverékei.

Ha az erőt olyanformán vezetjük be, ahogyan javasoltam, korrekt módon, értelmező elvként jelenik meg, amit kísérletek kapcsolnak a maga antropomorf, izomérzés-jellegű elődjéhez, a húzás—nyomáshoz. Az így iskolázott tanulóban nem fog megdöbbenést okozni, hogy a modern fizika úgyszólván semmit nem mond az anyag elemi részecskéi közötti erőkről, hanem elsősorban a különböző típusú — erős és gyenge, hosszú és rövid időtartamú — kölcsönhatások végeredménye érdekli. Természetesen, nem azt akarom javasolni, hogy az erőknek kisebb szerepet szánjunk a mechanika Newton törvényeiből való kifejlesztésében: szerepük a klasszikus fizikában túl centrális ahhoz, hogy ez lehetséges vagy kívánatos lenne. A tény azonban mégis az, hogy a modern fizikában az erőnek mint olyannak a szerepe csökkent, ugyanakkor a lendület (impulzus) megmaradása ennek is egyik alappillére maradt.

Végül, az is meglapozott kívánság a dinamika bármiféle tárgyalásától, hogy ne úgy tálaljuk, amiből a tanuló arra a következtetésre jutna, hogy ez a teljes igazság. A hagyományos felépítésben ezt a követelményt nem lehetett kielégíteni, és a hamis benyomás, amely szerint a relativisztikus korrekciók (általában) kis értéke miatt a newtoni dinamika „majdnem" igaz, megerősödhetett. Valójában pedig a relativitás a dinamika alapfeltevéseit kérdőjelezi meg, és tanítványaink csak nyernek vele, ha néhányuknak alkalma lesz később visszaemlékezni, mik is voltak ezek az alapfeltevések. Kezdetben, amikor kölcsönhatás-vadászatot tartottunk, feltételeztük, hogy az egyenesvonalú egyenletes mozgás józan és könnyen felfogható eszme. Az általános relativitás felteszi a kérdést, hogyan általánosítsuk ezt nagy méretekre, a speciális relativitás pedig azt mutatja, hogy az abszolút tér, amelyben a mozgás lejátszódna, minden lehetséges ellenőrzést kizáró fikció. Vizsgálataink egy későbbi stádiumában a sebességek összeadásának egyszerű és magától értetődőnek látszó szabályát aggály nélkül elfogadtuk. Nem tettük fel a kérdést, hogy vajon a laborasztalhoz viszonyított sebességet tekinthetjük-e egyben a kiskocsiról észlelhető sebességnek is. Egyáltalán nem világos, hogy az „erő egyenlő tömeg-szer-gyorsulás" törvénybe hogyan épültek bele ezek a feltevések, főleg mert az egyenlet önkényesen a kölcsönható partnerek egyikére vonatkozik, és utalás sem történik az erő „másik végén" levő testekre, amelyekhez viszonyítva a sebességváltozások történtek.

* Ti. az I. törvény egyenesvonalú mozgásokra megállapított szűkebb alakjára hivatkozva. Az a tapasztalat, hogy az egyenesvonalú pályáról való kitéréshez is más test hatása szükséges, az I. törvény teljessé tételét jelenti. (Ford.)

HIVATKOZÁSOK:

1. Poincaré, H., Science and Hypothesis (Dover)
2. Hesse, M. B., Forces and Fields (Nelson)
3. Hanson, N. R., Patterns of Discovery (C.U.P.)
4. Association for Science Education, An Expansion and Teacher's Guide to Physics for Grammar Schools (John Murray, 1964), 60—68. o.

KÖNYVEK

Csákvári Béla: Szervetlen anyagok molekulageometriája

(A kémia legújabb eredményei)

Akadémiai Kiadó, 1976, 192 oldal

A fizikusok mindig irigykedve néznek „A kémia legújabb eredményei" és „A biológia legújabb eredményei" sorozatok fürge kis köteteire, amelyek által a tudomány aktuális irányzatai könnyen, hatékonyan, olcsón és frissen közkinccsé válnak a hazai szakemberek számára.

R. J. Gillespie „Molecular Geometry" című könyve egy kémikusnemzedék szemléletét alakítja át. (A Fizikai Szemle is írt róla.) A nem gömbszimetrikus atomi és molekuláris elektronállapotok úgy helyezkednek el a Pauli-elv értelmében, hogy a sajátfüggvények egymásra ortogonálisak legyenek. Mivel kevesebb csomófelület kisebb mozgási energiát jelent, a sajátfüggvények simák — ortogonalitásukat úgy érik el, hogy eltérő tartományokban különböznek zérustól. A molekulárisan kötő elektronpárok eme kölcsönös kiszorítása azt eredményezi, hogy egy atom kémiai vegyértékegyenesei egymástól maximálisan szögtávolságba kerüljenek. Ez a Pauli-kiszorítás a Gillespie-modell alapja, ez teszi lehetővé a molekulák egyszerű és hatékony sztereokémiai megértését. (Mivel nem az elektronpárok közti taszítóerő játsza a döntő szerepet, jobb volna vegyértékelektronpár-kiszorítást mondani vegyértékelektronpár-taszítás helyett.)

Gillespienek eme pedagógiailag és heurisztikusan hatékony modelljét mutatja be, fejleszti tovább és alkalmazza a periódusos rendszer elemeire Csákvári Béla könyve. A kémikus nyilván egyik vezérlő szempontként használja a szervetlenkémiai struktúrák elképzeléséhez, a kémiatanár az egyszerű tájékozódáshoz. De a fizikus és fizikatanár is élvezettel szemléli az egyes molekulaszerkezetet, amelyek kvantummechanikai leírása túlságosan bonyolult és fáradságos lenne, de amelyeket a kvantummechanikához közel álló Gillespie-modell megmagyaráz számunkra. A szerző érdeklődése legszívesebben azokra a struktúrákba koncentrálódik, amelyeknél az egyszerű Gillespie-modell nem elegendő, de amelyek a modell természetes továbbépítésével megérthetők.

Jó, amikor a kvantummechanikai alaptörvények, azok egyik fontos elemét kiemelő szemléletes modell és a gyakorlati felhasználás ilyen szerencsésen találkozik, ennyire időveszteség nélkül jut el kutatók, tanárok, tanulók százaihoz-ezreihez.

M. Gy.

VÉLEMÉNYEK

LEGFŐBB FELADATUNK: ÚJ ISMERETEK SZERZÉSE ALAPKUTATÁSOK UTJÁN

A. ALEKSZANDROV
a Szovjet Tudományos Akadémia elnöke

A szovjet népgazdaság fejlődésének legfontosabb, az SZKP XXV. kongresszusa által az 1976—1980-as tervidőszakra jóváhagyott irányvonalai közül különös jelentősége van a minden tudományágban folytatandó alapkutatásoknak. Ez természetesen nem véletlen. A tudomány alapvető kérdéseinek a megválaszolása a Szovjet Tudományos Akadémia kutatóintézeteinek a feladata. A Szovjet Tudományos Akadémia felelős azért, hogy a különböző tudományos intézetek és felsőfokú oktatási intézmények feladatkörébe tartozó tudományos alapproblémák feldolgozását megfelelő módon koordinálja és segítse.

Az alapkutatások fejlesztésének hangsúlyozása rendkívül nagyjelentőségű tény. A Szovjetunióban világosan és teljes mélységében érzékelik a tudomány fejlődésének logikáját, a tudományos-technikai haladás mechanizmusának törvényeit. A jelen pillanatban felmerülő kisebb feladatok megoldásával igen könnyű gyors és hatásos eredményt elérni.

Azonban nem ezek az eredmények határozzák meg az ország műszaki fejlődését, mivel a jó elméletnél nincs gyakorlatibb jelentőségű dolog. Éppen az alapkutatások útján megszerzett ismeretek változtatják meg az elfogadott és megingathatatlannak tűnő tudományos axiómákat, nyitnak új területeket a tudományban és technikában, gyökeresen változtatják meg a technológiát, eredményezik új anyagok felfedezését és olyan tökéletesen új, gyakran váratlan jelenségek felhasználása előt nyitják meg az utat, amelyeknek semmi közük sem volt az adott kutatás eredeti irányához.

A harmincas években a Leningrádi Műszaki Fizikai Kutatóintézetben I. V. Kurcsatov és más tudósok az atommag fizikáját kezdték tanulmányozni. Abban az időben még nem mindenki hitte, hogy ezek a kutatások gyakorlati haszonnal kecsegtetnek a termelés, az energianyerés szempontjából.

Ennek az alapkutatási iránynak a további sorsa ismeretes. Az eredmény: a voronyezsi, a Kola-félszigeti, a leningrádi atomerőmű. Ekkor rakták le az elméleti alapját a több szocialista országban később szovjet segítséggel felépített atomerőműveknek. A leningrádi atomerőmű reaktor-blokkjai egyenként egy millió kilowattosak, vagyis a világ leghatalmasabb reaktorai közé tartoznak. Megépítettünk egy új, nagy teljesítőképességű atomjégtörő-hajót, az Arktyikát, vízrebocsátottuk a „Szibir" atommeghajtású hajót. Ebben az ötéves tervben egy olyan 12—15 millió kilowattos atomerőmű beindítását tervezzük, amelynek reaktorblokkjai egyenként legalább egy millió kilowattosak lesznek.

Az atomtechnikát ma többezer gyárban alkalmazzák a gyártmányok különböző módszerekkel történő

Az SZKP XXV. kongresszusán elmondott felszólalás kivonata

ellenőrzésére; a geológusok ásvány-elemzésnél, az orvostudomány a diagnosztikában és különböző betegségek gyógykezelésénél hasznája fel az atomtechnikát.

A tudósokra az állami tervek fejlesztésének legfontosabb területein is nagy munka vár.

Az egyik legfontosabb és legbonyolultabb ilyen terület az energetika. Az energia átalakítása, a természet energiaforrásainak felkutatása és kitermelése, a felhasználás megfelelő rendszerének kialakítása az ország költségvetésének több mint a felét veszi igénybe. A fűtőanyag- és energiaegyensúly struktúrája fokozatosan megváltozik, mivel szükségessé válik az olaj és gáz optimálisabb felhasználása, az atom-energetika alkalmazási területeinek bővülése, a termonukleáris energiaforrások, az atommeghajtású generátorok, az energiaszállítás és felhasználás újabb és újabb módszereinek megjelenése és bekapcsolása az energiaermelésbe a század végén. Ezek a tervek az elektromos gépgyártás elé is új, magasabb követelményeket állítanak. Ehhez pedig sok tudományág együttműködésére van szükség.

Hosszabb időt igénybevevő kutatások is lesznek. Például a termonukleáris reakció laboratóriumi megvalósításától — amely ma már megoldottnak mondható — a gazdaságos erőművek létrehozásáig legalább tizenöt évre lesz szükség. A termonukleáris elektromos erőművek valószínűleg legalább 10 millió kilowatt teljesítményűek lesznek, így szükség lesz az energiafelhasználó csomópontok optimális elhelyezésére és az energiaszállítás optimális formáinak kutatására.

A távlati tervnek hosszabb időre szóló műszaki-gazdasági előrejelzéseket kell tartalmaznia. Ennek az állami tervnek tudományos, műszaki, politikai és gazdasági oldalai is vannak, és állandó ellenőrzésre és pontosításra szorul. A kérdés kidolgozásába az akadémia közgazdászokat, geológusokat, energetikusakat, atomkutatókat és tervezési szakembereket vont be. A munka népgazdasági jelentősége rendkívül nagy.

Sok más alapkutatás is széleskörű gyakorlati alkalmazást eredményez. A kiemelkedő színvonalú kozmikus kutatások ma igen nagymértékben kiszélesítették a televízió és a távközlés perspektíváit, lehetőséget adtak arra, hogy az „Orbita" távközlési műhold-rendszer segítségével az emberek milliói nézhessék a Szovjet Központi Televízió adásait, biztosítják a navigációt és a vihar-előrejelzéseket, alkalmazhatók a geológiai kutatásban, az erdőgazdaságban és hamarosan felhasználják ezeket az eredményeket a mezőgazdaságban is. A kvantumgenerátorok terén folyó kutatások szintén új lehetőséggel biztatnak egy sor iparágban. A lézer-sugárral ma igen nagy pontosságú fúrásokat végeznek, és az orvostudomány is felhasználja a sebek beforrasztásához. A lézer-sugarat alkalmazzák a fémek forrasztásánál és vágásánál, irányítják vele a nehéz természeti körülmények között leszálló repülőgépeket stb. Mindez az alapkutatásoknak köszönhető. Nagyon sok ilyen váratlan „oldalági" eredményt kaptunk, amelyeket gyakran lehetetlen előre elképzelni.

Fontos eredményeket hoztak a népgazdaságnak a nagy mesterséges gyémántok, a különleges vezetőképességű anyagok, a bonyolult formájú új műszaki- és ékszerkristály-fajták, újfajta félvezetők, a különleges vezetőképességű anyagok termonukleáris berendezésekben és kísérleti elektromos felszerelésekben történő felhasználása, új katalizátorok és új technológiák — többek között nitrogén-molekulák —, új mágneses kutatások stb.

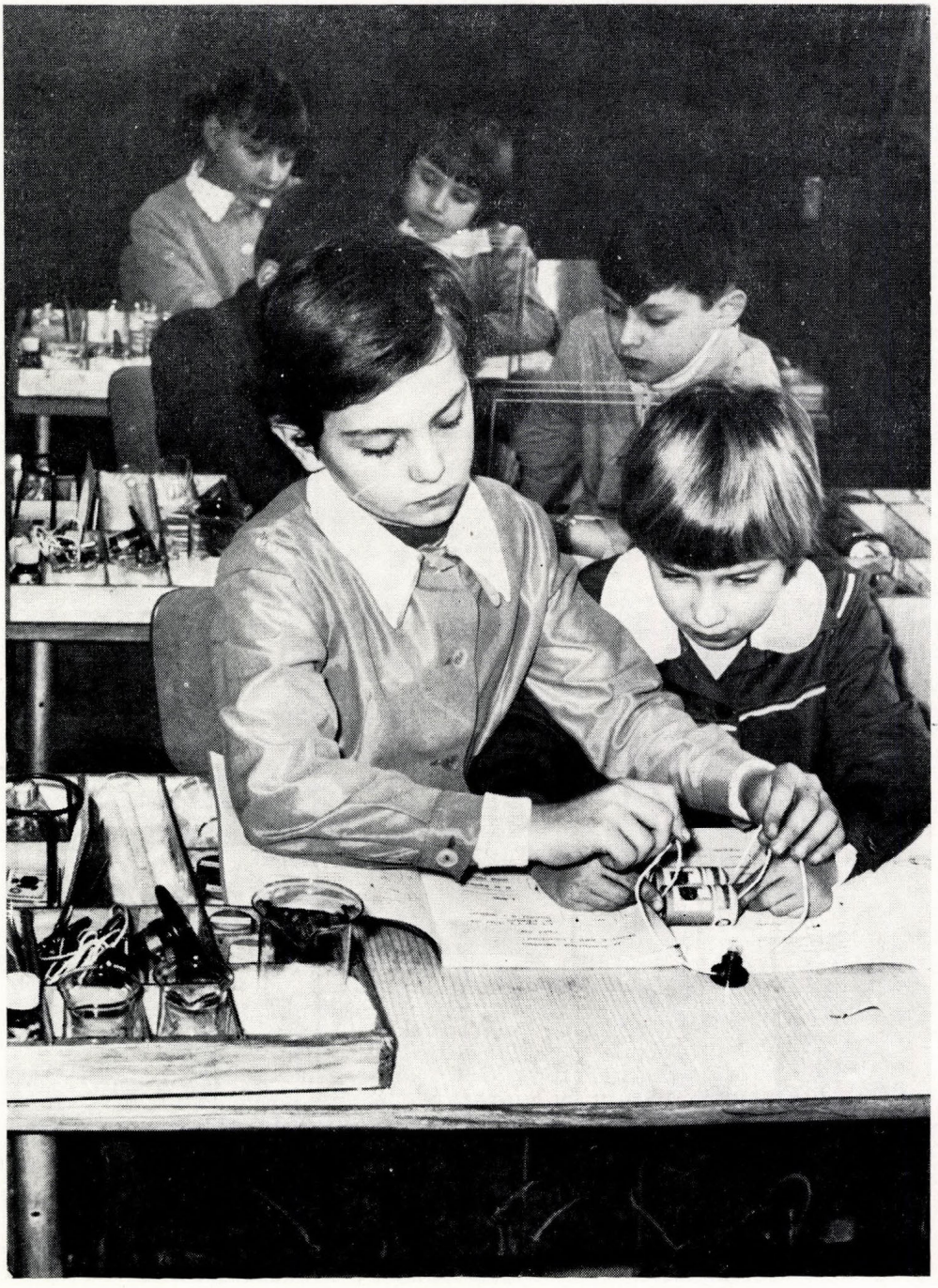
A Szovjet Tudományos Akadémia Szibériai Tagozatánál folytatott kutatások bebizonyították, hogy a legmélyebb rétegekben fekvő és legrégebben képződött olajmezők nincsenek genetikai kapcsolatban a középső rétegekben levő fiatalabb és már kiaknázás alatt álló olajmezőkkel. Ez azt jelenti, hogy jóval nagyobbra becsülhetjük a szibériai olajtartalékok mennyiségét.

A tudósok mindent megtesznek annak érdekében, hogy a tudomány minél több eredményt érjen el egész népünk javára.

A szerkesztésért felel: Turiné Frank Zsuzsa
Szerkesztőség: Budapest V., Anker köz 1, Eötvös Loránd Fizikai Társulat. Távbeszélő: 227-040
A kiadásért felelős: Siklósi Norbert igazgató
Kiadja a Lapkiadó Vállalat, Budapest VII., Lenin körút 9—11. Levélcím: 1906. postafiók 223 Távbeszélő: 221-293
Terjeszti a Magyar Posta. Előfizethető bármely postahivatalnál, a kézbesítőknél, a Posta hírlapüzleteiben és a Posta Központi Hírlap Irodánál (KHI 1900 Budapest V., József nádor tér 1.) közvetlenül vagy postautalványon, valamint átutalással a KHI 215-96162 pénzforgalmi jelzőszámlára
Előfizetés egy évre 72,—Ft; egyes szám ára 6,—Ft. Megjelenik havonta
76.3120 Akadémiai Nyomda Budapest V., Gerlóczy utca 2. — Felelős vezető: Bernát György
Index: 25.289

fizikai szemle

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat lapja



1976/7

A szerkesztő bizottság elnöke:

Marx György

A szerkesztésért felelős:

Turiné Frank Zsuzsa

A szerkesztő bizottság titkára:

Berényi Dénes

Szerkesztő bizottság:

Bałázs Béla, Barlai Katalin, Barta György, Bozóky László, Csekő Árpád, Dede Miklós, Fehér István, Flórián Endre, Gaal István, Groma Géza, Haiman Ottó, Hoffmann Tibor, Holics László, Károlyházy Frigyes, Keszthelyi Lajos, Kovács István, Mihály László, Schanda János, Soós Károly, Szigeti György, Tóth Eszter, Valkó I. Péter, Vermes Miklós

Címképünk:

Természetismeret-óra a harmadik általánosban: elektromos kölcsönhatás. Miskolc-Perecesbánya-telepi Általános Iskola

TARTALOMJEGYZÉK

W. Weisskopf: Az anyag alapvető szerkezete 241. old.
W. Weisskopf: A tudomány határai és korlátai 248. old.
Szilárd József: Zemplén Győző, Eötvös tanítványa 252. old.

A FIZIKA TANÍTÁSA

Javaslat a természettudomány tanítására (I.) 258. old.

EREDMÉNYEK

ESEMÉNYEK

Kiss József 275. old.

VÉLEMÉNYEK

Teleki Péter: Földön kívüli civilizáció 277. old.

СОДЕРЖАНИЕ

В. Вейсскопф: Фундаментальное строение материи
В. Вейсскопф: Границы и ограничения науки
Й. Силард: Дь. Земплен, ученик Р. Этвеша

ПРЕПОДАВАНИЕ ФИЗИКИ

Предложение относительно обучения естественных наук в средних школах I.

РЕЗУЛЬТАТЫ

СОБЫТИЯ

ОТЗЫВЫ И ВЫРАЖЕНИЯ МНЕНИЙ

INHALT

V. Weisskopf: Die fundamentale Struktur der Materie
V. Weisskopf: Grenzen und Schranken der Wissenschaft
J. Szilárd: Gy. Zemplén, ein Schüler R. Eötvös'

UNTERRICHT DER PHYSIK

Vorschlag bezüglich des Unterrichts der Naturwissenschaften in Mittelschulen I.

ERGEBNISSE

EREIGNISSE

STELLUNGNAHMEN UND MEINUNGSÄUSSERUNGEN

CONTENTS

V. Weisskopf: The fundamental structure of matter
V. Weisskopf: The borders and limitations of science
J. Szilárd: Gy. Zemplén, a pupil of R. Eötvös

THE TEACHING OF PHYSICS

Proposal concerning the teaching of sciences in secondary schools I.

RESULTS

EVENTS

OPINIONS

fizikai szemle

AZ EÖTVÖS LORÁND FIZIKAI TÁRSULAT LAPJA

Alapította Eötvös Loránd 1891-ben Mathematikai és Physikai Lapok néven

XXVI. évfolyam 7. szám 1976. július

AZ ANYAG ALAPVETŐ SZERKEZETE

V. Weisskopf

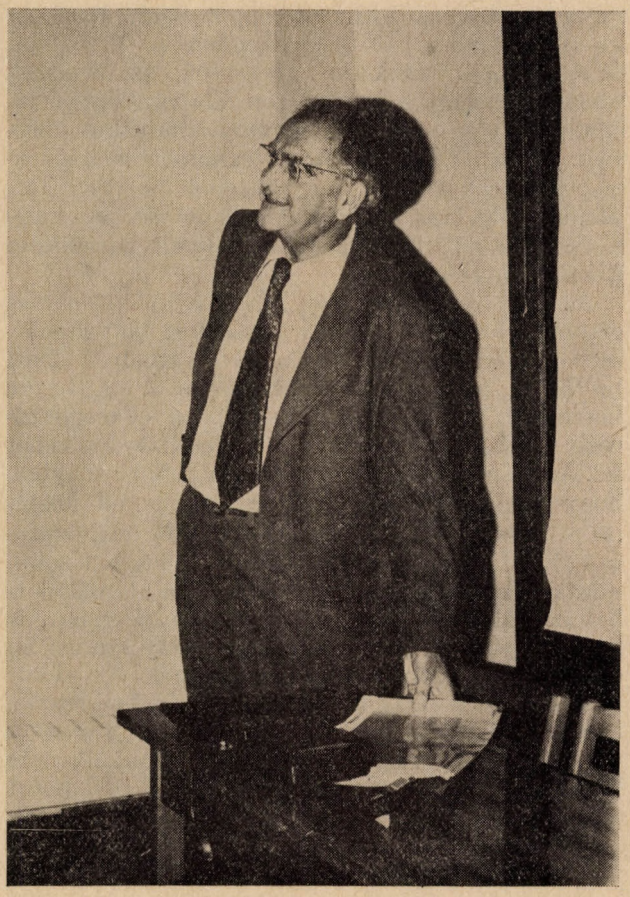
MIT, Cambridge, Massachusetts

Mélységesen meglepett és meghatott ez a meghívás. Nagyon büszke vagyok arra, hogy a Fizikai Társulat tiszteleti tagjává választottak. Örülök ennek a kitüntetésnek részben azért, mert Eötvös Loránd — kinek nevét ez a Társulat viseli — oly sokat tett a fizikáért, részben pedig azért, mert oly sok barátom és kollégám van itt Magyarországon akik érdekes eredményeket értek el, és néhányan közülük legközelebbi munkatársaimmá váltak.

Ma az anyag alapvető szerkezetére vonatkozó kutatásokról szeretnék beszélni. Ez a modern fizika egyik igen érdekes része, de — hangsúlyozni kell — csak egy része. Másrészt ez a kérdéskör régi hagyományokra is visszatekinthet, melyek kezdetei a filozófia és tudomány létrejöttének hajnalára nyúlnak vissza, kapcsolódva ahhoz a kérdéshez, hogy mik a Természet, a környező anyagi világ szerkezetének alapjai, és különösképpen mi az az ,,elem'', ami a különböző folyamatok, események során változatlan marad.

Ránézve a Természetre, különféle tárgyakat, anyagokat láthatunk, melyek mindegyike jellegzetes tulajdonságokkal, alakkal rendelkezik. Mégis az az elképzelés, hogy ezek a látszólag oly különböző anyagok mind szorosan összefüggenek a Természet valami alapvető ,,elemével'', igen régi eredetű. Newtont szeretném idézni, aki már mintegy 300 évvel ezelőtt kifejtette ezt az elképzelést. ,,Optika'' című munkájában ezt írja: ,,Mindazok a dolgok, melyeket eddig vizsgáltunk, arra engednek következtetni, hogy kezdetben Isten az anyagot szilárd, súlyos, kemény, áthatolhatatlan, mozgó részecskék alakjában teremtette meg. E részek tulajdonságai messzemenően különböznek azon végtermékek tulajdonságaitól amivé végül formálta őket. E primitív részecskék hasonlíthatatlanul keményebbek mint bármely belőlük alkotott test. Nagyon nehéz felbecsülni hol és hogyan tördelhető darabokra. Nem közönséges erő szükségeltetik ahhoz, hogy szétválaszthassuk azt, amit Isten egybeforrasztott a Teremtés során.'' Hangsúlyozni szeretném: Newton feltételezte, hogy azok a részecskék, melyekből a Természet felépül, rendkívül kemények. Ebben a korban ez volt az egyetlen lehetőség, ahogy ő — ill. a korabeli tudósok — el tudták képzelni, hogy az elemi részecskék a folyamatok során megtartják jellemző tulajdonságaikat.

A XIX. században aztán — jóval Newton eme állítása után — a tudomány megtalálni vélte az általa elképzelt ,,elemi'' részecskéket: az atomokat.



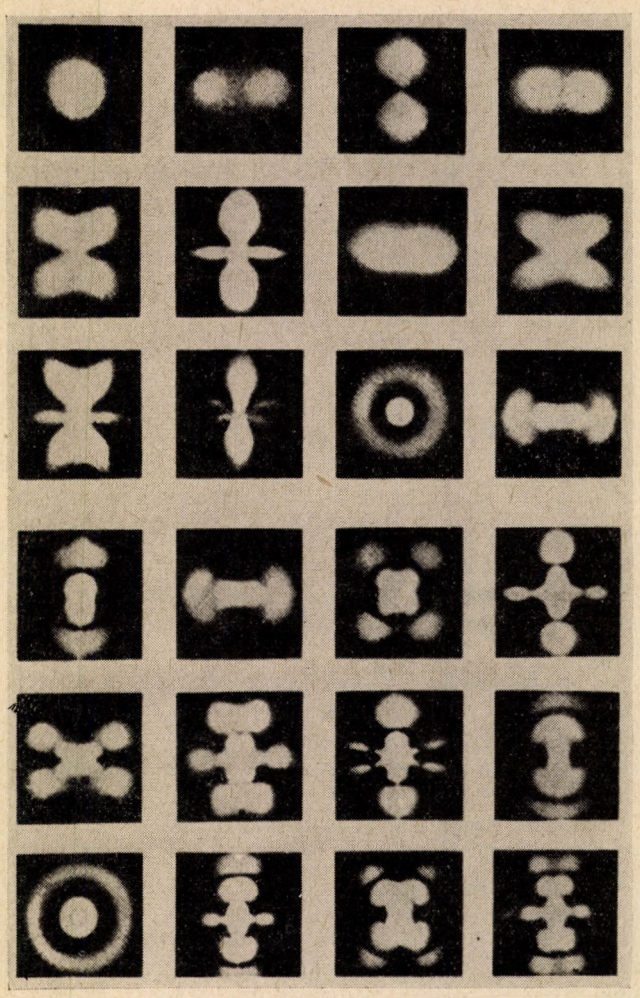
Viktor Weisskopfot 1975 június 23-án tiszteletbeli tagjává fogadta az Eötvös Loránd Fizikai Társulat. Ekkor hangzott el ez az előadás. Magnófelvétel alapján fordította Gajzágó Éva.

A XIX. századi tudomány bebizonyította, hogy az anyag atomokból épül fel, és akkor úgy tűnt, az atomok megfelelnek Newton elképzelésének: oszthatatlanok.

E század elején aztán a fejlődés merőben más irányt vett. 1911-ben Rutherford nevezetes kísérlete megmutatta, hogy valójában az atomok is tovább oszthatók, és még kisebb részekből: pozitív töltésű magból és elektronokból állnak. Rutherfordnak tehát sikerült szétbontani azokat a részeket, melyekről Newton azt mondta „lehetetlen felbontani a rendelkezésünkre álló erőkkel". A tudománynak szembe kellett néznie ezzel az új, alapvető ténnyel, ami lényegesen megváltoztatta a természettudományok további fejlődését a század elejétől kezdve. Az alapkérdés az volt, hogy érthetjük meg az atomok, ill. a makroszkopikus anyag tulajdonságait, ha az atomok a valóságban nem olyan hihetetlenül kemények, mint azt Newton elképzelte.

A megértés felé az első lépést a kvantummechanika megalkotása jelentette. A kvantummechanikát számos, egyenértékű alakban megfogalmazták, így a benne fellépő lényegesen új gondolatok is sokféleképpen illusztrálhatók. Válasszuk a hullámmechanikát! Az *első ábra* azt mutatja, milyen állóhullámok alakulnak ki egy gömbszimmetrikus vonzó térben. Az alapötlet itt az, hogy az atommag vonzó tere az elektronhullámokat bezárja a mag egy véges környezetébe, ahol így elektron-állóhullámok alakulnak ki. Az ábrán ezek eloszlása látható, egy atommag terében kötött elektron egymást követő kvantumállapotaiban. Ezek az eloszlások alapvető jelentőségűek a Természet felépítésében. Ezek az alakzatok az egyedüli alakzatok, melyek az elektron állapotaként létrejöhetnek egy atommag gömbszimmetrikus terében. Ezek az eloszlások és szimmetriatulajdonságaik meghatározzák az atomok viselkedését, alapul szolgálnak a molekulák felépüléséhez, meghatározzák az atomok és molekulák elrendeződését a kristályokban.

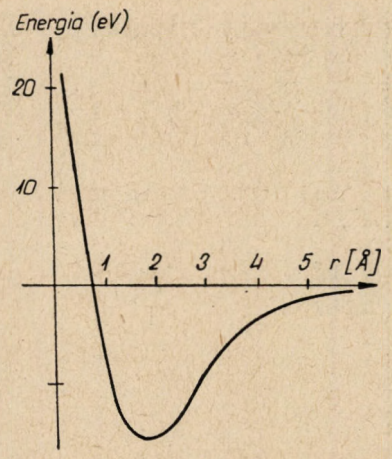
Az atomok tulajdonságai, melyek különösnek és érthetetlennek tűntek egy klasszikus bolygórendszer-szerű modellben, érthetővé válnak a fenti hullámmechanikai elképzelés alapján. A mag terére beszorított elektronhullám csak bizonyos meghatározott térbeli alakzatokat és energiaértékeket vehet fel. Az atom stabilitása következik abból a tényből, hogy meghatározott, véges energiát kell közölnünk ahhoz, hogy az atom állapotát megváltoztassuk. Mindaddig, míg a közölt energia kisebb, mint az első gerjesztési energia, az atom alapállapotban marad. Az atomok felépítésében fundamentális szerepet játszik még a Pauli-elv, mely szerint ha egy atomban egynél több elektron van kötve, akkor minden elektronnak különböző pályán kell lennie, illetve maximum kettő foglalhatja el ugyanazt a pályát, ellentétes spinállással. Ha a Pauli-elv nem létezne, valamennyi elektron az alapállapotot foglalná el, és nem alakult volna ki az atomoknak az a színes, változatos világa, amit jelenleg ismerünk.



1. ábra

Ez az elmélet volt a csírája a tudomány egyik legnagyobb fellendülésének. Utalok az 1925—28-as évek nagy napjaira: soha ilyen rövid idő alatt ilyen sok új jelenséget nem magyaráztak meg. Mindezek a jelenségek egyetlen erő: az elektromágneses kölcsönhatás alapján magyarázhatók. Nemcsak az atomok szerkezete, de a szóráskísérletek, a kémiai kötés, a szilárd testek, gázok, folyadékok és végül az élő anyag tulajdonságai — egyszóval mindazok a jelenségek melyeket normál hőmérsékleten környezetünkben megfigyelhetünk — mind megmagyarázhatók a nukleonok és elektronok elektromágneses kölcsönhatásai alapján.

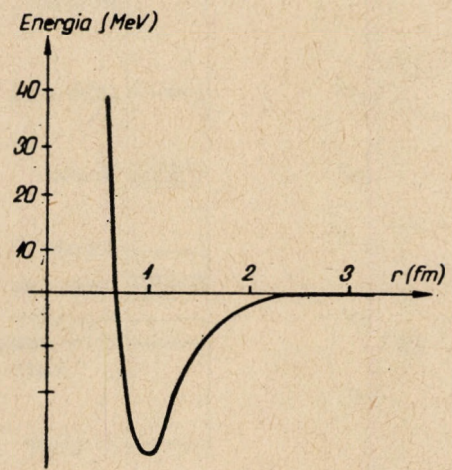
Példaként vegyük a kémiai kötést! Volt idő, mikor a kémiai kötést létesítő erőket külön erőtípusnak tekintették. Pedig ezek az erők alapvetően elektromos természetűek: a magok és elektronok közti vonzásból, ill. a mag-mag és elektron-elektron taszításból származnak. A *2. ábra* két atom összenergiájának kvalitatív változását mutatja a köztük levő távolság függvényében. Erről leolvasható: nagy távolságokon nem hat erő a két atom között, közelítve őket van egy energiaminimum, majd fellép egy erős taszítás, amikor az atomburkok már egymásba hatolnának. Íme, a kémiai erők egy kvalitatív leírása. A kémia



2. ábra

illetve a molekulák világának egy jellegzetes vonása, hogy kétféle részecske: elektronok és nukleonok jutnak szerephez benne. A nukleonokhoz képest az elektronok rendkívül könnyűek. Ez a tömegkülönbség igen lényeges a molekulafelépítés szempontjából. A könnyű elektronok nagy tér-részre szétkentek, és közös terük az atommagokat együtt tartja. Maguk az atommagok viszont a nagy tömeg következtében erősen lokalizáltak. Lényegében ez a tömegkülönbség teszi lehetővé, hogy „molekula-architektura" létezik — azaz a molekulák térbeli szerkezete olyan gazdag változatosságot mutat, mint azt a kémiában megismertük.

A következő lényeges felfedezés az anyag szerkezetének feltárásában 20 évvel követte Rutherford felfedezését: 1932-ben Chadwick megtalálta a neutront. Ezt követte az atommag szerkezetének feltárása. Felismerték, hogy maga a mag is protonok és neutronok bonyolult rendszere. Az atommag jóval kisebb méretű, mint az atom, és a kvantummechanika már megtanított arra, hogy minél kisebb kiterjedésű egy rendszer, annál nagyobb energia szükséges a felbontásához. A nukleáris világ feltárása tehát az atomfizikai kutatásoknál nagyobb energiát igényel. Az atomi világban megszokott energiákhoz képest 10^5-szer nagyobb energiákra van szükség.

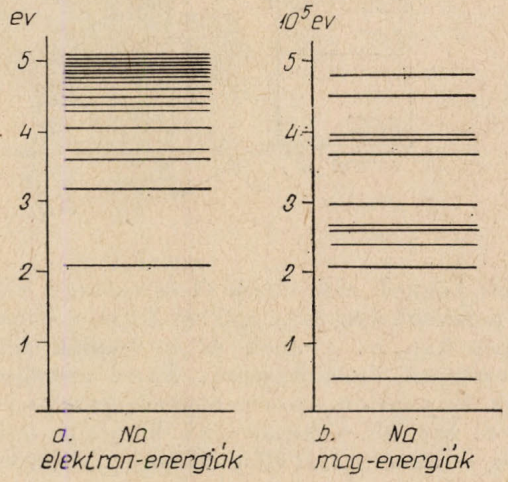


3. ábra

A további kutatások során felfedezték a magok gerjesztett állapotait, a radioaktív bomlást, az elektron-neutrinókat, a maghasadást és a magfúziót.

A lényeges az, hogy ebben az új világban új erők hatnak: nyilvánvaló, hogy a protonokat és neutronokat elektromágneses erők nem tarthatják együtt, hiszen a neutronnak nincs töltése. A *3. ábrán* a magerők távolság-függése látható két nukleon között. Látszólag az ábra teljesen hasonló ahhoz, amit a kémiai kötésnél láttunk, a különbség „mindössze" annyi, hogy a távolság nem Å hanem fermi, és az energialépték eV helyett MeV.

Beszéljünk még néhány szót a kémiai és magerők közötti különbségről! Mi a kémiai kötés? A kémiai kötés lényegében elektromos eredetű: az atomok között csak egyféle hatás hat, és ez elektromágneses jellegű — nevezetesen a magok és elektronok

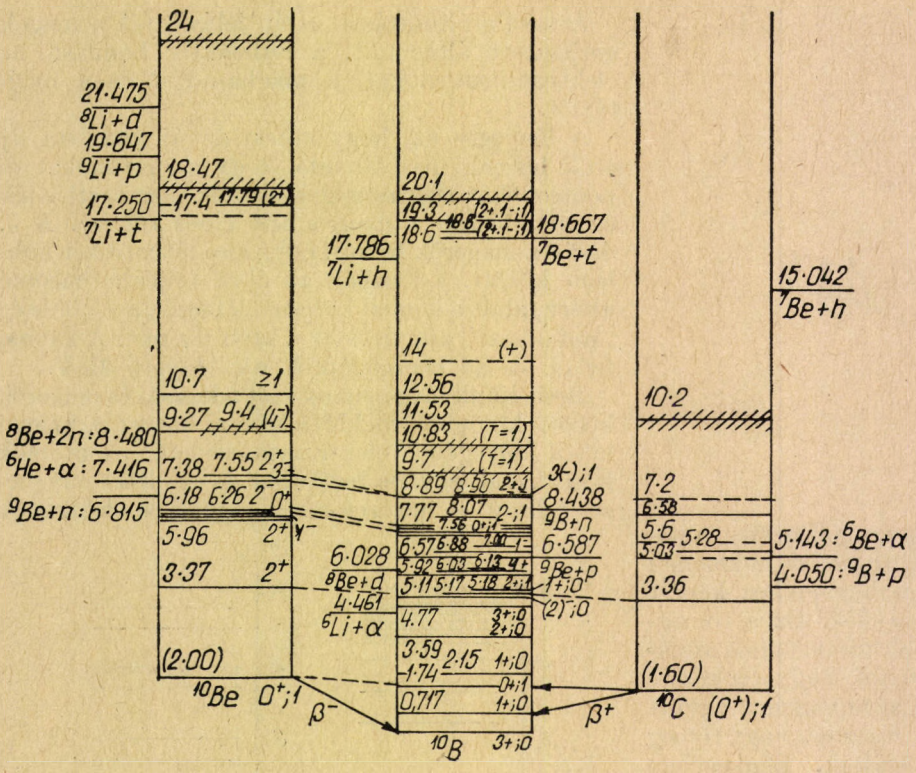


4. ábra

közti elektromos vonzás, illetve a mag-mag és elektron-elektron között fellépő elektromos taszítás. A kvantummechanika szabályai — ha gyakorlatilag bonyolult módon is, de elvileg teljesen — megadják a molekulák szerkezetét. Egyúttal hangsúlyoznom kell, hogy a kémiai erők megértésének alapja az, hogy ismerjük az atomok felépítését, belső szerkezetét.

Ami a magerők mibenlétét illeti, úgy érzem, mindaddig nem fogjuk megérteni, míg fel nem tártuk a nukleonok belső szerkezetét. Meggyőződésem, hogy a fejlődés itt is a kémiához hasonló módon megy majd végbe: Ha megmérjük a nukleonok belső szerkezetét, egyúttal kezünkben lesz a magerők megértésének kulcsa is. Nem állítom, hogy ez teljesen azonos módon fog végbemenni, de fő vonalaiban a fejlődés párhuzamosan fog futni az atomfizikai megismeréssel. A *4. ábra* a Na elektronszintjeit, illetve a Na mag nukleáris gerjesztéseit tünteti fel. A különbség lényegében az energialéptékben mutatkozik: az atomi szinteknél eV, míg a maggerjesztéseknél 10^5 eV — de ettől eltekintve az általános jellemzők nem túl különbözőek.

A két rendszer egy lényeges eltérése az alkotórészek különbözőségéből fakad. Mint azt már az atomi rendszerek leírásánál hangsúlyoztam, az



5. ábra

atomok könnyű elektronokból és ezekhez képest jóval nehezebb magokból épülnek fel, és ez lényeges szerepet kap az atomok és molekulák térbeli szerkezetének kialakításában. Ezzel szemben a magok lényegében azonos méretű részekből állnak, és így nincs kitüntetett központi részük. A mag — az atommal ellentétben — „demokratikus" rendszer.

Az *5. ábra* három mag, a Be^{10}, B^{10} és C^{10} energiaspektruma. Látszólag nagyon hasonlóak az atomi spektrumokhoz, kivéve az átmeneteket: újfajta átmenetek figyelhetők meg. Nevezetesen: a már jól ismert foton-átmenetek mellett fellépnek olyan átmenetek is, melyek a töltést változtatják meg. Ez az újfajta átmenet egy új kölcsönhatásnak: a gyenge kölcsönhatásnak felel meg. Ez nem egy fénykvantum, hanem egy lepton-pár: elektron és antineutrinó kibocsátásával jár, és az átmenet során egy neutron protonná alakul: $n \rightarrow pe\bar{\nu}$.

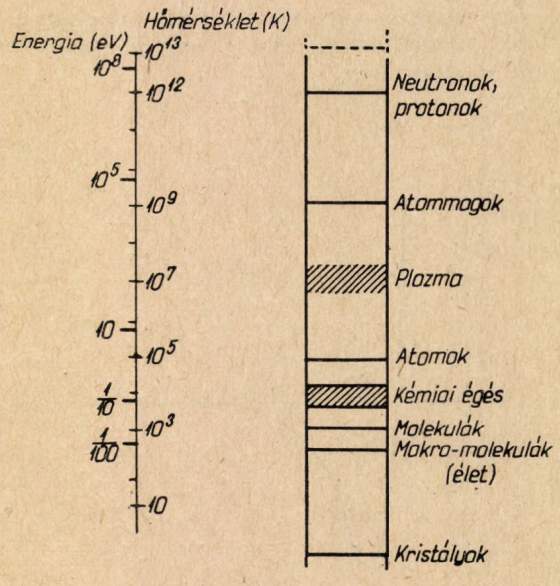
Ezzel eljutottunk az 1938—39-es évekhez. Ebben az időben a részecskék világa még egyszerűnek tűnt. Ismertek voltak a protonok, neutronok, elektronok, neutrinók, fotonok — és ez volt minden. Az egész ugyan egy kicsit bizonytalan volt, mivel a nukleáris erők léte és feltáratlan jellege azt sugallta, hogy létezhet még „valami más" is — de ezt a „valami mást" akkor még nem ismerték.

A *6. ábra* egy ú.n. „kvantumlétra", melynek legalján a molekulák foglalnak helyet. A molekulák atomokból épülnek fel, és az őket összetartó kémiai kötés jól magyarázható az atomokat alkotó nukleonok és elektronok között ható elektromágneses erőkkel. Ugyanez írja le az atomok szerkezetét is.

A következő szint ezen a „kvantumlétrán" az atommagoké. A magok protonokból és neutronokból állnak. Ha az analógiát folytatni akarjuk, a magerők természete a következőképpen lenne leírható: ha ismernénk a nukleonok alkotóelemeit — és ezek lehetnek kvarkok — és az ezek között ható erőket, magyarázni tudnánk a magerőket is.

Ilyen irányú fejlődés valóban végbement, és érdekes, hogy ismét 20 évnek kellett eltelnie, amíg 1952-ben Fermi és munkatársai felfedezték, hogy a protonnak magának is vannak gerjesztett állapotai. Ez volt a kulcsa egy új világnak: a szubnukleáris jelenségek világának.

A későbbiek során a nukleonok újabb, magasabban gerjesztett állapotait is megtalálták. Mindebből



6. ábra

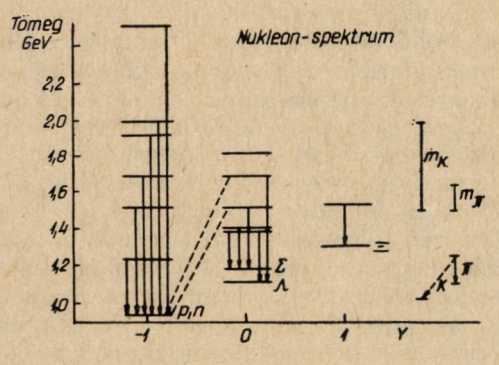
következik, hogy valami van a nukleonon belül, a proton és neutron maga is egy-egy belső dinamikával rendelkező rendszer.

Az így megnyílt új — szubnukleáris — világ ismét alapvetően különbözött a már feltárt molekuláris, atomi és nukleáris világtól. Új típusú részecskéket ismertünk meg: nehéz elektronokat, a neutrinók egy új fajtáját, mezonokat. Hangsúlyoznom kell, hogy az atomi és nukleáris világgal ellentétben a szubnukleáris világot valójában nem értjük. Az atomi világot elég átfogóan ismerjük már — és nemcsak a mélyén levő alaptörvényeket, de ezek számos következményét is, kezdve a molekulák szerkezetétől az élő anyag bizonyos tulajdonságaiig. Ami a nukleáris világot illeti, feltéve, hogy ismerjük a nukleonok építőköveit és az ezek között ható erőket, a kvantummechanika törvényei szerint a nukleáris jelenségek is — pl. maghasadás — leírhatók lennének.

Elérve a szubnukleáris szintet, az analógia már nem folytatható — a lánc megszakad. A szubnukleáris világ törvényei annyira különbözőek, annyira mások, hogy az egész tudományos világ mélységes zavarban van.

A 7. *ábrán* a proton és neutron gerjesztett állapotai láthatók. Maga a proton és neutron alul foglal helyet, és e fölött szerepelnek a p és n különböző gerjesztett állapotai: dublettek, triplettek, kvartettek, melyek különböznek nemcsak energiában, de töltésben és ritkaságban (az ábrán hipertöltésben) is.

Ebben az új, szubnukleáris világban ismét fellép egy új átmenet; a foton- ill. leptonpár-kibocsátás — az elektromágneses ill. gyenge átmenetek mellett. Az új folyamatok — és túlnyomórészt *ezek* a gerjesztett állapotok jellemző bomlásai — mezonkibocsátással járnak. A kibocsátott mezonok lehetnek π vagy K-típusúak, attól függően, hogy az átmenet során a ritkaság változik vagy nem. Új és lényeges különbség az atomi és nukleáris átmenetekkel szemben, hogy a gerjesztési energiák nagyságrendileg megegyeznek a részecskék nyugalmi tömegével. Ez a helyzet nyilvánvalóan megköveteli egy alapvetően újfajta fizika felépítését, amiben jelentős szerepet kap az antivilág is, — hiszen feltétlenül számításba kell venni a párképzés illetve szétsugárzás lehetőségét. Ilyen nagy energiákon már lényegessé válik a részecskék képződése.



7. ábra

Ez az a pont, ahol emlékeztetnem kell egy módszerre, ami jól bevált az atomok és atommagok világának tanulmányozása során. Arról van szó, hogy miből tudhatjuk, milyen alkotóelemekből épül fel egy részecske? Ennek eldöntésére ismeretes egy igen egyszerű eljárás. Íme, itt egy óra — mellesleg egy igen jó svájci óra — aminek kíváncsiak vagyunk a belső szerkezetére. Törjük össze, és nézzük meg, mi jön ki belőle —, így megtudhatjuk, milyen alkotórészekből áll. Ugyanezt a módszert alkalmaztuk az atomok és atommagok szerkezetének feltárásánál. — De a példát folytathatjuk is. Ha az órára kalapáccsal ráütünk, szikrák pattannak ki belőle. Vajon arra következtetünk-e, hogy az órában szikrák voltak eredetileg? Nyilvánvalóan nem! Ugyanez történik, ha magokat bombázással gerjesztünk és ennek során lepton-párok keletkeznek — noha jól tudjuk, a magokban eredetileg ezek nem voltak jelen, és csak az ütközés folyamatában keletkeztek. Ugyanez a helyzet két atom ütközése esetén, — a keletkező fotonok nem voltak benne az eredeti atomokban. Ezekben a példákban könnyen megkülönböztettük, mik azok az elemek, amik alkotó-elemek, ill. amik az ütközés során keletkeztek. A szubnukleáris világban ez már nem ilyen nyilvánvaló. Pl. egy buborékkamra-felvételen a következő folyamat látható: bejön egy protonnyaláb, ütközik, számos mezon keletkezik, és végül a meggyengült protonnyaláb kilép. És itt a nehézség: nem tudjuk, mi jött „belülről" és mi keletkezett az ütközés során?

A kép tehát egyre bonyolultabb. Gyakran hallhatták, hogy az elmúlt évek során a részecskefizikusok több száz új elemi részecskét fedeztek fel. Véleményem szerint ez a kép hamis, nem erről van szó. Valójában nem fedeztünk fel új elemi részeket, épp ellenkezőleg: úgy tűnik, hogy számos részecske, melyeket eddig eleminek tekintettünk maga is összetett rendszer csakúgy, mint az atomok vagy atommagok.

Rendszerezve az eddig ismert részecskéket, ezek négy nagy csoportba sorolhatók:

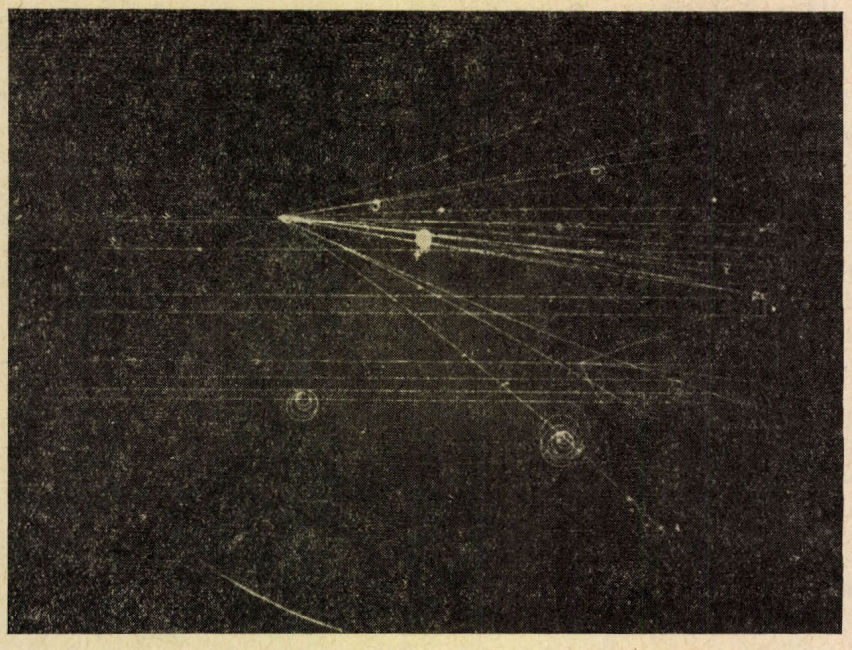
I. Barionok: (p, n + ezek gerjesztett állapotai)
II. Mezonok: (π, K + ezek gerjesztett állapotai)

} Hadronok = erősen kölcsönható részek.

III. Leptonok: (e, ν_e, μ, ν_μ, + antirészek)

IV. Erőtér-kvantumok: γ, ($W^{\pm}$, Z°)

Ezzel a képpel kell jelenleg szembenéznünk. Emlékeztetek a XIX. század végére, mikor az atomok világa tűnt hasonlóan bonyolultnak. Rutherford, Schrödinger, Dirac — tehát a kvantummechanika megalkotása előtt — nem létezett hatásos elmélet, amely magyarázni tudta volna az atomok szerkezetét, tulajdonságait. A Thomson-modell és a modellek végtelen sora csődöt mondott. Hasonló helyzetben vagyunk most a szubnukleáris világ tekintetében; mi is számtalan modellt próbálunk felállítani a hadronok belső szerkezetére.



8. ábra

Ezek a modellek általában kvarkokról beszélnek. Közös vonásuk, hogy bennük mind a barionok, mind a mezonok kvarkokból épülnek fel. Nem akarok a részletekben elmerülni, csak egy vázlatos képet adni a helyzetről. Például az a kép, amit a proton és neutron gerjesztett állapotairól mutattam, arra enged következtetni, hogy a barionokat 3 kvark kötött állapotai adják. Erre utalnak mind a kvantumszámok, mind a szimmetriarendszer. A 3 kvark szokásos neve: u (fel), d (le), s (ritka) — továbbá léteznek még a megfelelő antikvarkok is. Ebben a képben a proton szerkezete $p = (u\ u\ d)$, a neutroné $n = (d\ d\ u)$. A mezonok mint kvark-antikvark $(q\ \bar{q})$ kötött állapotok jelentkeznek.

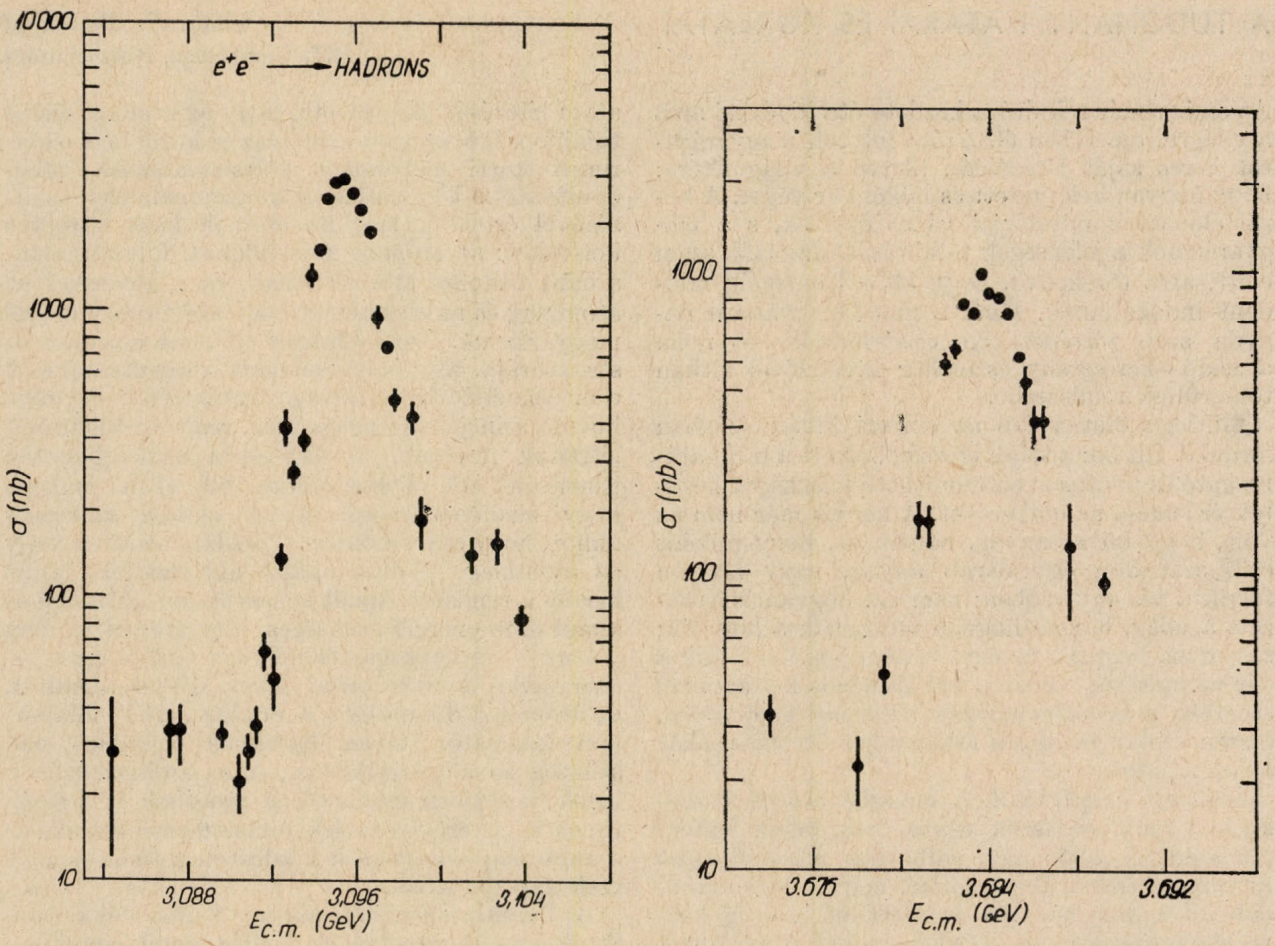
A kvarkok segítségével felépíthető a hadronok világa, a probléma csak az, hogy soha senki nem látta még ezeket a részecskéket. (Rutherford könnyebb helyzetben volt: ő látta az elektronokat és atommagokat!) Mégis, ma már egy sor kísérlet utal közvetve arra, hogy ennek az elképzelésnek komoly valóságtartalma lehet. 4 évvel ezelőtt a SLAC-MIT együttműködés keretében elvégeztek egy — a Rutherford-féléhez nagyon hasonló — kísérletet. Mint tudjuk, Rutherford α-részeket szóratott fémfólián, és azt találta, hogy ezek egy része igen nagy szögben szóródik. Ebből azt a következtetést vonta le, hogy az atomokban kis térrészre koncentrálódott pozitív töltések vannak.

A SLAC-MIT kollaboráció nagyon nagy energiájú elektronokat szóratott protonokon, és éppen úgy mint Rutherford, azt találták, hogy fellép a nagyszögű szórás. Ebből ismét arra lehet következtetni, hogy a protonon belül pontszerű töltések találhatók. Ez már egy közvetett bizonyítéka a kvarkok létének. A baj az, hogy közvetlen bizonyíték nincs — ezek a részecskék nem szabadulhatnak ki a hadronok belsejéből, sosem lépnek ki szabadon — és ez olyan tény, ami még magyarázatra szorul.

A hátralevő rövid kis időben vázolni szeretném az azóta megtett előrehaladást. Ebben az évben nagy izgalmat keltett a részecskefizikusok világában néhány új, hosszú élettartamú részecske felfedezése.

A *8. ábrán* két nagy energiájú proton ütközése látható. Az ütközés során számos mezonpár keletkezik. A keletkező mezonok igen gyorsan pionokra ill. kaonokra bomlanak, majd ezt egy lassú folyamat követi: a π és K mezonok gyenge bomlása. Az új felfedezés az volt, hogy a keletkező nehéz mezonok közül néhány *nem* bomlik pionokra vagy kaonokra. Nevezetesen nagyenergiájú leptonok ütközésénél két olyan nagy tömegű részecskére bukkantak, melyek bomlása igen lassan megy végbe (*9. ábra*). Számos elméleti értelmezés született a jelenség magyarázatára, amiből csak kettőt említek. Az első szerint, ezek az új részecskék két új fajta kvarkot tartalmaznak — melyek még a ritka kvarkoknál is ritkábbak. Ezeket „csinos" *(c)* kvarkoknak nevezik. E modell szerint tehát az új részek *(c $\bar{c}$)* kötött állapotok. A második magyarázat, hogy az új részek lehetnek a gyenge kölcsönhatás keresett kvantumai. Ez az utóbbi magyarázat nem túl rokonszenves: a részecskék tömege túlságosan kicsi a várakozáshoz képest. Ezért én inkább az első magyarázatban bízom.

Az utóbbi évek kutatásának van még egy másik igen érdekes területe: az elektromágneses és gyenge kölcsönhatások új, egyesített elmélete. Bizonyos hasonlóságot gyenge és elektromágneses folyamatok között már régebben is megfigyeltek. Ez a hasonlóság még erősebbé vált akkor, mikor felfedezték hogy léteznek olyan gyenge folyamatok, melyek során töltéscsere nem történik. Ebből következik, hogy a gyenge kölcsönhatásoknak is van semleges kvantuma. Az emberben megerősödhet így az az elképzelés, hogy a gyenge illetve elektromágneses kölcsönhatások kvantumai lényegében egyetlen tér különböző komponensei, egy



9. ábra

„szuper-téré", amely egyesíti a két jelenségkört. A XIX. századi fizika egyik nagy eredménye volt, amikor Faraday és Maxwell munkássága nyomán feltárult, hogy az elektromos és mágneses jelenségek nem függetlenek, hanem egyetlen kölcsönhatás kétféle megnyilvánulása. A Salam és Weinberg által javasolt modell ismét két nagy jelenségkört, az elektromágneses és gyenge kölcsönhatások elméletét kívánja egyesíteni. Nem kell külön hangsúlyoznom, hogy egy ilyen nagy „összegezés" mindig nagy jelentőségű egy tudományágban.

Összefoglalva az elhangzottakat, elmondhatjuk, hogy e század kutatásai során azt tapasztaltuk, hogy amint egyre magasabb energiaküszöböket lépünk át, mindig újabb és újabb világ tárul fel. Felmerül a kérdés, lezárul-e ez a folyamat valahol? Én magam azt hiszem, hogy ez a sor sosem zárul le: a Természet sokkal gazdagabb és kimeríthetetlenebb, mint azt emberi elme valaha is elképzelheti.

Hadd fejezzem be végül egy hasonlattal! A fizikai kutatás jelenlegi helyzetét mélységesen rokonnak érzem az 1492 körüli évekkel — azokkal az esztendőkkel, illetve korszakkal, amikor Columbus felfedezte Amerikát. Annak az időszaknak legfontosabb személyiségei a navigátorok és hajóépítőmesterek voltak. Őket én a jelenlegi gyorsítótervező mérnökökhöz, fizikusokhoz érzem hasonlónak. Hiszen jelenleg a nagyenergiájú fizika nagy éveit éljük. A kísérleti fizikusok hasonlóak azokhoz a katonákhoz, tengerészekhez, akik a hajókat elhagyva partraszálltak és az új partokon újfajta, ritka — nem részecskékre! — növényekre, emberekre bukkantak. Végül az elméleti fizikusok azokhoz az emberekhez hasonlóak, akik mindezen idő alatt kényelmesen ültek Madridban, és azt mondták Columbusnak, hogy Indiába jutott el.

Remélem, sikerült képet adnom a fizika legutóbbi éveinek nagyarányú fejlődéséről. Hangsúlyoznom kell, hogy ez a fejlődés még csak az elején tart, de bizonyos hogy egyre kimerítőbb és kielégítőbb magyarázatot ad majd arra a kérdésre, hogy miért olyan a Természet, mint amilyennek megismertük.

A TUDOMÁNY HATÁRAI ÉS KORLÁTAI

Victor F. Weisskopf
MIT, Cambridge, Massachusetts

Az ember már a kultúra kezdete óta kíváncsi arra a világra, amelyben él. Azóta folyton magyarázatot keres saját létezésére, illetve a világ létére: hogy hogyan keletkezett és miként ér véget. A korai elméletek mitológiai vázra épültek, s a magyarázatok a jelenségek totalitását tartották szem előtt, arra törekedve, hogy alfától omegáig mindent indokoljanak. Ezek a mondák gyakran nagyon szép történetekké csiszolódtak — noha a zsidó—keresztény eszmekör kivételével ritkán tömörültek rendszerbe.

Mintegy ötszáz éve az emberi kíváncsiságban fordulat állt be: a teljes igazság helyett a meghatározható és pontosan elkülöníthető jelenségek kezdték érdekelni az embereket. A kérdés már nem az volt, hogy mi az anyag, hanem az, hogy miként esik szabadon egy darab anyag, vagy hogyan folyik a víz egy csőben: nem az, hogyan keletkezett a világ, hanem hogyan mozognak a bolygók; s nem az, hogy mi az élet, hanem hogyan folyik a vér az erekben. Tehát a túl általános kérdésekkel szemben a kevésbé átfogók részesültek előnyben, hiszen ezekre bizonyos fokig teljesebb válaszokat lehetett adni.

Mintegy kárpótlásul, a kevésbé átfogó kérdésekre kapott válaszok egyre átfogóbbak lettek. Módszereink csak úgy válhattak áthatóbbakká és betekintésünk alapvetőbbé, hogy a tudománynak fel kellett hagynia az abszolút igazság közvetlen keresésével, és vállalnia kellett a gyakorlat vég nélküli kerülő útjait.

A mozgó tárgyak megfigyelésén alapszik az égi mechanika és általa érthettük meg a gravitáció törvényének egyetemes érvényességét is. A súrlódás, valamint a gázok tanulmányozása a termodinamika általános törvényeihez vezetett bennünket. A békaizom rángatózása és a voltaelem tanulmányozása által jöttünk rá az elektromosság törvényeire, amelyekre alapvető szerep hárul az anyag szerkezetében. Ezt a rendkívüli fejlődést Einstein a tudomány nagy csodájának tartotta: „A természetben az a legérthetetlenebb, hogy érthető."

Az aprólékos tanulmányozás által az ember lassan szilárd alapot, tudományos világnézetet alakított ki magának, annak érdekében, hogy eligazodhassék az őt körülvevő természetben.

Ez a világnézet, „a világ tudományos mítosza", nem más, mint az elmúlt ötszáz év során nyert és a huszadik században összefoglalt tudományos felismerések eredménye. E nézet kialakulásában az egyik legfontosabb szerep a kvantumelméleté volt. A kvantummechanika már a századunk elején bebizonyította a különböző atomok sajátosságait és indokolta a kilencvenkét különböző atom létezését. Kimutatta, hogy az atomok összes tulajdonságai az atommag és az őt körülvevő elektronok közti elektromos kölcsönhatásnak tulajdoníthatók. Ugyancsak a kvantumelmélet segítségével értettük meg az atomok közt létrejövő kötéseket: az atomok molekulákat, folyadékokat, szilárd testeket stb. alkotnak, és a kötéseket az atommag és az elektronok közt elektromos erővel magyarázzuk. Ezzel feltárult előttünk a természet struktúrája. Egy és ugyanannak a kvantumelvnek a megismétlődése az anyag szerkezetének egymást követő szintjein jó példa arra, amit én kvantumlétrának nevezek. Megértéséhez szükségszerűen ismernünk kell az energiaküszöbök elvét. Tudjuk, hogy bizonyos energiaküszöb elérése szükséges ahhoz, hogy egy rendszer — például az atom vagy az atommag — dinamikáját aktivizáljuk. Minél kisebb a rendszer, annál nehezebb azt aktiválni és annál több energia szükséges. Egy atomot néhány voltnyi — a napsugárzásból vagy tűzből nyert — energiával is aktivizálni lehet. Ezzel szemben, az atommag dinamikája a Földön „alvó" állapotban található; olyan hatalmas energiára van szükség az aktivizálásához, mint amilyen a csillagok belsejében található. A protonok és a neutronok közti erők nem elektromos természetűek, — a velük kapcsolatos sok kérdésben a tudósok még csak tapogatóznak.

A kvantumlétrának három fontos foka van. Az első az atomi világ, az a világ, amelyben élünk amelyet az atommag és az elektronok közt elektromos vonzás ural — a kémia, a biológia és a geológia világa. A következő szint a nukleáris világ, amely természetes körülmények közt nem él bolygónkon. Ez a világ csak ott működik, ahol elegendő energia található, — például a csillagok belsejében. A gerjesztett atommagok, a nukleáris reakciók, a magfúzió, az atombomlás és a radioaktivitás világa a Földön; lényegében ember teremtette világ. A kvantumlétra harmadik foka az atommagon túli, a szubnukleáris világ, ahol az ember egészen új jelenségekkel találkozik, — gerjesztett protonokkal és neutronokkal, mezonokkal, új részecskékkel, nehéz elektronokkal és antianyaggal. Ebben a világban olyan hatalmas energiacserék léteznek, hogy a döntő szerep arra a folyamatra hárul, amelyben a sugárzás anyaggá és antianyaggá alakul. Azt, hogy ez a világ hol található a természetben, nem tudjuk: talán olyan kataklizma-jelenségekben, mint a csillagok vagy a csillagrendszerek robbanásai, vagy talán az úgynevezett „Big Bang", a nagy robbanás során a világmindenség kialakulásakor.

Ezt a tudományos világfelfogást röviden áttekintve, rátérhetünk most a tudomány határainak a felvázolására. Kétféle határt különböztetek meg: külsőt és belsőt. A külső határ elkülönít bennünket a természet olyan jelenségeinek a felderítésétől, amelyeknek az elvei jelenleg még nem ismertek. A belső határ sokkal szélesebb övezet,

---

V. Weisskopf 1975-ben megkapta az Európai Fizikai Társaság Powell-díját. Előadása elhangzott az Európai Fizikai Társaság bukaresti konferenciáján. Fordította Kászoni István.

ahol az alapvető elveket ismeretesnek tartjuk, de ahol a jelenségek rendkívüli bonyolultsága megakadályozza azoknak a megértését és magyarázását. A belső határ a kvantumlétra első fokára utal, az atomi világra, amit mi atommagokból és elektronokból álló rendszerként értelmezünk, amelyben különböző erők működnek. Az atomi világot a nukleáris világtól teljesen elkülönítve is tárgyalhatjuk, mert mindaddig, amíg csak a földi folyamatokra korlátozzuk figyelmünket — olyanokra, ahol az energisacsere sokkal alacsonyabb annál, semhogy az atommagot gerjeszthetné — az atommag „alvó" állapotban van, csak úgy hat, mint az atomot összetartó elektromos erő központja. Habár az atom működésének elveit ismerjük, e működés bonyolultsága továbbra is sok gondot okoz.

A továbbiakban hadd példázzam mindezt. Tegyük fel, hogy egy csoport jó képesítésű fizikus születésétől fogva egy zárt épületben él, és sohasem volt lehetősége arra, hogy természetes struktúrákat lásson. Mi volna az eredménye annak, ha ezeket a fizikusokat felkérnénk: írják le, hogyan jelentkezhetnek az atomok a természetben — feltéve, hogy ismerik az atom felépítését illető elveket? Több mint valószínű, hogy rájönnének: az atomok léteznek: bizonyára azt is megmondanák, hogy több atom molekulában egyesül és talán bizonyos egyszerűbb molekulákat is előrelátnának. A makromolekulák vagy a molekula láncok, az a tény, hogy a molekulák egyesülése által szilárd tárgyak jönnek létre, a különböző szilárd anyagok létezése — mint a fémeké, kristályoké vagy a sóké —, szintén megsejthető. De meggyőződésem: ezek a tudósok sohasem jönnének rá, hogy folyékony anyagok is léteznek. A folyadék nagyon bonyolult jelenség, amelyben a molekulák együtt maradnak és mégis mozognak, csúsznak egymás közt. Egy ilyen különös anyag létezése egyáltalán nem nyilvánvaló. Ugyanígy, a kémia jelentős része és — természetesen — az élet létezése nem kikövetkeztethető. Ezek szerint azt a következtetést vonhatjuk le, hogy az elvek megértése nem jelenti magától értetődően a jelenségi világ megértését is.

Itt egy érdekes kérdés merül fel: miután mi nem értünk meg minden földi körülmények közt fellépő jelenséget, biztosak lehetünk-e abban, hogy az atomi világ alapvető elveit ismerjük? Kevés tudós állítaná ma azt, hogy még vannak felderítetlen alapvető elvek az élettel vagy bármely egyéb fentebb említett jelenséggel kapcsolatban. De századunk elején egészen más volt a helyzet. Alig egy pár évtizede, hogy Crick és Wattson leírta a DNS kettős csavar szerkezetét. Ismereteink pillanatnyi állapotáról határozott értékelést adni nehéz, de ma általános az a vélemény, hogy az atomi világ alapvető elveit ismerjük. Ez a vélemény nagyrészt abból ered, hogy bár sok jelenséget nem tudunk megmagyarázni bonyolultságuk miatt, ez a bonyolultság magában véve nem meglepő, hanem valószínű és várható. Habár elismerjük, hogy az atom-modelleknek korlátlan lehetőségeik vannak különböző kombinációk létrehozására, nem tartjuk valószínűnek, hogy ezeknek a bonyolultsága még eddig felfedezetlen elvek kel magyarázható.

Hogyan közelíti hát meg a tudomány az atomi világgal kapcsolatos kérdéseket? Ahhoz, hogy ezekkel a jelenségekkel kellőképpen foglalkozhassunk, új fogalmakat és szóhasználatot kell fokozatosan bevezetnünk. Az atomok és a molekulák halmozódásából eredő komplikációkat a múltban például olyan fogalmakkal írták le, mint a hőmérséklet és a nyomás. A vegyi kötés fogalma ma már közhasználatú, ugyanúgy, mint a gének, sejtek vagy a fajok fogalma a biológiában. A jelenségek tanulmányozása egyre újabb módszerekkel és fogalmakkal bővül. Ezenkívül a technológia fejlődése is — gondoljunk csak a mikroszkópra, az elektronmikroszkópra, a röntgen analízisre, a lézerre, a radioaktív nyomjelzőkre, a neutron sugarakra — nagymértékben hozzájárul ismereteink bővítéséhez. Érdekes tény, hogy nagy sikerrel alkalmazunk nukleáris módszereket sokfelé az atomi világ titkainak a kutatásában, mert az pontos és célszerű eredményekkel jár. Az említett módszerek felhasználásával a tudósok azt próbálják megállapítani, hogy milyen formákban jelentkezhetett és jelentkezhet a természet a tudomány belső határán belül.

A külső határ lényegesen különbözik az előbbitől, mert olyan területektől választ el, amelyeknek alapvető elveit nem ismerjük. A magfizika bizonyos mértékig még mindig egy ilyen külső határ, mert az alapvető erőt, amely az atommagot összetartja, még ma sem ismerjük kellőképpen. A szubnukleáris világ és a csillagászat a legjelegzetesebb külső határai a tudománynak s ezeknek a területein a felfedezés romantikája még mindig létezhet. Itt, az atomi világtól eltérően új, megmagyarázhatatlan jelenségeket találhatunk, új törvényeket fedezhetünk fel, amelyek eddig még fel nem tárt jelenségekre vonatkoznak.

Teljesen jogos a kérdés, hogy a külső határok miért oly fontosak számunkra. Miért is érdekelne bennünket a csillagok belsejében végbemenő energiacsere, hisz a csillagok annyira távol vannak tőlünk? A válasz az, hogy lényegében ez a távolság nem is annyira óriási, mert a minket alkotó és körülvevő anyagnak is megvannak a potenciális lehetőségei hasonló cserékre. Továbbá, sok olyan kérdés létezik, amire nem adhatunk választ csupán az atomi világ megfigyeléséből nyert tapasztalatainkkal. Például, mi úgy tudjuk, hogy az atommag protonok és neutronok egyesüléséből jön létre, de pusztán ezzel még nem magyarázhatjuk meg, hogy az atommag miért sokkal súlyosabb az elektronnál. Az atommag — mert sokkal súlyosabb — ezért pontosan meghatározott helyet foglal el a molekula szerkezetében, és így lehetővé válik az ún. „molekuláris architektúra" megfigyelése. Ebben a felfogásban az anyagi világ kémiai strukturáltsága arra alapszik, hogy az atommag súlya nagyobb, mint az elektroné. De arra, hogy miért nehezebbek a protonok és a neutronok,

már csak az utóbbiaknak a tanulmányozása adhat választ. Ezzel már elértük a részecskefizika külső határát.

A kérdést másként is fel lehet tenni. A természetben levő struktúrák hierarchikus halmazoknak is felfoghatók, a következőképpen: tegyük fel, hogy a nukleon (a proton és a neutron) a legelemibb szerkezet — habár több mint valószínű, hogy nem az, talán a kvark lehetne ilyen. A nukleon kombinálódik és atommagot alkot, az atommag elektronnal társul és atomot alkot az atomok egyesüléséből molekulák jönnek létre. Ettől kezdve már két lehetőség adódik: a molekulák kombinációjából szilárd vagy folyékony anyagok jönnek létre, amelyekből bolygók és csillagok lesznek, ezek csillagrendszerekbe csoportosulnak, amelyek meg a világegyetemet alkotják; vagy a molekulák makromolekulákat alkotnak, amelyekből sejtek lesznek, ezek többsejtű lényeket alkotnak — és többsejtű lényeknek agyuk is lehet. Az utóbbi lehetőséget, melyben az élet is hierarchikus szintet alkot, én önmegismétlő vonalnak nevezem.

A kérdést történeti szempontból is érdemes megvizsgálni. Léteznek például „történet nélküli" struktúrák is. A proton elemzése nem fedi fel annak történetét — a proton elemi részecske és nincsenek olyan tulajdonságai, amelyek a múltjára utalnának. Hogy a fentieket világosabbá tegyem, egy új fogalmat szeretnék bevetni, amellyel meg lehet jelölni, hogy van-e tudomásunk a különböző struktúrák történetéről, vagy sem. Jorge Luis Borges egyik novellájának hőse, Funes, borzasztó helyzetben van, mert a legapróbb részleteit sem tudja elfeledni annak, amit lát, hall, érez vagy tapasztal. Ennek a hősnek a nevét veszem tehát, és azt a tárgyat, amely úgyszólván semmire sem „emlékszik", afuneusnak nevezem. A nukleonok és az elektronok nagyon afuneus tárgyak. A tulajdonságaik semmiképp sem utalnak arra, hogy mi történt velük a múltban. Az atommag is afuneus, noha kisebb mértékig. Az atommagok történetére vissza lehet következtetni bizonyos mértékben: például az arany-atom magjának esetében gyaníthatjuk az eredetét, mert okunk van feltételezni, hogy a súlyos elemek — mint az arany, az ólom, az ezüst — szupernovák robbanásaiból keletkeztek. Az atommagnak tehát halvány funicitási árnyalata van, akárcsak az atomoknak és a molekuláknak.

Egy kristály szerkezete sok információt szolgáltathat a kristály múltjáról: nagyszámú elferdülések és egyéb torzulások arra mutatnak, hogy a kristályt megzavarták alakulásában és hirtelen hűlt le, míg kevés elváltozás azt bizonyítja, hogy a lehűlés lassan ment végbe. A fémek felszíne ugyancsak rendkívüli funicitással rendelkezik. A felszín rostjaiból és szerkezetéből a fémszakértő nemcsak azt állapíthatja meg, hogyan készült a fém, hanem azt is, hogy mikor készült.

Az önreprodukáló rendszerek még ezeknél is több funeus tulajdonságokkal bírnak. Egy önreprodukáló sejt nemcsak a saját történetét, hanem az összes elődeinek történetét is tartalmazza. Teljes fejlődése „meg van írva" benne, épp ezért a funicitás tetőfokát, apoteózisát jelképezi. Az önmegismétlő struktúrák fejlődési mechanizmusa csak a hasznos vagy a „célszerű" komplexumokat választja ki, és ez az a tény, aminek alapján vissza lehet következtetni a történetére. Az önmegismétlő vonal tetőfokán az agy áll. Az agy nemcsak elődeinek történetét tartalmazza, hanem a kommunikáció által a korabeliekét is. Ez esetben a fejlődés és a kommunikáció együttesen egy fokozottabb funicitást szül. Az agy kutatása jelenleg egyik legfontosabb belső határa a tudománynak. Két irányból közelítjük meg az olyan komplikált kérdéseket, mint a memória vagy a gondolkodás természete: neuro-fiziológiai módszerekkel — az idegrendszert fizikai, vegyi és biológiai szempontokból vizsgálva — és pszichológiai módszerekkel — az agyban észlelt jelenségek lélektani elemzése alapján. Ezt a kutatást egy olyan alagúthoz hasonlítanám, amelyhez egyszerre két oldalról fogtak neki: a két furat még nem találkozott, de — remélhetőleg — hamarosan találkozik.

Nem szabad felednünk, hogy az atommag alatti hierarchiában létező összes jelenségeket elvben megértjük: ezeket az atommag és elektronjaik közt létrejövő elektromos erőre vezetjük vissza. Ezt az ún. „redukcionista" szempontot gyakran támadják azok, akiknek a véleménye szerint az egész több a részek összegénél, vagyis értelmetlen minden jelenséget az atomstruktúrára visszavezetni. És mégis, tudjuk, hogy a molekulák közti kölcsönhatás lényegesen befolyásolja az egyes jelenségek természetét. Az atom-központú látásmód azt tartja hogy az egész bonyolultabb a részeinél. Nekem úgy tűnik, hogy a „rész-pártiak" és az „egész pártiak" harca — szélmalomharc.

Rátérve a tudomány korlátaira, hadd tegyek egy nagyon optimista kijelentést. Az a benyomásom, hogy a tudomány — legalábbis potenciálisan — jogosan állíthatja, hogy bármelyik észrevehető jelenséget képes megérteni. Tudásunk, természetesen távol áll ettől a nívótól; nagyon sok jelenség van még mind a külső, mind a belső határ közelében, amelyet nem értünk meg. De sok olyan folyamat, amely a múltban rejtély volt, ma már megfejtve áll, és indokoltnak tűnik az a vélemény, hogy az ember a természetet tudományosan érti majd meg teljes egészében. De itt feltétlenül szükséges leszögeznünk valamit. Arra a kérdésre, hogy a tudományos betekintés képes-e, vagy képes lesz-e valaha az emberi élmények minden oldalát felfedni, csakis nemmel válaszolhatunk. Hadd hozzak fel egy egyszerű példát annak bizonyítására, hogy az utóbbi állítás nem mond ellent a teljesség elvének.

Egy Beethoven-szonáta olyan természeti jelenség, amely a légrezgések tanulmányozása által fizikailag elemezhető, de elemezhető vegyileg, fiziológiailag és lélektanilag is a hallgató agyában végbemenő folyamatok megfigyelésével. De még ha az említett folyamatokat összességükben tudományosan értelmezzük is, elemzésünk még mindig

nem érinti azt, ami a leglényegesebb és legelemibb egy Beethoven-szonátában — a zene azonnali és közvetlen kifejezését. Hasonló módon, tudományosan is meg lehet magyarázni a naplementét vagy a csillagok ragyogását, de ezeknek a jelenségeknek a tapasztaló egyén szempontjából tudományon kívüli vetületei is vannak.

Ugyanez az etikai kérdésekre és az egyének közti kapcsolatokra is érvényes. Nem létezhetnek tudományos szabályok a jóra vagy a rosszra, a helyesre vagy a helytelenre, s az olyan fogalmakra sem, mint az élet minősége vagy a boldogság. Ugyanakkor nagyon is lehetséges az idegi vagy pszichológiai reakciók vizsgálata, amelyek a fentebb említettek tapasztalásakor keletkeznek, — habár még ez után a vizsgálat után is marad elemzés által nem érintett terület. Ugyanígy az emberi agresszív magatartást vagy a különböző emberi fajok intellektuális adottságait is lehet tudományosan elemezni, de az eredmények humán-társadalmi szempontból ritkán a leglényegesebbek, sőt ezeknek a kérdéseknek a megoldását még akadályozhatják is.

A pozitivista filozófus Wittgenstein a Tractatus Logicus Philosophicus című munkájában egy olyan logikai rendszert mutat be, amely lehetővé teszi a tudományos és matematikai elemzések következtetéseinek és szerkezeteinek a megértését. A könyv hetedik fejezete csupán egy mondatból áll: „Amiről nem lehet beszélni, arról hallgatni kell". Egy más alkalommal is hasonló megjegyzést tett: „Valóban léteznek olyan dolgok, amelyeket nem lehet szóba foglalni. Ezek maguktól mutatkoznak meg." Az ilyen dolgokat nem lehet tudományos szaknévvel — mert hiszen ezekre utal Wittgenstein a „szó"-val — meghatározni, de meg lehet jeleníteni a zenében, az irodalomban vagy a képzőművészetben. Az emberi kapcsolatok esetében különösen egy művészeti tárgy vagy egy jól megírt regény sokszor jobban rátapint a lényegre, mint bármilyen tudományos tanulmány.

Más szóval, habár a tudomány bármilyen nemű emberi tapasztalatot tanulmányozhat és magyarázhat, nem mindig világítja meg ezeknek a leglényegesebb oldalait. A tudományos megértésnek korlátai vannak: az, hogy a tudomány teljes, nem jelenti, hogy mindent átfogó is. Hadd mutassak rá egy fontos analógiára, az atomfizika területéről: Niels Bohr leírása az atom klasszikus és kvantum tulajdonságai közti komplementaritásról. A klasszikus felfogás szerint az atom egy miniatűr bolygórendszer, amelyben az elektronok pontosan meghatározott pályán keringenek az atommag körül. Ennek a helyességét nem lehet kísérletekkel megcáfolni. Az elektron pontos helyét meg lehet állapítani a legérzékenyebb eszközökkel, de maga a megfigyelés megbontja a kvantumállapotot, ami döntő hatással van az atom tulajdonságaira. A komplementaritás létezik, és ahogyan a kvantumállapot megbomlik a megfigyelésünk hatására, éppúgy bizonyos emberi élmények értelme is — különösen a művészet, az etika és az emberi kapcsolatok köréből — megváltozik a tudományos analízis során. A mitológiában nem nehéz hasonló komplementaritásra bukkanni. A germán mitológiában Wotan isten azt kéri Erdától, a föld úrnőjétől, hogy adja neki a végtelen bölcsesség kincsét. Cserében a látását kellett feláldoznia. Áldozni kell azért, hogy mindent tudjunk.

Marcus Fierz svájci fizikus és filozófus szavaival „korunk tudományos felismerései annyira megvilágították a valóság egyes oldalait, hogy a többiek még nagyobb sötétségben maradtak". Nagy veszély, hogy amikor egyfajta gondolkodásmód nagy erővel és jó eredményekkel fejlődik, ugyanakkor a többi módok méltatlanul fejletlenek maradnak. Az emberi természetben, amely mindig a tiszta körvonalú és örökre érvényes válaszokat kutatja, létezik egy bizonyos felsőbbségre való igény, amely megakadályoz egy témához való minden egyéb megközelítési módot. Ezt tudományon kívüli területeken is tapasztaltuk már: 1054-ben, amikor a vallásosság a legerősebb volt Európában, egy bármely bolygónál fényesebb szupernova jelent meg. Három vagy négy hónapig volt látható, — és mégsem jelzi egyetlen európai krónika sem. A középkorban, a vallásos látásmód egyeduralma alatt, egy fényes csillag megjelenése teljesen lényegtelen volt. Mind a vallásos, mind a tudományos kor teremtő erőket szabadított fel, de mivel egyoldalú megközelítésmód volt mindkettő, komoly visszaéléseknek nyitott utat. Ilyennemű a középkorban a kereszteshábóru és a testi fájdalmakkal való teljes nemtörődömség; a mai napokban túllicitáljuk az élet minősége és a politikai határozatok szabályainak ésszerűsítését és túl sok gondot fordítunk az anyagi javak termelésére.

Úgy tűnik, lényegében érvényesül egy „a tudomány Gödel-tétele", amely szerint a tudomány csak a nem tudományos kérdések és gondok szélesebb keretén belül létezhet. Gödel, a matematikus, bebizonyította, hogy egy axióma-rendszer sohasem támaszkodhatik saját magára — ahhoz, hogy érvényességét bizonyítsa, rendszerén kívüli megállapításokat kell felhasználnia. Ugyanúgy a tudományos tevékenység is szükségszerűen az emberi tapasztalat sokkal tágasabb birodalmából nő ki. A tudománynak magának egy nem tudományos alapra is szüksége van. Az a filozófiai meggyőződés, hogy a tudományos igazság lényeges és alapvető — ez alkotja az igazság kutatásának alapját. Véleményem szerint a tudománynak ez az emocionális árnyalata nemcsak a tudományos vállalkozásnak az elején, hanem annak egész ideje alatt és mindvégig létezik. Mindenki, aki tudományos területen működött, ismeri a felfedezés örömét, a nagy érzelmet és félelmet, amit az ember érez, ha olyan átfogó törvényt fedezett fel, amely a tudomány egész épületét egybetartja.

Meggyőződésem, hogy a tudomány valódi értéke növekedne, ha mind a tudósok, mind a tudománnyal nem foglalkozók tisztábban látnák a másfajta emberi élményeket. Ha azt a tudatot

ápolnák, hogy az utóbbiak léteznek, a tudomány és technológia iránt táplált előítéletek sok teret veszítenének. Mi több, az egyéb gondolkodásmódok elismerése megakadályozná az olyan áltudományok burjánzását, mint az asztrológia vagy a parapszichológia. Az áltudományok annak a természetes következményei, hogy manapság csak a tudományos látásmódot tartjuk „komolynak".

Hadd említsem meg végül azt a két alappillért, amelyre bármely emberi tevékenységnek támaszkodnia kell; felelősségtudat az embertársaink sorsáért, s a kíváncsiság, hogy minél többet tudjunk meg a minket körülvevő természetről és arról, hogyan működik. A tudásszomj felelősségérzet nélkül embertelen, a felelősségérzet pedig tudásszomj nélkül hatástalan.

ZEMPLÉN GYŐZŐ, EÖTVÖS LORÁND TANÍTVÁNYA

Szilárd József
Magyar Állami Eötvös Loránd Geofizikai Intéze

Komoly elismerést és meleg üdvözletet érdemelnek a nagykanizsai Landler Jenő Gimnázium és Szakközépiskola tanárai azért a lelkes törekvésükért, amellyel a tanuló ifjúság érdeklődését már középiskolai tanulmányaik idején igyekeznek a természettudományok jelentőségére és szeretetére reá irányítani, „reáhangolni" és tevékeny kezdeményezéseikkel már is olyan kereteket teremteni, amelyek messzemenő ígéretet rejtenek magukban a szem előtt lebegő cél eredményes megközelítése iránt.

Külön köszönetet érdemel az Eötvös Loránd Fizikai Társulat Zala megyei csoportja is, amely a maga figyelmével és érdeklődésével igyekezett a kezdeményezést felkarolni, támogatni és ugyanakkor hatékonyabbá tenni.

Zemplén Győző tüneményes élete ma már eléggé ismert mindannyiunk előtt ahhoz, hogy őt az ifjúság nevelésével, irányításával, oktatásával foglalkozó szakkörök követendő például állíthassák a magasabb célok felé induló ifjúság elé.

Hogy ezt a célt miképpen kívánják elérni lelkes nevelők, tanárok, az kitűnik *Kovács László*, Nagykanizsa, Landler Jenő Gimnázium tanárának —, *A Fizika tanítása* 1. (1975) XIV. évf. — az Oktatási Minisztérium módszertani folyóiratában megjelent:

A regionális tanulmányi versenyek szerepe a tehetséges tanulók képességeinek fejlesztésében — a nagykanizsai Zemplén Győző fizikai versenyek tapasztalatai — közreadott dolgozatából. (17. old.—1.)

Örvendetes, hogy Kovács törekvéseit ma már nem kell helyi törekvéseknek tekinteni, hanem több megértő tanártársának fáradozásával — hovatovább — sikerült azokat láthatóan országos arányúvá fejleszteni.

Hogy ki volt Zemplén Győző, amíg élt, azt elmondták már mások: kortársai, akik személyes ismeretség és vele való érintkezés kapcsán az ő utolérhetetlen személyes varázsa alá kerülve azt érzékelhették.

Itt, ez alkalommal, Kovács Lászlónak a Fizikai Szemle 1975/6. számában megjelent „*Zemplén Győző a fizika oktatás korszerűsítéséért*" című rövid cikkéhez kívánok kapcsolódni és szeretnék néhány, Eötvös Loránd hagyatékából származó levelet, sárguló papírlapot kiemelni és bemutatni, amelyeket Zemplén intézett Eötvöshöz és néhány olyan levelet és megnyilatkozást, melyekben mások adnak kifejezést Zemplén Győző korai és tragikus halála fölött érzett felmérhetetlen fájdalmuknak és gyászuknak.

E helyen talán érdemes gondolatban előidézni egy rövid pillanatig azok fölött a körülmények fölött, amelyek lehetővé tették, hogy Zemplén Győző azzá válhasson, amivé vált.

Tudjuk róla, hogy középiskolai tanulmányait vidéken végezte: Fiumében, ahova a családnak Nagykanizsáról, Zemplén Győző születésének helyéről — a kis Zemplén fiúnak 4 éves korában — atyjának Zemplén János posta és távirda felügyelőnek, bizonyára hivatali beosztásából eredően, kellett áttelepülnie. (Dr. Tóth Gábornak, az Eötvös Kollégium ez idő szerinti igazgatójának szíves közlése.)

Középiskolai tanárai nyilván már korán felfigyeltek az ifjú tanuló rendkívüli adottságaira, hiszen tanulmányainak idején minden iskolai bizonyítványa tiszta kitűnő volt, ami előfeltétele volt annak, hogy később „királygyűrűs" doktorrá avathassák. Ennek folytán az ő hathatós támogatásuk is hozzájárulhatott már ahhoz, hogy az ottani tanulmányainak befejeztével az alig 17 éves Zemplén Győző felvételt nyert a még csak éppen, hogy megnyílt Eötvös József Kollégiumba, amelynek létrehozását Eötvös Loránd, rövid miniszterségének — 1894 június—1895 januárig — terjedő idején indított el, de már csak hivatali utóda, Wlassics Gyula juttathatott végleges befejezéshez. A kollegium kezdetben egy magánházban nyert elhelyezést, utóbb a Ménesi úton épült új székházát 1911. október 26.-án avatták fel és adták át rendeltetésének. (Laczkó Géza: Királyhágó — önéletrajzi regény Bpest. 1838 — 9.)

Az Eötvös József Kollégium, a francia „*École Normale Supérieure*" mintájára jött létre, feladata a középiskolai tanár nemzedék kiképzése, nevelése volt.

A Kolégiumban szaktanárok vezetése mellett, önálló tudományos kutatást fejlesztő módszerekkel, külön tudományos előképzésben is részesültek a bennlakó kollégisták. Ugyanakkor előmozdítani kívánta a szegény sorsú, tehetséges fiatalok továbbtanulását is.

Az intézet első kurátora élete végéig a kezdeményező *Eötvös Loránd* volt, első igazgatója pedig *Bartoniek Géza*, aki 1881—1885-ig Eötvös egyetemi tanszéki tanársegéde, mindenkor legbizalmasabb munkatársa volt és maradt. *Eckhardt Sándor*, szintén hajdani Eötvös kollégista, 1937. október 30.-án, Bartoniek síremlékének felavatásánál úgy jellemezte őt, mint akinek „... egész egyénisége maga volt a tekintély, holott ő tekintélyről sohasem beszélt és olyanoknak csak azokat ismert el, akik belső értékükkel váltak ki embertársaik közül." (Környei Elek: Eötvös Loránd a tudós és művelődés politikus írásaiból. Jegyzetek. Budapest 1964., 351, 360, 361 old. — 5.)

Ilyen emberektől a kollégisták is csak komoly tárgyi ismereteket és szilárd, jellemes magatartást sajátíthattak el saját életüknek a küzdelmeiben való helytálláshoz.

A kitűnő vezetők és tanárok hamarosan felismerték Zemplén Győzőben is a kiváló, felkarolásra érdemes ifjút, akik őt egyetemi tanulmányainak idején szívesen istápolták, formálták és akik jellemének kialakulására is mély benyomást gyakoroltak.

Zemplén Győző Eötvös legkedvesebb tanítványai közé számított, aki egyetemi tanulmányainak befejezése után (1900) Eötvös Loránd Kísérleti Fizikai Tanszékére került, előbb mint gyakornok, utóbb mint Eötvös tanársegéde. Bölcsész doktori értekezésében *a gázok belső súrlódásának általa kidolgozott új mérési módszerét tárgyalja* (1901.), annak a nyomán 1902-ben „*sub auspiciis regis*" avatják doktorrá, (Abonyi Iván: Zemplén Győző 1879—1916. – Fizikai Szemle 1966. XVI. évf. 10. sz. 289—291 old. — 6.) majd 1905-ben a Budapesti Egyetemen magántanárrá és két évvel később (1907.) a Kir. József Műegyetemen — a mai Műszaki Egyetemen is — magántanári képesítést nyer.

De a továbbiakban is, tudományos előrehaladásában Eötvös messzemenően támogatta Zemplént, jelentős külföldi tanulmányútakhoz segíti hozzá és szinte csalhatatlan biztonsággal állítható, hogy Zemplén Győző tudományos formátumának kialakulásához, egy folyamatos crescendóban, kezdve a középiskolai kitűnő felkészülése után, az egyetemi tanulmányainak idején megjelent kitűnő tanárok, professzorok, az Eötvös-Kollégium légköre, de személy szerint talán maga Eötvös, fátumszerűen irányították Zemplént gyakorlati tevékenységének egyre önállóbbá alakuló újtain az általa fiatalon elért tudományos magaslatok felé.

1908-ban a 29-éves Zemplén a Magyar Tudományos Akadémia tagja és a gázok belső súrlódásáról írott *második* értekezéséért, amelyben új mérési módszerének elméletét ismerteti, az Akadémia „*Rózsay-díj*"-át nyeri el. (1911.)

1912-ben a Kir. József Műegyetem Tanácsának meghívására a számára létesített *elméleti fizikai tanszékre nyilvános rendes tanárrá nevezik ki.* — (Söpkéz Sándor: Zemplén Győző emlékezete. Természettud. Közlny. 1916. nov. 1.—nov. 15. — XLVIII. köt. 661—662 füzet — 7.) és (*Kovács László*: Zemplén Győző élete és munkássága, Nagykanizsa Városi Tanács Híradója. 1974. I.— 11 old. — 2.).

1905-ben Zemplén Győző tanulmányi útra nyer kiküldetést Németországba: Göttingenbe, ahol sok értékes ismeretségre, tudományos kapcsolatra tehetett szert, többek között *Klein Félix* professzorral is itt került kapcsolatba.

Zemplén Klein professzor szemináriumában foglalkozik a „*nem folytonos jelenségek*" problémájával és egy beszámolója annyira magára vonja Klein professzor figyelmét, hogy az, az „*Encyklopedie der mathemaischen Wissenschaften*" számára az ide vonatkozó fejezet megírásával a 25 éves fiatal magyar fizikust bízza meg. Ennek a nyert megbízatásának az alapján írja meg a „*Besondere Ausführungen über unstetige Bewegungen in Flüssigkeiten*" című tanulmányát, amivel már nemzetközi tudományos körökben is ismertté és megbecsültté vált a neve.

Göttingenből hazatérve, rövid itthoni tartózkodás után, Párizsban folytatja tanulmányait, ahol *Hagionot*, *Lord Raleigh*, *H. Weber* és mások társaságában a lökéshullámok fölött kialakult vitában vesz részt. A vita megoldását Zemplénnek, a párisi Akadémián bemutatott értekezése tárta fel, amivel ismét nemzetközi tekintélyét sikerült emelnie. Párizsból újból Göttingenbe tér vissza a számára még fennmaradó két hónapra és onnan számol be Eötvösnek az ide mellékelt levélben párisi tapasztalatairól.

Göttingen, 1905. június 10-én

Kegyelmes Uram!

Párisban már vége felé jár a tudományos szezon, míg a szorgalmas németek még augusztus közepéig dacolnak a nap hevével és így az idő kihasználása céljából visszajöttem a még hártalévő két hónapra Göttingenbe, ahol a nyári félév még csak alig egy hónapja kezdődött.

Bár tekintettel a párisi nagy stílű tudományos életre nem gondolhattam arra, hogy az ottani körökkel ép oly szoros érintkezésbe juthassak, mint Göttingenbe, mégis sikerült néhány fizikussal és matematikussal közelebbről megismerkedni: a fizikai társulatban elég gyakran találkoztam az öreg *Amagat*-val, *Guillaumme*-mal, *Benoît*-val, *Mathias*-val; volt alkalmam megismerni *Curiené-t* is. Sok érdekes készüléket láttam a társulat húsvéti kiállításán.

Felkerestem azután egy kivándorlott magyart, az öreg *Schulhofot* a Bureau des Longitudes-ban, aki rendkívül szíves volt hozzám, a családjába is

bevezetett minket s akivel azután gyakran voltunk együtt.

Közben megkaptam az „Encyklopedie"-be írt cikkemnek kefelenyomatát, azzal felkerestem *Hadamard*-t, akit mint e téren úttörő férfiút a dolog elsősorban érdekelhetett. Hadamard a cikket részletesen áttanulmányozta s igen meg volt vele elégedve, még néhány tanácsot is adott és megígérte, hogy a mathematikusokkal meg fog ismertetni: így ismertem meg *Poincarét*, persze csak futólagosan, de hát nem mondhatják rám, hogy Párisban voltam és még Poincarét sem láttam.

Göttingenben persze sokkal könnyebb dolgom van már: a régi kötelékek felújultak s a németek örömmel fogadtak be újra tudományos körükbe.

A tanév végének közeledtével igen szépen kérném Kegyelmes Uramat, méltóztassék a kari ülésen szeptember elsejével lejáró tanársegédi kinevezésemnek megújítását javaslatba hozni, azzal a módosítással, hogy ne természetbeni lakást, hanem lakáspénzt kaphassak és talán lehetséges volna felállíttatni őszre a *tanárképzőben a fizikai repetitorságot.*

A július és augusztusi nyugtákat elküldöm (a) Ferencnek, kérem szépen Kegyelmes Uramat, hogy azokat láttamozni méltóztatnék.

Bocsánatot kérve, hogy kéréseimmel alkalmatlankodom és kellemes szünidőket kívánva maradok

legmélyebb tisztelettel
hálás tanítványa
Zemplén Győző

Amint Zemplén előbbi beszámolójából is kitűnik, párisi tartózkodása idején igen jelentős francia tudós nagyságokkal jutott ismeretségbe, akik egyáltalán nem általlották vele, a messziről jött ifjú idegennel szóba állni, tudományos munkáját áttekinteni és azt helyeslő bírálattal illetni, nem szólván arról, hogy a levélben említett nagyságok a kor legkimagaslóbb nagyságai közé is tartoztak, köztük Nobel-díjas, és később Nobel-díjat nyert kitűnőségek.

Haza térve külföldi útjáról Zemplén folytatja Eötvös mellett kijelölt tevékenységét, ellenére a nagy anyagi előnyöket igérő egyéb meghívásoknak.

Egy további levelet mutathatok még be, ami azonban már inkább adminisztratív, tanszéki tennivalóra, így kevésbé jelentős eseményre vonatkozik. Íme a levél:

Budapest, 1909. szept. 15.-én. (8.)

Kegyelmes Uram!

Itt küldök parancsára 5 francia és 5 német példányt, azon kívül Magyarország térképét is. Minthogy azt az Osztrák—Magyar Monarchia hegy- és vízrajzi térképét, amelyet említeni méltóztatott, csak vászonra felhúzva kaptam meg, a kivágás utáni új felhúzás nem lehetett egészen szimmetrikus, amiért szíves elnézését kérem.

A nyomda a mai napon adott póstára 100 francia és 100 német példányt, a küldemény tehát egész biztosan megérkezik Londonba e hó huszadikára.*

Bodola tanár úrról még máig sincs semmi hír, úgy hogy a „*Meridiandistanzmehtode*"-t és a „*Kreislagen*"-t valóban kénytelen voltam kihagyni.

Kellemes útat és időtöltést kívánva maradtam legmélyebb tisztelettel

hálás tanítványa
Zemplén Győző

U.i. Az indexaláírások már javában folynak, mert Szinnyei dékán úr Kegyelmes Uram javaslatára valóban megbízott az indexek aláírásával.

Időrendben még egy futó megjegyzést ismerünk Zemplén Győzőre vonatkozóan, amelyet a Nobel-díjas *Lénárd Fülöp* — Nobel-díjat nyert 1905-ben, a katódsugarakkal végzett vizsgálataiért — Heidelbergből 1913. október 9.-én Eötvös Lorándhoz intézett egyik levelében tett, és amely így hangzik: „. . . Ezen a nyáron már-már azon voltam utazásom során — s ennek nagyon örültem —, hogy Budapestre eljuthatok és Önt meglátogathatom. De kis fiam megbetegedett az úton, és ez megakadályozott engem ebben. Eötvöst, Fröhlichet, Zemplént is szívesen meglátogattam volna. stb." Talán nem túlságosan nagy jelentőségű megjegyzés, de azért mégis elég kifejező, hogy Zemplént, az akkor még fiatal egyetemi tanárt, nemrégiben még Eötvös tanársegédét, az öreg kiérdemesült professzorokkal egy sorba sorolja Lénárd. (MTA Kézirattár. Levelestár. Német eredetiből fordította: Környei Elek — 11.)

1914. év elején, január 19.-én *Félix Ehrenhaft* fizikus-tanár, a bécsi Cs. kir. Egyetem Fizikai Intézetéből néhány soros rövid levélben keresi fel Eötvöst és mond köszönetet a budapesti szaktársak körében részesült meleg fogadtatásért, amelyben Budapesten tartózkodása idején részesült.

---

* N. B.! Fenti megjegyzés nyilván Eötvös Lorándnak a Nemzetközi Földmérés 1909-ben, Londonban kitűzött XVI. általános Konferenciájára benyújtandó jelentésére vonatkozik, amely francia és német nyelven jelent meg, címe:

Über Geodätische Arbeiten in Ungarn besonders über Beobachtungen mit der Drehwaage.
Bericht an die XVI. allgemeine Konferenz der Internationalen Erdmessung, von Baron Roland Eötvös, Budapest, 1909. (9.)

illetve:

Sur les travaux geodésiques exécutés en Hongrie spécielement a l'aide de la balance de torsion. Rapport présenté a la XVI.-éme Conférence Générale da l'Association Géodésique Internationale, par le Baron Roland. Eötvös, Budapest, 1909.

Wien, IX., 1914. január 19.-én.
A Cs. K. Egyetem Fizikai Intézete

Nagyrabecsült Báró Úr!

Sajnos az időm Budapesten oly szorossá vált, hogy már nem használhattam fel a megtiszteltetést, hogy Nagyméltóságodnak készségesen és tiszteletteljesen köszönetet mondjak nemcsak a fölötte nagy szívélyességért, amellyel a magyar szaktársak körében fogadtak, de mindenekelőtt a nagy megtiszteltetésért, amelyben Báró Úr látogatása által még részesültem.

Fogadja Nagyméltóságod mindezért szívélyes köszönetem kifejezését, valamint annak biztosítását, hogy a magyar kartársak körében végtelenül jól éreztem magam.

Kitűnő nagyrabecsülésben Báró Úrnak

készséges

F. Ehrenhaft-ja. (— 12.)

Ehrenhaft Félix 1879-ben született Wien-ben, tehát egyidős volt Zemplén Győzővel és úgy lehet, abban az időben hasonló körülmények között működött a bécsi Egyetemen mint Zemplén a budapesti Egyetemen. Budapesten járván, Eötvös őt is előzékenyen fogadta, amit külön fenti sorokban köszön meg. A későbbi leveleiből felismerhetően meleg barátság fejlődött ki Ehrenhaft és Zemplén között, de Eötvös iránt is mély tiszteletet és ragaszkodást tanúsított.

1919-ben Ehrenhaft már tekintélyes fizikus, a bécsi Egyetem nyilvános tanára és a III. sz. Fizikai Intézet igazgatója; továbbá elnöke a bécsi Kémiai és Fizikai Társaságnak, valamint tagja a bécsi Tudósok Társaságának. Az atomfizika terén tevékenykedik, különösképpen az elektronkutatás és a töltés nagyság mérésével foglalkozik. Számos dolgozata jelent meg külföldi szaklapokban is.

(Lexikon der Physik, herausgegeben von H. Franke, Band I. Seite 232. — Stuttgart, 1950. — 13.)

Időközben egyre vésztjóslóbb fellegek tornyosulnak Európa égboltja fölött és 1914 júliusában a sok hiábavaló disputa után, megszólalnak az ultima ratió morajló hangjai. A békés és tudományos munka csillogó eredményei helyett elszabadul a végzetes pusztítás, annak minden bántó és kiábrándító kísérő zajával és kiszámíthatatlan torzításaival.

Zemplén Győző már a legelsők között bevonul katonai szolgálatra és eleinte a szerbiai hadszintéren vesz részt a hadi eseményekben, majd a komáromi tüzér önkéntesek kiképzésének a vezetésére nyer megbízást.

1915-ben az olasz harctérre kerül, ahol mint tartalékos tüzértiszt, de fizikus, eljárást dolgoz ki az ellenséges ütegállások helyzetének hangelőmetszéssel történő meghatározására. Utóbb a harctéri szolgálat alól felmentést nyer, amit azonban ő nem fogad el és tovább is harctéri szolgálatban csapattesténél marad.

1915 év nyarán tífuszban megbetegszik és Klagenfurtban kórházi ápolás alá kerül, ahonnan a kórházból való elbocsájtása előtt intézi alábbi üdvözlő sorait Eötvös Lorándhoz:

Klagenfurt, 1915. szept. 18.

Kegyelmes Uram!

Úgy számítok, hogy Kegyelmes Uram már visszatért Pestre s így soraimat már oda irányítom. Örömmel hozom szíves tudomására, hogy a betegség javarészét aránylag rövid idő alatt kiállottam, már több mint egy hete teljesen láztalan vagyok; az utolsó héten az orvosok lassanként fokozták a táplálkozás mennyiségét (előbb csak tejet és levest kaptam) holnap már kitűnő ebédet adnak pecsenyével s más egyébbel. Az erőm is lassan visszatér, úgy hogy előreláthatólag e hó végén már elhagyhatom a kórházat. Az üdülési szabadságot — remélem — Pesten tölthetem el s akkor alkalmam volna Kegyelmes Uramnál is tiszteletemet tenni. — Remélem a tátrai nyaralás kellemes volt, bár természetesen nem pótolhatta a Dolomitokat. Kegyelmes Uramnak minden jót, jó egészséget kívánva maradtam legmélyebb tisztelettel hálás tanítványa

Zemplén Győző

Küldi: Dr. Zemplén Győző fhdngy
Klagenfurt
Zander kórház
2-es pavilon (— 8.)

1915. decemberében néhány soros újévi üdvözlettel köszönti Ehrenhaft professzor Eötvöst. Ebben a levelében említést tesz Zemplénről, de éppen hiányolja, hogy rég nem hallott felőle. Ez a levél a következőkép hangzik:

Wien, IX., 1915. december 30-án
A Cs. K. Egyetem Fizikai Intézete

Nagyméltóságod!

Fogadja Nagyméltóságod legszívélyesebb kívánságaimat egy boldog 1916 iránt, ami bár a dicsőséges békét hozná meg számunkra.

Zemplén felől már igen régen semmit sem hallottam. Magam néhány nap óta július 15.-éig felmentést nyertem, hogy a rendes hallgatók 30%-a számára $1^1/_4$ évi megszakítás után ismét előadjak és akkor ismét bevonulok, ha még tart.

Remélem Nagyméltóságod igen jól van és hogy a közeli hónapok folyamán alkalmam lesz efelől Budapesten személyesen meggyőződnöm.

Nagyméltóságodnak tiszteletteljes készséggel

Ehrenhaft (— 12.)

(eredeti, kézzel írott szövegről fordította Sz. J.)

Wien, 1916 július 3.-án kelt soraiban F. Ehrenhaft már megdöbbenéssel arról ad hírt Eötvösnek, hogy az újságból értesül Zemplén elestéről, amit ő sem nem tud, sem nem akar elhinni.

Wien, 1916. július 3.-án

Nagyméltóságod,
Nagyrabecsült Báró Úr!

Éppen egy rövid híradást hoz a „Morgen", Wienben azzal a rémhírrel, hogy az Ön tanítványa és volt tanársegéde, Zemplén V. barátom 1916. június 29-én Olaszország határán elesett volna.

Ez olyan végtelenül szomorú, hogy sem nem tudom, sem nem akarom hinni. Már a második nagy veszteség, amit Ausztria—Magyarország fizikusai elszenvednek.

Egy éve esett el, nem messze a helytől, ahol Zemplén az ő utolsó hősies pillanatait leélte, *Hasenöhrl*; mintha összeesküdtek volna az osztrák—magyar fizikusok ellen. Előttem fekszik az utolsó életjel, amit Zempléntől kaptam egy tábori póstalap, az olasz harctérről ezév május 31.-éről, amelyen (nekem) írja:

„Kedves Barátom! Csak most tudok Neked írni, amikor az ellenség széjjelzúzása után, egy kissé lélekzethez jutottunk. Túl boldog vagyok (hogy) ebben az . . . eseményben részt vehettem . . .

Az összes csapatok számára egy üdülés volt, egy évi nehéz védekezés után végre egyszer erőteljesen előre haladhatni. Az olasz, mozsaraink bombái által, a világ legszebb, legnagyobb gondossággal kiépített és megerősített vonalát . . . részben menekülléssel elhagyta, részben . . . megadták magukat előretörő gyalogságunknak. Nem tudod magadnak elképzelni, hogyan néz ki egy ilyen elfoglalt ellenséges vonal: térdig sétál az ember pompás felszerelések, fegyverek, szolgálati tárgyak, szolgálati könyvek között. Egy evőedényt nem vittek magukkal . . . Bocsáss meg, hogy most semmi másról nem tudok írni. Az események teljeséggel elnyelik figyelmemet stb."

Minden szava ennek a lapnak kifejezője tettvágyának, tüzes vérmérsékletének, felmérhetetlen erejének, amely most már megtört. Végtelenül szomorú ha a szegény özvegy síralmára és az öt ellátatlan kiskorú gyermekre gondolok.

A magyar fizikusok bizonyára megtisztelően fognak Zemplénükre emlékezni. Egy bensőséges kívánság volna magam személyére vonatkozóan, ha számomra megengedegtettnék, hogy mindenben résztvehessek, ami a megdicsőült tiszteletére, emlékére történni fog.

Fogadja Báró Úr legmélyebb tiszteletem kifejezését, amelyet Nagyméltóságod iránt táplálok.

F. Ehrenhaft (— 12.)

(eredeti kézzel írott német szövegről fordította Sz. J.)

Ehrenhaft Eötvöshöz intézett levelében megható szavakban ad kifejezést Zemplén Győző harctéren bekövetkezett halála fölött érzett mély fájdalmának. Az I. Világháborúnak ebben a fázisában mély benyomást kelt az a bajtársai együttérzés, vagy talán már azonosulás, ami egy osztrák tudományos ember részéről egy magyar szaktársa iránt soraiban megnyilatkozik.

Még egy néhány üdvözlő sorból álló rövid levél van az F. Ehrenhafttól származó levelek között, amelyekben Eötvöst 70. születésnapja alkalmából köszönti. Ebben is meleg szavakban ad kifejezést Eötvös iránt érzett őszinte nagyrabecsülésének. A levél így hangzik:

Wien, 1918 augusztus 11-én.
IX. Boltzmanngasse 5.

Nagyméltóságod!

Nagyon megkésve nyertem tudomást Nagyméltóságod 70. születésnapi ünnepéről.

Fogadja ehhez Nagyméltóságod, nagyonis elkésve, de legszívélyesebb, odaadó szerencsekívánataimat.

Ezt összekötöm azzal a bensőséges kívánsággal, bár adassék meg a fizikusoknak, hogy Nagyméltóságod még az éveknek egy hosszú során át monarchiánk fizikusainak az élén működjön teljes tudatában halhatatlan teljesítményeinek, amelyeket tettekben gazdag életében az emberiség számára nyújtott.

Nagyméltóságodnak hűségesen kész
Ehrenhaft (— 12.)

* * *

Az előzőekben láttuk F. Ehrenhaftnak Eötvös Lorándhoz Wien, 1916 július 3.-án intézett levelét, amelyben Zemplén Győző eleste fölött érzett nagy baráti fájdalmának ad hangot és többek között azt írja: „A magyar fizikusok bizonyára megtisztelően fognak Zemplénükre emlékezni." Nos hát, idehaza is mély megrendüléssel és megdöbbenéssel fogadták Zemplén Győző halálának hírét. Aki őt ismerte, nem tudott közömbös maradni iránta.

Az alatt az idő alatt, amit Zemplén 1896-tól, az Eötvös-Kollégiumba nyert felvételétől 1914-ig, amikor a háború elszólította őt a számára kijelölt békés, tudományos tevékenységétől, 18 esztendő telt el. Az eltelt — viszonylag rövid — idő alatt a vidéki diákból a Műegyetem világviszonylatban is ismert, nyilvános rendes tanára lett. Mindenütt csak barátokat szerzett magának, akik fájó szívvel vettek tudomást a Sors megfelebbezhetetlen rendeléséről.

Életének a foglalatát ebben az időszakban az egyetemi élet képezte; eleinte mint kollégista, hallgató, később mint Eötvös tanársegéde, már a tantestület tagja; végül ő maga is egyetemi tanár.

Ezen kívül számos tudományos társulatnak, egyesületnek egyszerű működő tagja, de rövid idő után már itt is tisztségeket viselő, irányító tagja.

Mindenütt, ahol megjelent, döntő jelentőségű tevékenységet volt képes kifejteni a maga egyéni, de a közösségi élet számára is.

Többek között már korán tagja lett az egyetemi asszisztensekből alakult Egyetemi Asztaltársaságnak, később — *Kis Akadémiának.*

A Kis Akadémia negyvenkét esztendeje az ezredik előadásig, 1899—1941-ig, szerkesztette Bartha István, gyógyszerész közreműködésével, Förster Rezső okl. vegyész mérnök, szkfőv. fővegyész, Budapest 1941. (14.)

Kis Akadémiánk 1916 július 3.-án adta ki gyászjelentését szeretett barátunk hősi haláláról. Egy évvel később temetéséről szóló meleg hangú gyászjelentésünk a következő:"

„Kegyeletes megilletődéssel tudatjuk, hogy a hazánk határaiért folyó gigászi küzdelemben . . . hősi halált halt és idegilenesen a harctéren hevenyészett sírban eltemetett, felejthetetlenül kedves barátunk, *Dr. Zemplén Győző* műegyetemi ny. r tanár hazaszállított földi maradványait folyó hó 16-án, szombaton délután 5 órakor fogják a farkasréti temető halottasházából a honi földnek átadni . . . "

"Az igazi barátságot fakasztó melegség, mely szeretetreméltó egyéniségéből szívünkbe átáradt, soha nem hülhet ki, mert visszaemlékezésünkben örökkétartó szeretetté állandósult. Baráti szeretetünk mint szilárd törzshöz hozzásimuló inda, a mindig éber visszaemlékezésnek soha el nem enyésző repkényével fogja körülölelni eltűnő alakját."

Budapest, 1917 június hó 15.-én. (15.)

A Kis Akadémia Könyvtára imént megjelölt kötetében, annak 488-490 oldalán, *Fekete Jenő* Zemplénre emlékezve a következőket írja:

Zemplén Győző, a magyar fizikai tudományok egyik legnagyobb ígérete, a Kis Akadémiának első fizikus halottja volt. Még az elmúlt világháború idején is, amikor pedig nap-nap után vesztettük el azokat, akiket tiszteltünk és becsültünk, még ebben az időben is megdöbbentett bennünket az a hír, hogy Zemplén Győző hősi halált halt. Miért éppen őt kellett elvesztenünk, akinek zsenialitását és nagy tudását már fiatal korában mindenki elismerte és csodálta? Ha valaha, úgy akkor nehéz volt megnyugodni a Sors akaratában. stb. stb.

Itt következik Zemplén működésének elemzése, ami már más helyen nagyrészt megtörtént.

. . . Tudományos értekezésein kívül, amelyek mindig valamelyik nyugati nyelven is megjelentek, kiemelkedő *„Az elektromosság és gyakorlati alkalmazása"* című népszerű munkája és *„A testek radióaktív viselkedéséről"* szóló műve stb. stb.

Még ma, 24 év múlva is nehéz feladat részemre Zemplén Győzőről megindulás nélkül emlékezni. Legszebb éveinket töltöttük együtt és azt az időt nem lehet elfelejteni. A dicsérő és magasztaló jelzők halmazával lehetne őt elborítani, de eszünkbe jut az ő egyszerű, minden formaságtól ment és sokszor talán a kíméletlenségig őszinte, de mindig igazságos jelleme és csak annyit mondhatunk, hogy vele igaz embert és nagy, ritka képességekkel megáldott tudóst vett el a Gondviselés.

Mikor Zemplén tanársegéd lett az egyetemi fizikai intézetben, azonnal bekapcsolódott a Kis Akadémia működésébe. Nemcsak az előadásokat látogatta és rendszeresen részt vett a baráti vacsorákon, hanem kiváló előadásokat is tartott, amelyek a következők:

1903 január 19-től február 9-ig négy előadást tart: *„A végtelen kicsiny mennyiségekkel való számolás elemei"* címmel, amelyben a differenciál és integrálszámítás elemeit ismerteti. További előadásai: 1906 február 12-én: *„Rádióaktív jelenségek"*, 1906 december 3-án: *„A hősugárzás elmélete, különös tekintettel az elektromos világításra"*, 1910 január 17-én: *„A dróttalan táviratozás haladása"*.

A Kis Akadémia minden tagja hálás kegyelettel és baráti szeretettel őrzi emlékét. (16.)

* * *

Az I. Világháború kiszámíthatatlan és irgalmatlan torzításai törték ketté és szakították széjjel azt az ígéretet, melyett Zemplén Győző fiatal élete a magyar tudomány számára jelentett.

Az azóta eltelt 6 évtized lassan-lassan elhomályosította azt a derűt, megnyugvást keltő öntudatot, amit az ő egyénisége magából árasztott, de azt a metsző fájdalmat is, amelyet az ő eltűnése a visszamaradókban kiváltott.

Ma örömmel üdvözölhetjük azt a kezdeményezést, amely újból felidézi Zemplén Győzőre való emlékezést és kívánjuk, hogy az ő példája, az élet küzdelmeibe induló fiatalság számára minél termékenyebb például szolgáljon!

IRODALOM

[1.] *Kovács László:* A Nagykanizsai Zemplén Győző fizikai versenyek tapasztalatai. A Fizika Tanítása. — Oktatási Minisztérium módszertani folyóirata 1975 XIV. évf.

[2.] *Kovács László:* Zemplén Győző élete és munkássága. Nagykanizsa Városi Tanács Hiradója 1974 I. — 11. old. —

[3.] *Kovács László:* Zemplén Győző a fizikai oktatás korszerűsítéséért. Fizikai Szemle 1975/6, 232. old.

[4.] *Laczkó Géza:* (hajdani Eötvös-kollégista) Királyhágó. Önéletrajz, regény. Budapest 1938.

[5.] *Környei Elek:* Eötvös Loránd a tudós és művelődéspolitikus írásaiból. Jegyzetek Budapest, 1964. 351—361. old.

[6.] *Abonyi Iván:* Zemplén Győző 1879—1916 Fizikai Szemle 1966/10. 289. old.

[7.] *Söpkéz Sándor:* Zemplén Győző emlékezete. Term. tud. Kzlny. XLVIII. köt. 1916. 661—662 fzt. 681—687. old.

[8.] *Zemplén Győző:* Levelek Eötvös Lorándhoz 1905, 1909, 1915.

[9.] *Roland Eötvös:* Über Geodätische Arbeiten in Ungarn besonders über Beobachtungen mit der Drehwaage. Verhandl. d. allg. Konferenz d. Internat. Erdmessung in London—Cambridge 1909. —

[10.] *Roland Eötvös:* Sur les travaux géodésiques exécutés

en Hongrie spécialement ... etc. etc. — mint előbb, francia nyelven.
[11.] *Lénárd Fülöp:* levele Eötvös Lorándhoz 1913. — MTA Kézirattár. (Német eredetiből ford. Környei Elek.)
[12.] *Ehrenhaft Félix:* levelei Eötvös Lorándhoz 1914, 1915, 1916, 1918.
[13.] *Lexikon der Physik:* H. Franke, Band I. Stuttgart 1950. Seite 232. —
[14.] *Bartha István—Forster Rezső:* A Kis Akadémia negyvenkét esztendeje az ezredik előadásig 1899—1941. — Budapest 1964.
[15.] *Pekár Dezső:* 14.)-ben Az 1905—1924 időszak 86. old. —
[16.] *Fekete Jenő:* 14.)-ben Zemplén Győző dr. 488—490. old. —

Megjegyzés: A szövegben felemlített leveleket az Állami Eötvös Loránd Geofizikai Intézetben őrizzük.

A FIZIKA TANÍTÁSA

JAVASLAT A TERMÉSZETTUDOMÁNY TANÍTÁSÁRA I.

Magyar Tudományos Akadémia

A természettudomány az egységes, történetileg fejlődő és társadalmilag meghatározott emberi megismerő tevékenység szerves része. *A természettudományos műveltség éppoly fontos a gyakorlat, a világnézet, a közérzet szempontjából, és éppen úgy egységet alkot, mint az anyanyelvi, a matematikai vagy történelmi műveltség. A természettudomány a természeti jelenségek és technikai folyamatok széles körében a lényeges összefüggések kiemelése által lehetővé teszi a tájékozódást, sőt előrelátást. Ezen alapul a természettudomány iránt megmutatkozó társadalmi igény.* A szocialista társadalom építését a tudományos technikai forradalom idején, arra támaszkodva kell végeznünk. Az egyre fokozódó színvonalú műszaki munkához a természettudományok tanulásával elsajátított ismeretanyag és képességek szolgáltatják a megalapozást. A materialista világnézet a matériát, az objektív anyagi valóságot tekinti elsődlegesnek, a természettudománynak tehát világnézeti alapvetést is biztosítania kell. A gyorsan alakuló természetben és a technikával átitatott tárgyi környezetben nem idegenként, hanem otthonos közérzettel és tevékenyen kell mozognia a felnövekvő fiatalnak, nemcsak annak megértésére, de annak tudatos kialakítására vonatkozó készséget is ki kell fejlesztenünk.

Az általános és középiskolai természettudományi órák együttes száma eléri, megközelíti a magyar-, illetve a matematikai-órák számát. *A természettudományi nevelés egységes céljai indokolttá teszik,* — hogy felsőbb osztályokban fenntartva a biológia, fizika, földrajz, kémia tantárgyak hagyományos rendszerét — *egységes tervet dolgozzunk ki a természettudomány egybehangolt tanítására.* (A hagyományos tanárképzésünk és tantervszerkezetünk más országokhoz viszonyítva szélső típust képvisel nagyfokú szakosítottságával. A hazai tudós és tanár közvélemény ragaszkodik ehhez a szakosítottsághoz. Ezért mi is ehhez igazodtunk.) Ügyeltünk arra, hogy az egymás mellett futó, illetve egymást követő tantárgyak tartalmilag illeszkedjenek, támogassák egymást. Lehetőség nyílik arra, hogy az egyik évben egyik tantárgyban tanultakat más tantárgy később alkalmazza. Ily módon megnyújtható a tananyag egyébként korlátozott begyakorlási, érlelési ideje.

Az MSZMP Központi Bizottsága közoktatási határozatának értelmében iskoláink megújításánál három szempontot kell szem előtt tartanunk:

a) A tudást el kell mélyítenünk; a tananyag igazán jelentős részeit az átmeneti verbális memorizálás szintjéről a maradandó képességek szintjére kell átvinnünk.

b) A tudomány századunkban elért és ipari, mezőgazdasági, tudományos, filozófiai, általában társadalmi hatásukat ma kifejtő nagy felfedezéseit a klasszikus fejezetekhez hasonló súllyal be kell építenünk a tananyagba.

c) Csökkentenünk kell a tanulók túlzott terhelését, amely akadálya a tudás elmélyítésének, az ifjúság harmonikus nevelésének, a hátrányos helyzetből induló fiatalok felemelésének.

A szokásos iskolai oktatásban gondolkodva e követelmények egymással ellentétes irányba húznak. Meg kell keresnünk a választ a következő kérdésre: milyen koncepció alapján, milyen áldozatok tudatos vállalásával valósíthatjuk meg optimálisan céljainkat. Tervünk kidolgozásában a következő szempontok vezetnek:

Az általános iskolát nyílt rendszernek tekintjük, amely után a fiatalok igényesebb munkakör ellátására, ill. felsőfokú tanulmányokra készülő fele továbbtanul. Ezért az általános iskolában nem igényünk a teljesség elérése. Természettudományos szemléletre kívánunk nevelni kiemelt témakörök elmélyültebb tárgyalásával. A témakörök kiválasztását a mindennapi élet gyakorlati szempontjai is irányítják.

A gimnáziumban az egyes klasszikus tudományok történelmileg kialakult ismeretanyagának közlése helyett egységes természettudományos világkép bemutatását tűzzük ki feladatul. Meg kívánjuk szüntetni az *„iskolás" fizika, kémia, biológia, földrajz* és a ma fejlődő, társadalmilag most ható *élő tudomány* kettősségét. *Az egyes tárgyak maximális összehangolása csökkenti azt a tanulókra nehezedő terhet, amelyet az összefüggéstelen, inkoherens ismeretek elsajátítása jelent. Az integrált világképbe hézagkitöltő szereppel önként beilleszkednek az új fejezetek. A természettudomány által nyújtott áttekintést megnyitjuk a társadalmi csatlakozások felé.* A korábbi tantervek hagyományos anyagával szemben az *itt javasolt természettudományos nevelés feltétlenül alkalmas arra, hogy természettudományosan megalapozza a dialektikus és történelmi materialista világnézetet.*

A természettudományos óraszám az 1950-es évek tantervéhez képest (éppen a tudományos-technikai forradalom kibontakozásának időszakában) számottevően csökkent. (Ennek oka a politechnikai képzés bevezetésekor és megszüntetésekor kiváltott egyoldalú átrendezés volt.) *Jelenleg az általános iskola és a gimnázium óraszámának 15 %-a jut természettudományi nevelésre. Tervünk ezt a helyzetet veszi alapul.*

A nemzetközi összehasonlítás egyértelműen bizonyítja, hogy jelenleg természettudományos nevelésünk leggyengébb szakasza az alsó tagozat.

Tervünk javasolja, hogy a környezetismeret tárgy helyett (amely eklektikus, mozaikszerű volta miatt nem képes határozott nevelési célt megvalósítani) *az alsó tagozatban vezessünk be egy egyértelműen természettudományos tantárgyat és nevezzük azt természetismeretnek.* (Ilyen tárgy a Szovjetunió és a legtöbb más ország iskoláiban régóta létezik. Ezenkívül gondoskodni kell a társadalmi ismeretek tanításáról külön tárgyként vagy az anyanyelvi oktatás részeként.) Ellensúlyozásként a *felső tagozatban némileg csökkentettük a természettudományos tárgyak jelenlegi óraszámát.* Megváltoztattuk és összehangoltuk azok tartalmát, enyhítettük az átmenet élességét az alsó és felső tago-

zat közt. *A gimnáziumban szintén a természettudományos tárgyak mai óraszámával gazdálkodtunk.* Az óraszámok ésszerűbb felosztása folyamatban levő oktatási kísérleteink szerint lehetővé teszi céljaink megvalósítását. Véleményünk szerint a *gimnáziumok korábbi politechnikai óraszámát kellene a fakultatív képzésre fordítanunk,* ügyelve arra, hogy a fakultatív képzés ne fokozza, hanem enyhítse az iskolapad- tábla- kréta-rendszer merevségét. Ezért a természettudományos, műszaki fakultatív képzést vállalók számára egységes laboratóriumot javasolunk, amely nagymértékben manuális és képességfejlesztő. Ez a tárgy a műegyetemi—orvosi—természettudományi egyetemekre pályázók mellett a gyakorlati műszaki—egészségügyi—mezőgazdasági pályára készülők igényeit is szolgálja. Egyben határozott előnyt biztosít a termelőmunkát végző szülők gyermekeinek.

Az általános iskola első négy osztályában egyesített (integrált) természettudományi tárgyat ajánlunk. Az 5. osztályban és az I. gimnáziumban összevont (komplex) jellegű tárgy szerepel. Ezek tanítása a tanárok jelenlegi szakpárosítása folytán, ill. minimális továbbképzést feltételezve nem okoz nehézséget, amint azt oktatási kísérleteink bizonyítják. A IV. osztályos természettudományos órák anyagfejlődési nézőpontra koncentrálva hivatottak a szintézis biztosítására, ezért az itt tanító tanárok fokozott együttműködésére van szükség. Ezúton nevelési célkitűzésünk érvényre juttatása mellett azt is elérjük, hogy a *gimnáziumban gyakorlatilag megszűnnek a pedagógiailag rossz hatásfokú kétórás tantárgyak.* Sajnos, a felsőtagozatban — ahol az egyesítés fokozottabban kívánatos — ilyen változást nem tudunk realizálni az általános iskolai tanárok jelenlegi szakosítása mellett. (A Tanárképző Főiskolákon a fizika, kémia, biológia tárgyak közül semelyik kettő nem párosítható egymással.) *Javasoljuk a Tanítóképzőben a természettudomány tanításának bevezetését, a Tanárképző Főiskolán természettudomány-szakos tanárképzés megindítását, az egyetemeken a jelenlegi kétszakos képzés fenntartását az egyetemes természettudományos alapozás erősítésével.* E szempontok figyelembevétele nélkül pedagógusképzésünk a világszerte megfigyelhető nevelési tendenciák ellen dolgozik. A természettudományos nevelés összefüggő struktúrája, a tanárok széles körű alkalmazhatósága és alkalmazottsága igényli, hogy az egyetemek a tanárokat a felső tagozatos tananyagra, a főiskolák pedig az alsó tagozatos természetismeret anyagára és a gimnáziumi tananyag lényeges részeire is felkészítsék. Ez megkönnyítheti az iskolastruktúra változásának keresztülvitelét is.

A következőkben megadjuk a jelenleg érvényes, utána pedig a tervünk megvalósítását lehetővé tevő órabeosztást (1. és 2. táblázat).

A következőkben megfogalmazzuk a természettudományos nevelés célját, összefoglaljuk az általános műveltség iskolában tanítandó természettudományos összetevőit. Ennek alapján megadjuk az egyes tantárgyak nevelési, tartalmi és módszertani koncepcióját. (A tárgyak tananyagára egy lehetséges változatot adunk. A tananyagban az aláhúzott fejezetcímek jelentik a tananyag lényegét. A zárójelben közölt felsorolás csupán tájékoztató jellegű, azt semmiképpen nem szabad végleges és kötelező előírássá tenni. A gyakorlat dönti el, sőt alkalmanként a tanulók, a tanár és a tankönyvíró érdeklődése, hogy az egyes fejezeteket milyen sorrendben tanítsák, egy fejezeten belül milyen témák elemzésével fejtsék ki az alapvető mondanivalót.)

Munkánk során megvizsgáltuk más országok — elsősorban a szocialista országok — oktatási gyakorlatát és trendjeit. A hasznos tanulságokat tervünkben felhasználtuk. Az itt bemutatott terv realitását szavatolja, hogy

1. táblázat

Jelenlegi óraterv

	1	2	3	4	5	6	7	8	I	II	III	IV
(Környezetismeret)	(1)	(2)	(2)	(2)	—	—	—	—	—	—	—	—
Fizika					—	2	2	2	—	3	3	4
Kémia					—	—	2	2	2	2	2	—
Földrajz					2	2	2	2	2	2	2	—
Biológia					2	2	2	2	2	2	2/0	2
Pszichológia					—	—	—	—	—	—	0/2	—
Világnézet (term.tud. rész)					—	—	—	—	—	—	—	2/0
(Gyakorlati fogl.)					—	—	—	—	(4)	(4)	(4)	(4)
Összes kötelező	(1)	(2)	(2)	(2)	4	6	8	8	6 (4)	9 (4)	9 (4)	7 (4)

t

2. tábláza

Javasolt óraterv

	1	2	3	4	5	6	7	8	I	II	III	IV
Természetismeret	1	1	2	2	3	—	—	—	—	—	—	—
Fizika						2	2	2	—	3	3	3
Anyagszerkezet						—	—	—	4	—	—	—
Kémia						—	2	2	—	3	2	—
Földrajz						2	2	2	3	2	—	—
Biológia						2	2	2	—	—	4	3
Fakultatív labor						—	—	—	—	—	(3)	(6)
Összes kötelező	1	1	2	2	3	6	8	8	7	8	9	6
Fakultatív											3	6

annak kulcsponti részeit kísérleti osztályokban több éven át több ezer válogatatlan tanulóval kipróbáltuk és sikeresen megvalósítottuk. A tankönyvpótló jegyzetek jelentős része elkészült és használatban van. Munkánkat a pedagógusok, tudósok és szülők széles köre kísérte figyelemmel. Mindezeket a gyakorlati tapasztalatokat a terv itt közölt megfogalmazásában figyelembe vettük.

Ha az oktatásügy intézői javaslatunk teljes kivitelezését (a tanárok-tanítók képzettségére, az iskolák felszereltségére, a tanár- és tanítóképzés jelen formáira hivatkozva) 1979-ben még nem tartják országosan bevezethetőnek, akkor is kérjük, hogy tervünket és tankönyveinket alternatív lehetőségként fogadják el. Ez a tanterv további kiértékelését is szolgálja. A tervünk szerint vállalkozó tanárok és iskolák számára indokolt az oktatás automatikus engedélyezése, tervünkről és annak hivatalos alternatív kísérletként való elfogadásáról értesítendők a felsőfokú oktatási intézmények felvételi bizottságai és a pedagógusképző intézmények is.

A természettudományos nevelés célja

A természettudományos nevelésnek biztosítania kell a következő célok megvalósítását:

I. *A természettudományos érdeklődés felkeltése*, a természettudományok az egyetemes kultúra részeként való bemutatása. (Fokozott gondot kell fordítanunk a tanulók motiváltságára. A gyermekek pszichológiai fejlettségét figyelembe véve az óvodai világképből, a közvetlen tapasztalatból kiindulva úgy kell felépítenünk a világ természettudományos szemléletét, hogy a tanuló a természetet szépnek lássa, a természetkutatást érdekesnek és abban önmagát érdekeltnek érezze. Nagy kutatók életének és működésének bemutatása, a tudománytörténet nagy vitáinak és forradalmainak felidézése alkotó szemléletre nevel. Egyben lehetővé teszi a természettudományos kutatásra vonatkozó társadalmi igény bemutatását.)

II. *A világ természettudományos megismerési módszerének elsajátítása.* (Ennek alaplépései a következők: objektív tapasztalat, a lényeges kapcsolatok kiemelése, modell alkotás, új jelenségek előrelátása, ennek alapján a modell kísérleti ellenőrzése, szükség esetén a modell korrekciója vagy továbbfejlesztése, a modell alkalmazása, társadalmi hasznosítása.)

III. *Az anyag mozgásában megnyilvánuló általános elvek ismerete.* (A kisszámú, de széles körben alkalmazható elvek közé olyanokat sorolunk, mint pl. okság, tehetetlenség, a makroszkopikus anyagtulajdonságoknak mikroszkopikus szerkezet által való meghatározottsága, természetes kiválasztódás. A tanulóknak ezeket az elveket élményszerűen, felfedezés-szituációkban kell felismerniök, azok önálló alkalmazásának képességét maradandóan el kell sajátítaniok.)

IV. *Tájékozódás a világban (a természeti és technikai környezetben) a természettudományos megismerés módszerével az általános elvek alapján.* (Az egyetemes elvekhez, mint vezérfonalhoz kapcsolandók a részismeretek, mint szemléltető és begyakorló példák. Itt tág tér nyílik a tanuló és a tanár alkotó együttműködésére. A tananyag folytonos korszerűsítése a példák cseréjében nyilvánulhat meg. A tájékozódás legtöbbször csupán hozzávetőleges, kvalitatív, de arra elegendő, hogy a természeti és technikai környezet egyes jelenségeit ne érezzük idegennek, elszigeteltnek. A tájékozódás során nem kell minden részismeretet személyesen kikísérletezni, felfedezni. Jártasságot kell kialakítani a társadalmilag felhalmozott információk beszerzésében, kezelésében, felhasználásában.)

V. *Áttekintő természettudományos világkép kialakítása; a természettudomány hozzájárulása a dialektikus materialista világnézet kialakításához.* (A természet és társadalom szülötte az ember. Az anyagot annak mozgástörvényeit ismerve, nem pedig azok ellenében használhatja fel a termelő munkában.)

A természet megismerésénél kiindulásunk a közvetlen megfigyelés és a tervszerű kísérlet. Ezek képezzék az iskolai természettudományos nevelés kiindulását is. A természettudományos szemlélet kialakítása elsősorban a természet objektív megismerésére szolgáló módszereknek készségszintű elsajátítása már 14 éves korra megtörténhet. Az egységes természettudományos világkép felépítése, a dialektikus materialista világnézet következetes kifejtése, a termelő cselekvés készségének kialakítása 18 éves korra valósítható meg.

A természettudományos műveltség tartalma

A természettudományos műveltség négy alapvető részének a következőket tartjuk:

I. Az anyag mozgástörvényei
II. Az anyag struktúrája
III. Az élő anyag organizációja
IV. Az anyag evolúciója

Az alábbiakban igyekszünk részletesebben megfogalmazni az iskolában megszerezhető műveltségi elemet. A felsorolás nem jelent tantárgyi felbontást vagy időbeli egymásutánt. Az általános iskolában is szereplő alapokat *aláhúzással* emeljük ki.

I. Az anyag mozgástörvényei

A természettudomány (ezen belül különösen a fizika) első feladata az anyag egyetemes mozgástörvényeinek megismerése. Ez a természet egzakt megértésének és cselekvő átalakításának kiindulópontja lehet.

Az anyag objektivitása, megismerhetősége. Az anyagi tulajdonságok mérése. Élettelen és élő anyagi rendszerek.

Helyzet és mozgás leírása. Vonatkoztatási rendszerek. A helyzet és sebesség relatív volta. Az előre jellemző mozgások. Tér és idő. Az anyag és a téridő kapcsolata.

Megmaradási törvények: lendület (mozgásmennyiség) *energia*, perdület (impulzusnyomaték), tömegközéppontsebesség *megmaradása*. Energia és tömeg ekvivalenciája. Elektromos töltés és bariontöltés megmaradása. Az energiatörvény érvényessége élőlényeknél.

Kölcsönhatás részrendszerek között, akció-reakció elve. Lendületátadás-erőlökés. Energiaátadás-munka, hőközlés. Perdületátadás-forgatónyomaték. *Okság elve. Élettelen és élő kölcsönhatása. Élő és élő kölcsönhatása.*

Gravitációs kölcsönhatás. Elektromos kölcsönhatás: elektromos mező hatása töltött testekre, töltött testek hatása elektromágneses mezőre. Nukleáris kölcsönhatás: magerő. Rádióaktivitás.

Megismételhető és ismétlődő jelenségek. Rezgőmozgás. *Hullámszerű mozgásformák.* Hullámok keltése, terjedése, összerakódása. Elektromágneses hullámok. Elektronhullámok. Határozatlansági összefüggés. Valószínűségi értelmezés. Pauli-elv.

Megfordítható és egyirányú folyamatok. Hőmérséklet, mint nagy szabadságfokú rendszerekben a rendezetlen mozgás egy szabadsági fokra jutó átlagos energiája. Hőközlés, mint statisztikusan rendezetlen munkavégzések eredője. Ekvipartició. Állapotok statisztikus valószínűsége. A statisztikus rendezetlenség növekedésének elve. *Progresszív és regresszív, megfordítható vagy egyirányú folyamatok az élő anyagban, egyedi és rendszer szinteken.*

II. Az anyagi struktúrák

Az anyagi részecskékből kölcsönhatások eredményeképpen fokozódó komplexitású struktúrák épülnek fel. A különféle kötéstípusok kötési energiája nagyságrendben különbözik. Ez lehetővé teszi, hogy az anyagi struktúrákat szintekre bontsuk, és azokat egymástól elkülönítve tárgyaljuk. Földi környezetünkben kiemelkedő gyakorlati fontossága van az atomok kölcsönhatásainak. E szint tanulmányozása elsődlegesen a kémia feladata.

Az anyag elemi változatai: Elektromágneses mező, *elektromágneses sugárzás, fény.* Gravitációs mező. *Elektron,* proton, neutron. *Az építőelem-elv.*

Atommagok, mint intenzív magerők által összetartott, különösen stabil rendszerek. Rendszám, tömegszám. Izotópok. Magátalakulás, atomenergia. Kémiai elemek (viszonylagos) megmaradása.

Atomok, mint elektromos vonzás által összetartott rendszerek. Az atom stabilitása, alapállapot. Gerjesztett állapotok, kvantumszámok. Periódusos rendszer, annak értelmezése a Pauli-elv alapján.

Molekulák: atommagok és elektronok kötött rendszerei. Atompályák átalakulása molekulapályává. *Kovalens kötés, vegyérték,* disszociációs energia, molekulaméret, molekulaalak. Többszörös kötés, a kötés polarizáltsága. Redox folyamatok. Biológiai szempontból különösen fontos kötéstípusok. A kötések átrendeződése, reakcióhő, a kémiai reakciók időbeli lefolyása. Katalízis. Biokatalízis, enzimek. A folyamat végbemenetelének és az egyensúly beállásának feltételei, negatív visszacsatolás, visszacsatolás az élő szervezetekben. *A szénvegyületek biológiai szerepe, ennek molekulaszerkezeti magyarázata. Néhány fontos vegyülettípus ismerete.* Apoláris és poláris csoportok. Molekulaszerkezet és makroszkopikus vegyülettulajdonság kapcsolata. Óriásmolekulák.

Halmazállapotok. Kölcsönhatás molekulák között. Van der Waals-kölcsönhatás, hidrogénkötés. *Gázok,* a gáz kinetikus elmélete. Kondenzáció. *Folyadékok.* A víz szerkezete, oldatok, oldhatóság. Sav-bázis jelenségek. Felületi feszültség. *Szilárd anyag,* kristályok kötéstípusai. A kötéstípus és a belső szerkezet, mint az anyagi tulajdonságok (olvadáspont, olvadáshő, fajhő, keménység, elektromos és hővezetés, polározhatóság) meghatározója. *A víz biológiai szerepe. Sejtes szerkezet. Struktúra egyeden belül és egyed feletti szinten.*

III. Az élő anyag organizációja

Az általános műveltség biológiai részének azokat az ismereteket tekintjük, amelyek: *a)* Megmutatják a fizika és a kémia törvényeinek korlátozás nélküli érvényét és megvalósulási módjait az élővilágban, így teljessé teszik a világ anyagi egységéről alkotott képet. *b)* Az élőlényekben és élőlények közt olyan speciális kapcsolatokat ismernek fel, amelyek nem korlátozzák a fizika és a kémia törvényeit, hanem erősen komplex és magas fokon szervezett struktúrák esetén kiegészítik azokat. *c)* Bemutatják a jelenlegi élővilág kialakulásának folyamatát. Így a biológiai műveltség összetevői:

Az élő rendszerek nyílt önszabályozó rendszerek. Az élőlények individuálisan léteznek, minden egyed létének története, kezdete és vége van. Az élőlények együtt azonban a fajfejlődés révén folytonosságot képviselnek a Földön. Ezért szükség van fajismeretre, példaszerűen a törzsfejlődéstani, gazdasági és ipari szempontból fontos élőlények — mikroorganizmusok, *növények, állatok — néhány taxonjának és néhány közösség tárgyszerű ismeretére, valamint a növény- és állathatározó használatára. — Az élőlényekre maradéktalanul érvényesek a fizika és kémia törvényei, köztük is az energiamegmaradás törvénye.* Az élőlények tulajdonságai visszavezethetők a bennük zajló kémiai folyamatokra, végső soron a bennük található molekulák szerkezetére a következő sorozat szerint: tulajdonság — kémiai reakció — fehérje — RNS — DNS. *Ezen alapul a sejtek, szövetek, szervek működése.* A biológiai önszabályozásnak több szintje van: enzimes, genetikai, hormonális, idegi és ökológiai szabályozás. Ismerni kell az egyensúlyok feltételeit. Rendelkezni kell etológiai alapismeretekkel.

Az élőlények alkalmazkodnak környezetükhöz. Minden szervezettségi szinten megfigyelhetők az adaptáció különböző formái.

Az élőlények önreprodukáló rendszerek. Információtároló rendszerek vannak minden élőlényben és közösségben. Vannak genetikusan adott információk és vannak az élettevékenység során a környezetből felvett információk. (Ismerni kell a DNS, RNS információtároló szerepét az öröklés és egyéb élettevékenységek folyamán, a *kromoszóma és gén fogalmát, a mutáció jelenségét, a Mendel-szabályokat, a természetes kiválasztódást. Rendelkezni kell szaporodásbiológiai alapismeretekkel.)*

Az élővilág időben fejlődő rendszer. A fajok időbeli átalakulásának története az evolució. Ismerni kell az ember származását, az emberréválás természeti és társadalmi okait. *Az ember biológiai és társadalmi lény.* Szükség van pszichobiológiai alapismeretekre. *A gondolkodó ember megismeri az anyagi világot és önmagát. Tudatosan alakítja környezetét. A környezet átalakulása lehet hasznos és káros az ember számára. Ismerni kell a környezetvédelem szerepét az emberiség jövője szempontjából.*

IV. Az anyag evolúciója

Az anyagi világ mai állapotát az anyag mozgástörvényei, valamint történetileg kialakult speciális adottságok határozzák meg. De az anyagi világ történeti alakulását végső soron szintén az anyag mozgástörvényei alapján érthetjük meg. Ha tehát figyelmünket nem csupán világunk mai állapotára koncentráljuk, hanem annak időbeli evolucióját is figyelembe vesszük, egységesebb világképet kapunk. Ennek alapján megismerhetjük azokat a tendenciákat is, amelyeket világunk mai állapota tartalmaz.

Az anyag, elemi alkotórészekből kiindulva, az egyetemes mozgástörvények és kölcsönhatások eredményeképpen több lépcsőben szerveződött komplex struktúrákká. A Föld szerkezete és felszíni sajátosságai szintén hosszú történeti fejlődés eredményei, amely szüntelenül befolyásolja a rajta kialakuló életet és az emberi társadalmat. Másrészt az ember környezete az ember által alakított, „humanizált" természet.

Csillagok. A hidrogénfelhők gravitációs csomósodása: csillagképződés. Magfelépülés a csillagokban, atomenergia felszabadulás és kémiai elemek kialakulása. A Nap.

Bolygórendszer. A bolygók kialakulása (gravitációs kontrakció és perdület-megmaradás). A bolygók és a Hold szerkezetének, légkörének, felszíni viszonyainak egybevetése és levezetése a felszíni hőmérsékletet elsősorban meghatározó Nap-távolságtól függő gázdisszipáció alapján. *A folyékony víz földi felhalmozódása.*

Földtörténet. A Föld szerkezete és egysége a földmagtól a magnetoszféráig. A hidro- és atmoszféra evolúciója. *A víz kémiai szerepe a földi üledékes kőzetek,* az agyagásványok *képződésében.* A nagy földi dinamizmus: az üledékes kenőanyag közvetett és közvetlen hatása, a litoszféravándorlások, az óceánok fejlődése, elhalása. *A litoszféra betolódása a köpenybe, hegységképződés.* Elemek koncentrálódása hasznosítható telepekké. *Energiahordozó ásványi telepek.* Az agyagásványok sajátságai. A földfejlődés szakaszossága.

Biológiai evolució. Az élet keletkezése. A légkör és az élet kapcsolata, a légköri oxigén kialakulása és a fajszám gyors növekedése. Az élőlények és élőközösségek evolúciója a Földtörténet szakaszosságának függvényében. Az emberréválás. Élet lehetősége más égitesteken.

Általános iskola

Az általános iskola minden magyar fiatalt nevel, ez oktatásügyünk legfontosabb területe.

Az általános iskolában nem tudjuk megtanítani az egyes tudományok zárt rendszerét, a mind nyíltabb iskolává váló általánosnak ez nem is célja. A természettudomány kiválasztott fejezeteinek elmélyült, az életkori sajátságokat figyelembe vevő bemutatásával ki kell építeni a tanulókban azt a képességet, hogy életük során önállóan legyenek képesek új felismerések befogadására és feldolgozására. A gondolkodásra nevelésben és az új felismerésében a jövőben a matematika mellett az eddiginél nagyobb szerepet kell biztosítani a természettudomány tanításának: rajta keresztül lehet leginkább rávezetni a tanulókat a közvetlen tapasztalat alapvető szerepére az őket körülvevő anyagi világ megismerésében. Az általános iskolára építi majd a középiskola a mainál megalapozottabb természettudományos oktatást. Az általános iskolai tanulóknak legfeljebb 50 %-a tanul tovább gimnáziumokban

vagy szakközépiskolában, ezért az általános iskolának biztosítania kell a világban önállóan tájékozódni képes emberek kinevelését.

Természetismeret

1 óra az általános iskola 1—2. osztályaiban
2 óra az általános iskola 3—4. osztályaiban
3 óra az általános iskola 5. osztályában

Gyermekeink az iskolába lépés előtt számtalan közvetlen tapasztalatot gyűjtenek a tárgyi világról, hogy megéljék életük nehéz első hat esztendejét. Az iskola kapuján átlépve a számok és betűk absztrakt világa fogadja őket. A következetes természettudományos képzés ma csak valamikor a 6. osztályban indul meg (addig legjobb indulattal is legfeljebb természetrajzi ismeretek oktatásáról beszélhetünk). Az a tény, hogy a természettudományt csak a nagymértékben absztrakt és verbális periódus végén tanítják, feje tetejére állított helyzet. Jóvátehetetlen kárt okoz nem csupán a természettudományos-műszaki képzésben, hanem a világnézeti nevelésben is. Indokolatlan kezdeti előnyhöz juttatja az adminisztratív-értelmiségi családok gyermekeit a közvetlen termelő munkát végző szülők gyermekeivel szemben.

Az általános iskolai természettudományos nevelésnek az a célja, hogy a közvetlen *anyagi valóság megismerését* az elvontabb (nyelvi, matematika) ismeretek bázisává tegye, nem pedig az, hogy formális szemléletűvé nevelődött gyerekek képzését *lezáró* verbális ismeretanyag legyen. Így az általános természettörvények felismerésének útját is végigjárva, a tanulókban önálló továbbfejlesztésre alkalmas természettudományos világkép alakul ki. Ez a cél úgy érhető el, hogy az általános iskolában az 1—5. osztályban egységes természetismeret tárgy kerül az óratervbe. Ez a terv az integráció felé tett első lépés, amelynek tapasztalatai alapján lehet majd kialakítani a távolabbi jövő esetleges magasabb fokú integrációját.

Tapasztalataink szerint az iskolába lépő gyerekek — önálló megfigyelések, próbálkozások, következtetések által szerzett — természettudományos ismeretei meglepően széleskörűek. Az óvodai világképet kell simán továbbépítenie a Természetismeret tantárgynak az első osztálytól kezdve. Biztosítanunk kell a természetes aktív gyermeki magatartás megőrzését és fejlesztését. A megismerés és cselekvés egységében fejlessze a gyermek kreatív személyiségét. *E tárgy feladata a gyermekek közvetlen tapasztalatainak, később tudatos megfigyeléseinek és tervszerű kísérletek útján nyert ismereteinek feldolgozása, rendszerezése, az általános következtetések levonása.* Itt tehát nem a fizika, kémia, földrajz, biológia tantárgyak ismeretanyagának egy részét kell közölni, hanem a gyermek tapasztalati körére támaszkodva, azon belül maradva kell leraknunk a világ természettudományos szemléletének alapjait.

A Természetismeret tanításának feladatai a következők:

Az 1. osztályban a tanítás tárgya: az anyag érzékelhető tulajdonságai, a módszer: a megfigyelés.

A 2. osztályban a megfigyelések körét az otthon és iskola tágabb körére terjesztjük ki, új módszert vezetünk be: a mérést.

A 3. osztályban a tanítás tárgya: az anyagi rendszerek kölcsönhatása, az új módszer a jelenségek tudatos előidézése, a kísérlet.

A 4. osztályban a tanítás tárgya: a helyzet és mozgás. Az elsajátítandó új módszer: a vonatkoztatás.

Az 5. osztályban a tanítás tárgya: a természeti földrajzi környezet és élővilág összefüggése. Az alkalmazott módszer: a jelenségkör komplex, szintétikus szemlélete.

A Természetismeret tantárgy egyaránt tartalmaz olyan elemeket, amelyeket a tradicionális szemlélet a fizika, kémia, földrajz, csillagászat, biológia témakörébe tartozónak ítél. Ezek az elemek most azonban együtt, problémacentrikusan jelennek meg, akárcsak az óvodai világképben. A Természetismeretnek nem szakismeretek közlésével kell segítenie a későbbi szaktárgyak tanítását, hanem természettudományos nevelési céljaink megvalósításával, a problémavállalás kifejlesztésével, a világ természettudományos megismeréséhez szükséges képességek megteremtésével a gyermekek természet iránt érzett pozitív attitűdjének biztosításával.

A Természetismeret tanításának módszere eltér a jelenleg alkalmazott oktatási módszerektől. *Ez a tárgy nagymértékben manuális foglalkozáson alapul, nem pedig megtanulandó leckeanyagon.* A tanulók minden órán, szinte folyamatosan tevékenykednek. Játékosnak látszó feladatokat kapnak: kiraknak, csoportosítanak, mérnek, rajzolnak, de azt is mondhatjuk, hogy elemi fokon tudományos kutatómunkát végeznek. Így játszva-kísérletezve jutnak új készségek birtokába.

A tanulók mozogjanak otthonosan a számunkra ismerős, barátságos anyagi világban. A kézbe kapott tárgyak legyenek ismertek már otthonról, a természetből, kirándulásokról, az újdonság azok tudatos szemügyre vétele, következetes vizsgálata. Eközben kell elvégezniök az olyan gondolati tevékenységeket, mint az összehasonlítás, viszonyítás, analízis-szintézis, absztrakció, általánosítás, konkretizálás. Így értük el a kísérleti tanítás során, hogy a



tanulók a Természetismeret órát kezük, érzékeik sokirányú foglalkoztatása felett érzett örömmel fogadják. A tárgy kiterjedt kísérleti oktatásnak tapasztalati szerint különösen szép a hátrányos helyzetű családok gyermekeinek felszabadult részvétele a Természetismeret-foglalkozásokon.

Ezek alapján a Természetismeret legfontosabb tantárgyi-pedagógiai feladatai a következők: alapvető természettudományos szemlélet és gondolkodásmód kialakítása és fejlesztése az önálló és közös megfigyelések és tevékenységek során gyűjtött tapasztalatok alapján, s ezáltal a *materialista világnézet megalapozása*. A Természetismeret tanítása hozzájárul azon meggyőződés kialakításához, hogy a világ anyagi természetű, jelenségeit anyagi okok idézik elő, e jelenségek az ember számára egyre jobban megismerhetők és felhasználhatók. Az általános iskola egyik legfontosabb nevelési feladata a *munkára nevelés*. A Természetismeretnek elő kell segítenie a tanulók esztétikai érzékének fejlesztését is. A természet szeretete, a színek, hangok, formák gazdagsága, az élet melegsége érzelmi, esztétikai élményt jelentsen a gyermekek számára. A természeti környezet nemcsak életfeltételeket biztosít az ember számára, de életkörülményeket is (minőségi értelemben). A természet esztétikumának felismerése, élvezete, értékeinek megóvása is természetvédelmi feladat. A tárgy programja tartalmánál és módszerénél fogva feladatait olyan természetes és hatékony módon, a gyermekek életkori sajátosságainak megfelelően képes megvalósítani, mint amilyenre más alsó tagozatos tárgyaknál kevés lehetőség nyílik. Nagyon jól illeszkedik a Természetismeret a matematika új általános iskolai tantervéhez.

Tananyag

1. osztály: Az anyag érzékelhető tulajdonságai, csoportosítás

Az anyag tulajdonságainak megfigyelése

(Tárgyak a tanteremben és otthon. A játékdoboz tárgyai. Élettelen és élő különbsége. Érzékszerveink — látás, tapintás, hallás, ízlelés, szaglás szerepe a megfigyelésben. Érzékszerveink óvása. Játékok a tárgyak felismerésére tulajdonságaik alapján: barkochba, találd ki, mi vagyok !)

Csoportosítás a megfigyelt tulajdonságok alapján

(Gombok, fahasábok, különféle anyagok csoportosítása különböző tulajdonságaik alapján: szín, alak, méret, alakíthatóság, felületi simaság; mindez játékos formában, elvárva és követve a gyerekek által felvetett szempontokat. Növények és állatok megkülönböztetése. Növények leírása és összehasonlítása. Állatok leírása és összehasonlítása feltűnő tulajdonságaik alapján: mi fedi testüket? hogyan mozog? hány lába van? Elengedhetetlen, hogy a leírt tárgy, élőlény a tanteremben bemutatásra jelen legyen, ez szabja meg az órák anyagát. A tanuló tevékenység által ragadja meg a természet gazdagságát, festéssel a színeket, gyurmázással a térformákat.)

Három halmazállapot

(Szilárd, folyékony, gáznemű anyagok tulajdonságai, csoportosítása. Kristályos, por alakú, szemcsés szilárd anyagok. Folyadékok, milyen folyadékokat ismerünk? Gázok, milyen gázokat ismerünk? A szemcsés, porszerű anyagok és folyadékok részleges hasonlósága. A víz három halmazállapota; hó és jég, gőz, felhő, eső.)

Egész és rész kapcsolata

(Növény részei: levél, virág, . . . Állat részei: toll, csőr, fej, láb, . . . Az ember megfigyelése. Az emberi test részei. Az ember és állat hasonlósága és különbsége. Az élőlények közös sajátságai, életjelenségek, kapcsolatuk a környezettel: lélegzés, táplálkozás. A kerti növények és a kert: babültetés. Hal és víz, akvárium megfigyelés. Ember és környezete: szoba, ház, kert, erdő. Az ember mint a környezet alakítója.)

2. osztály: A megfigyelés körének kiterjesztése. Mérés

Élőlények koncentrikus csoportosítása

(Környezet, lelőhely, termőhely, élőhely. Ház körül élő állatfajok. A kert élőlényei. A szántóterület, mező élőlényei. Az erdő élőlényei. A vizek és vízpartok élőlényei.)

Állatfajok

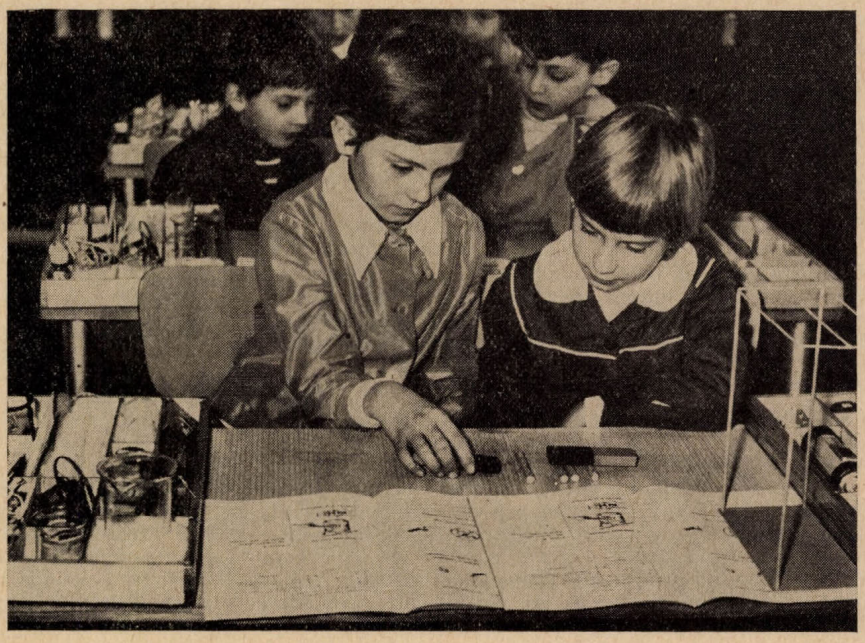
(Emlősök, madarak, kétéltűek, hüllők, halak, ízeltlábúak megkülönböztetéséhez szükséges jellemző tulajdonságok gyűjtése.)

Élőlények vertikális csoportosítása

(Talajon, talajban, vízben, levegőben élő élőlények.)

Környezetvédelem

(Tájak, általában növények és állatok védelme. Vízszennyezés káros hatásai.)



Hosszúságmérés

(Szalag, kar, testmagasság mérése. Egyenes és görbe út hosszúsága. Mérés hibája. Hisztogram. Legvalószínűbb érték.)

Területmérés

(Görbe határú területek összehasonlítása a terület kirakásával. Egységválasztás. Hasáb felülete: bevonás papírral. Növények levelének mérése, levélzet felületének becslése.)

Térfogatmérés

(Folyadékok térfogatának összehasonlítása és mérése. Szilárd anyagok térfogatának mérése vízkiszorítással.)

Tömegmérés

(Szilárd test tömegének a kg tömegegységgel való összehasonlítása mérleg segítségével. Folyadékok tömegének mérése. Az emberi test tömege.)

Hőmérsékletmérés

(Hőmérő. Kihűlő melegvíz hőmérsékletváltozása, grafikonkészítés. Emberi test hőmérsékletének mérése. Szoba és külső levegő hőmérséklete, hőmérséklet napi változása.)

3. osztály: Anyagi rendszerek kölcsönhatása

Zárt és nyílt rendszerek

(Lényeges és lényegtelen szétválasztása. Anyagi rendszer kiválasztása. Zárt rendszer. Részrendszer. Részrendszerek kölcsönhatása. A kölcsönhatás okozta változások.)

Példák kölcsönhatásokra I.

(Rugalmas kölcsönhatás, alakváltozás, erő, rugós erőmérő. Mágneses kölcsönhatás, kísérletek mágnessel, iránytű.).

Példák kölcsönhatásra II.

(Hőközlés. Jég olvadása, hideg és meleg viz keverése. Fény kölcsönhatása más anyaggal. Energiaforrások és fogyasztók. Zseblámpa és zseblámpaelem, elektromos energiaszállítás, áramkör.)

Példák kölcsönhatásokra III.

(Kémiai kölcsönhatás. Oldatok színváltozása. Szilárd csapadék. Gáztermék, szén-dioxid fejlesztés. Égés, az égéshez szükséges feltételek. Tüzelőanyagok: fa, szén, benzin. Égést tápláló és nem tápláló gázok, a levegő összetétele, égéstermékek; oxigén, nitrogén, szén-dioxid, háztartási gáz. Tüzeléstechnikai alapismeretek.)

Példák kölcsönhatásokra IV.

(Élő és élettelen kölcsönhatása, pl. légzés, táplálkozás során.)

Példák kölcsönhatásokra V.

(Élő és élő kölcsönhatása. Táplálkozás. Növényevő, ragadozó, mindenevő állatok. Védekezés. Az anyag átalakulása táplálkozás során. Búza, kukorica, szőlő mint a növények termése. Kenyér, takarmány, must és bor mint növényi eredetű termékek. Hús, zsír, tej és belőle készített termékek. Az ember táplálékai. Az élelemlánc előkészítése.)

Időbeli változás és egyensúly

(A kölcsönhatás változást okoz az anyag állapotában. Idő. Ok és következmény. A folyamatok időbeli lefolyása, Megfordíthatatlan folyamatok, a jelenségek időbeli sorrendje. Megismételhető, ismétlődő periódikus jelenségek az idő mérése, óra, légzésszám, pulzusszám. Kölcsönhatások egyensúlya. Az egyensúly felbomlása. Az élőlény életének időbelisége: születés, növekedés, fejlődés, halál. Szaporodás, hímnemű és nőnemű élőlény fogalma. Szülő és utód. Nemzedékek egymásutánja. Az egyedszám növekedése. Ezt akadályozó tényezők.)

4. osztály: Helyzet és mozgás

Helyzet

(Játékos helymeghatározás. A tárgyak helyének viszonylagossága. Helyzetek elemzése egy megfigyelő és több tárgy esetében, két megfigyelő és egy tárgy esetében stb. Helymeghatározás derékszögű és polárkoordinátákkal a síkon. Iránytű és világtáj. Alaprajz, térkép, lépték. Egyszerű tájékoztató alaprajzok, elemi térképek készítése. Ismert és ismeretlen vidék térképe. Útvonal kiválasztása. Kívánatos, hogy mindez a tanuló lakóhelyére vonatkoztatottan konkrét legyen ! Relatív helyzet fontossága az élővilágban; erdők élőszintjei.)

Mozgás

(Haladó mozgás. Út—idő-diagramm. A sebesség fogalmának előkészítése. Gyorsulás és lassulás kvalitatív megfigyelése haladó mozgásnál. A haladómozgás leírása egymáshoz képest mozgó megfigyelők által. Forgó mozgás. Forgó megfigyelők. A Föld forgása, nappalok és éjszakák. Világtájak a Föld forgása szerint. Fokhálózat a földgömbön, iskolánk és hazánk helye a földgömbön. A Nap mozgása, évszakok, éghajlati zónák a Földön; mindezek kapcsolata az élővilággal. A Hold mozgása és fényváltozásai. A bolygókról és csillagokról. Űrrepülés. Mozgások az élővilágban.)

A változás okai

(Kölcsönhatás okozta változás, kísérletek mágnesekkel, súrlódással. A tehetetlenség és az inerciarendszer előkészítése. Növények mozgása és növekedése, növekedést befolyásoló hatások. Állatok mozgása. Vérkeringés, légzőmozgás szerepe; légzésszám és pulzusszám megváltozása. annak okai.)

5. osztály: Hazai tájak és azok élővilága

Az iskola és környezete

(Ebben az évben is a tanuló tapasztalatait használjuk fel az iskolától és a lakóhelytől kiindulva. Így a tanítási sorrend az iskola helyének függvénye lehet. Felszíni formák megfigyelése a környezetben, azok jelölése a térképen.)

Földrajzi tájékozódás a szabadban és a térképen

(Síkság, dombság, hegyek, hegységek, völgyek, medencék. Vízpartok, szigetek, félszigetek. Patakok, folyók, folyamrendszerek. A rájuk vonatkozó térképjelek. Kirándulások: tájékozódás terepen, a környezet földrajzi elemeinek felismerése, besorolása, feltérképezése.)

Különböző életterek élővilága

(A tanulóknak bemutathatók egy-két élettér jellemző szervezeteinek tipikus képviselői a növények, gerinctelenek és gerincesek közül. A fajok felismerését nem követi szükségszerűen rendszerezés. A különbségeket figyelik meg és azok természetes anyagi okait keresik. Vezérmotívum: szervezet illeszkedése a környezethez. Ezenközben a 3. osztályban tanult szemléletmódot alkalmazzák és fejlesztik tovább.)

Lakóhely

(Lakóhely-munkahely. Településtípusok: község, város, járás, megye, ország. Közlekedési hálózat, annak szemléltetése játékos tevékenységgel. Vezérmotívum: a településtípusok kapcsolata. A lakóhely időjárása, az időjárás, földrajzi adottságok és élővilág kölcsönhatásainak elemzése. Az időjárás, növényzet, gazdálkodás évi ritmusa. A településtípusok élővilága, az eltérések okai. Város: szobanövények, parkok. Falu: termesztett növények, háziállatok, növényápolás, állattartás problémái városban és falun; akváriumkészítés, kutyatartás. Gazdasági építmények, mezőgazdasági, ipari, közlekedési létesítmények funkcionális bemutatása. Ember hatása a környezetre. Környezetvédelem, természetvédelmi terület szerepe.)

Hazánk éghajlata

(Az éghajlatot kialakító tényezők. Az időjárás és az éghajlat elemei; a napsugárzás és a hőmérséklet változása, ennek következményei. Az uralkodó szélirányok és a csapadék megoszlása. Az éghajlat és hatása hazánk természetes növénytakarójának kialakulására és a mezőgazdasági termelésre.)

Hazánk hegységei, dombságai és élőviláguk

(A hegységek, dombságok keletkezése és pusztulása. A hőmérsékletváltozás; a folyók és a szél szerepe a felszíni formák kialakításában. A lánc- és a röghegységek jellegzetes formáinak összehasonlítása. A vulkanikus és mészkőhegységek hazánkban. Hegységeink gazdasági értékei, kiemelve a röghegységeket. Kőzetek, ásványok eredete. A talaj kialakulása és a talaj kialakításában résztvevő élőlények. A hegységeinken és dombságainkon kialakult erdők talaja és élővilága: a tölgyesek, a bükkösök és a fenyvesek, ezek aljnövényzete. Az erdőben élő néhány emlős, költöző és télen is itt maradó madár. Madárvédelem. Rovarok, pókok, csigák szervezete, életmódja. Védekezés a kártevő rovarok ellen. A felszín, az éghajlat és az élővilág fizikai-kémiai-biológiai kölcsönhatásai hegyvidékeinken és dombvidékeinken.)

Hazánk alacsony területei, folyóink, tavaink és azok élővilága

(Alföldjeink és kialakulásuk. A folyó, a szél felszínformáló munkája. Az alacsony területek gazdasági értékei; a mezőségi talaj; a talajvíz, ártérvíz, belvíz, gyógy- és hévvizek. Hazánk folyói, hazánk éghajlatának hatása folyóink vízjárására. A domborzat hatása a vízrajzra, árvízvédelem. A tavak keletkezése és pusztulása. Hazánk tavai. Vizek és vízpartok természetes élővilága, életmódja az élőlények egymásrautaltsága. A vizek szennyezettségének hatása az élővilágra.)

Földrajzi tájékozódás

(Szélesebb körű tájékozódás térkép, sőt földgömb alapján. Morfológia, élővilág, település, gazdaság kapcsolatának felismerése. Utazási terv készítése.)

Földrajz

2—2 óra az általános iskola 6.—8. osztályaiban

A földrajz feladata, hogy megismertesse a Földet, az azt alakító természeti és társadalmi-gazdasági folyamatokat, egyúttal kijelölje hazánk, népünk helyét a világban, bemutassa kapcsolatainkat. A történelemmel együtt a földrajz tehet legtöbbet a nemzetköziség helyes értelmezésének kialakításáért, a világ országainak és népeinek megismertetéséért, amely nélkül a zsugorodó világ mindennapos eseményeiben és történelmi folyamataiban nem lehet tájékozódni.

A haza földrajza a jelen és a felnövekvő nemzedék környezetével, életének és tevékenységének színterével foglalkozik, így különösen alkalmas a *hazaszeretet* elmélyítésére.

Az általános iskolai földrajzoktatás gerincét a leíró jellegű természeti földrajz képezi, de az anyagnak szükségszerűen bizonyos gazdasági földrajzi ismereteket is kell nyújtania. Az egységes Természetismeret tantárgy már a 4—5. osztályban jelentős földrajzi tájékozódást tartalmaz. Magyarország földrajzának tanítását a 8. osztályban az indokolja, hogy a legteljesebb tantárgyi koncentrációra itt nyílik alkalom, és az előző években tanított földrajzi ismereteknek a hazai térben való elmélyítésére, gyakorlati alkalmazására így adódik a legjobb lehetőség.

Tananyag

6. osztály: A Föld geográfiája

A Föld leírása

(Óceánok és kontinensek. Megismerésük rövid története. Éghajlati övek. Fokbeosztás. A földgömb használata.)

Afrika

(Földrajzi helyzetének, felszínének, éghajlatának, vízrajzának áttekintése. Növényzet, talaj, állatvilág. Népességének és a gazdasági élet sajátos vonásainak áttekintése. Négerek, arabok. Az európaiak szerepe. Politikai áttekintés. A független országok kialakulása. Kiemelt országok: Egyiptom, Zaire, Dél-afrikai Köztársaság. Afrika világgazdasági szerepe.)

Amerika

(Természeti, gazdasági és politikai áttekintése. Őslakói, az európaiak bevándorlása. A négerek. Kiemelt országok: USA, Kuba, Brazilia, Argentina.)

Ázsia

(Fekvése, összefüggése Európával. Természeti áttekintés. Nagytájak népességi és gazdasági áttekintése: Kelet, Dél, Nyugat. Kiemelt országok Kína, India, Japán, Vietnam.)

Ausztrália—Óceánia—Antarktisz

(Természeti viszonyok. Jelenlegi kutatások.)

A népesség eloszlása a Földön

(A Föld lakóinak megoszlása, elterjedése a kontinenseken. A népsűrűség tényezői. Nyelvi, etnikai megoszlás.)

7. osztály: Európa és Szovjetunió

Európa természetföldrajzi áttekintése, nagytájai
Észak-Európa természeti, gazdasági áttekintése
Nyugat-Európa természeti áttekintése
(Nagy-Britannia, Franciaország, NSZK, Benelux országok)

Dél-Európa természeti és gazdasági áttekintése

(Spanyolország, Portugália, Olaszország, Jugoszlávia, Bulgária)

Közép-Európa általános áttekintése

(Svájc, Ausztria, NDK, Lengyelország, Csehszlovákia, Románia)

Szovjetunió

(Az ország fekvése, területe, népessége, történelmi-politikai jelentősége. A nagytájak természeti leírása, ipari jelentősége. Közlekedés. Gazdasági kapcsolatok.)

8. osztály: Magyarország

Magyarország helyzete, földtörténeti kialakulása, határai
Magyarország természeti erőforrásainak, felszínének, éghajlatának vízrajzának, növényzetének, talajának áttekintése
Magyarország lakossága, nemzetiségek, településviszonyok

Magyarország helye a világgazdaságban

(A gazdaság fejlődése, gazdasági térszerkezet, ipari és mezőgazdasági tájak.)

Magyarország közlekedése
Magyarország bel- és külkereskedelme, KGST kapcsolatai, idegenforgalma
Magyarország települései és közigazgatása. Budapest
A nagy tájak komplex (természeti és gazdasági) bemutatása
Megyénk, városunk, járásunk földrajzának áttekintése

Fizika

2—2 óra az általános iskola 6—8. osztályaiban

A fizika feladata az általános iskolában az anyag néhány nagyon általános mozgástörvényének tapasztalati úton történő

felismertetése és a természeti jelenségeknek kvalitatív értelmezése, előrelátása e törvények alapján. A szükséges matematikai fogalmak és számolástechnika hiánya miatt a fizika kvantitatív megalapozása csak fokozatosan történhet, az teljesen csak a 8. osztályban ajánlható, még inkább a gimnáziumban valósítható meg.

Az általános iskolai Fizika komolyan építhet az 1—5. osztályban szereplő Természetismeret tapasztalati bevezetésére: az anyag objektív és megismerhető fogalmára, a mérhető tulajdonságokra és elemi méréstechnikára, az anyagi világban meglévő kölcsönhatásokra, a folyamatok időbeli lejátszódására, a helyzet és mozgás leírására, a vonatkoztatási rendszer fogalmára, a fizikai kölcsönhatások szerepére a természetben. Fizikus számára természetesnek a dinamika — energetika — elektromosság sorrend tűnhet, és méltó is meggondolásra. Számolnunk kell azonban azzal, hogy a biológia az anyagcsere tanításánál a 6. osztályban és a kémia a reakcióhő tanításánál a 7. osztályban igényli az energia, hőközlés, hőmérséklet fogalomkört. A kémia a 7. osztály közepén az ionok, elektronok tanításához határozottan igényli az elektromos töltés fogalmát. Ezért tervünkben a 6. osztályban az energia gondolatköre (a termodinamika I. főtétele) szerepel, az energia, energiaátadás és teljesítmény legegyszerűbb példáinak tárgyalásával kezd és eljut a kémiai energián, az égés problémákon keresztül a fényig, hiszen a fényben is energia terjed. (Ezt kiegészíti a fotoszintézisre, táplálkozásra, anyagcserére történő utalás.) Így az energia-fogalom jelentősen segíti az egységes természettudományos világkép kibontakozását. A 7. osztályban az elektromos kölcsönhatásokról lesz szó, a töltés és áram fogalmának bevezetésével. Végül a 8. osztályban a tehetetlenség bevezetése a dinamikai erőfogalom előkészítése a fizikai mozgástörvény mély, átfogó és hatékony voltának bemutatását teszi lehetővé. *A három év anyaga az energia, a töltés és a lendület megmaradása köré csoportosítható.*

Az egyes témakörök feldolgozása lehetőleg a tanulók saját tapasztalatainak felhasználásával, saját maguk által végzett kísérleteik, megfigyeléseik, önálló munkájuk alapján történjék, de legalábbis tanári demonstrációs kísérletek alapján. Eközben egyre több és nagyobb fokú absztrakció-alkotással kell a kvantitatív tárgyalásra áttérni. Az életkor sajátságait figyelembe véve fokozatosan törekedni kell a tananyag elsajátítása mellett a szabatos szóhasználat, jelölések, megállapodások ismeretére, a saját gondolatok pontos megfogalmazására, az összefüggések felismerésére, önálló következtetések elvégzésére, bizonyos definíciók tartalmának kifejtésére, fizikai törvények megfogalmazására, ezek értésére és alkalmazására. A tanulás magasabb szintű és egyre tudatosabb módszereit kell kialakítani, a játékosságtól fokozatos átmenettel el kell jutnunk a (kevésbé időigényes, de absztrakció- és gyakorlásigényesebb) szisztematikus munkához. A fizika korai kezdése, az energia, hőtan (termokémia, égés) és elektrosztatika oktatása lehetővé teszi, hogy erre a tárgyra az eddigieknél jobban támaszkodhasson a többi természettudományos tárgy (kémia, biológia). Viszont az atom- és anyagszerkezet tanítása az általános iskolában teljesen a kémia feladata.

Tananyag

6. osztály: Energia

Energiaátalakulások

(A kölcsönhatások elemzése energiaátadás és energiaátalakulás szempontjából. Lehetséges kiinduló értelmezés: Energia az, amivel a vizet lehet melegíteni. Az energia kalorimetrikus mérése. Súrlódás. A szilárd anyagok melegedése. Mozgási energia, helyzeti energia, belső energia. I. főtétel. Különböző energiaegységek átszámítása. Az energiamegmaradása zárt rendszerben.)

Munkavégzés

Mechanikai energiaátadás. Mechanikai energiaszállítás. (Futószalag, szél, vízáramlás, vízhullámok, hang. Néhány egyszerű gép. Teljesítmény, hatásfok.)

Hőközlés

(Hőtágulás, hőmérsékletmérés. Fajhő. Térfogati munka figyelembevétele kvalitativan. Olvadáshő, párolgáshő. A belső energia és hőtágulás egyszerű korpuszkuláris modellje. Hővezetés, hőáramlás. Az I. főtétel.)

Kémiai energiamérleg

(Égés. Gyúlási hőmérséklet, égéshő. Tüzelőanyagok. Gyors és lassú égés. Anyagcsere. Az energiamegmaradás érvénye kémiai folyamatokban. Aktiválási energia, reakcióhő fenomenológiai bevezetése.)

Fényjelenségek

(Fény, mint energiahordozó anyag. Egyenesvonalú terjedés, fénysebesség. Fényvisszaverődés, tükrök. Fénysebesség közegben, fénytörés, prizmák, lencsék. Egyszerű képalkotó eszközök. Gyakorlati képalkotók: fényképezőgép, szem, vetítőgép, lupe, mikroszkóp, távcső. Infravörös és ultraibolya sugárzás mint energiahordozó. Utalás fotoszintézis és fényképezés kémiai vonatkozásaira.)

7. osztály: Elektromágnesség

Elektrosztatika, elektromos erő

(Elektromos töltés, kölcsönhatás töltések között. Töltésmegmaradás. Elektromosan töltött testek kölcsönös helyzeti energiája. Elektromos feszültség.)

Elektromos áram, mágneses erő

(Egyenáram, ellenállás, áramkörök, feszültségforrások. Egyszerű kapcsolások. Ohm-törvény. Áram munkája. Hőhatás. Elektronvezetés fémekben, utalva kémiára. Áram mágneses tere. Mágnes és elektromágnes.)

Váltakozó áram, indukció

(A váltakozó áram fogalma, munkája, teljesítmény. Indukció. Generátor. Váltóáram. Transzformátor. Elektromos energia termelésének és szállításának problémái. Elektromos gépek. Távbeszélő.)

Elektromágneses sugárzás

(Az elektromos és mágneses mező, valamint elektromágneses hullám kvalitatív fogalma. Az antenna, rádió, televízió és a velük kapcsolatos gyakorlati problémák kvalitatív tárgyalása. Világítástechnikai alapismeretek. Az elektromágneses sugárzás fajainak vázlatos áttekintése.)

8. osztály: Dinamika

Helyzet, mozgás, vonatkoztatás

(A helyzet jellemzése koordinátákkal, vonatkoztatási rendszer. Időmérés alapgondolata. Sebesség. A helyzet és sebesség relativitásának átismétlése.)

Tehetetlenség

(Egyenes vonalú egyenletes mozgás. A tehetetlenség törvénye. Inerciarendszer alapgondolata. A lendület megmaradása ütközéskor. A tehetetlen tömeg.)

Erő

(Lendületátadás a kölcsönhatás következtében. Változó mozgás. Erő mint a lendületáramlás erősségét megszabó adat. Szabadesés. Az állandó gyorsulás. Körmozgás, rezgőmozgás, hullámmozgás, hanghullámok leírása és kvalitatív dinamikai magyarázata.)

Mechanikai energiaátalakulások

(Mozgási energia. Súly és rugó helyzeti energiája. A megmaradási törvények áttekintése.)

Szilárd testek egyensúlya

(Egyensúly. Forgatónyomaték. Egyszerű gépek.)

Folyadékok és gázok egyensúlya, áramlása

(A nyomás korpuszkuláris dinamikai modellje. Pascal törvénye. Hidrosztatikai nyomás, közlekedő edény, hajszálcső. Légnyomás. Arkhimédesz törvénye, úszás. Az áramlás sebessége, Bernoulli-törvény elemi bemutatása.)

Kémia

2—2 óra az általános iskola 7. és 8. osztályaiban

A kémia kiemelten kísérletes tantárgy az általános iskolai oktatásban is. Ennek megfelelően a javasolt tananyag a természetismeretben tanult empirikus kémiai ismeretekhez csatlakozik, kísérleti tapasztalatgyűjtéssel indul, felhasználja a tervszerűbb kísérletezés előnyeit. Meg kell ismerni a hétköznapi életben megfigyelhető kémiai jelenségeket, a kémiai ipar legfontosabb nyersanyagait, termékeit. (A technológiai folyamatok részleteit olvasmányok vagy apróbetűs részek tartalmazzák.)

A jelenségek értelmezésére áttérve az anyagszerkezeti ismeretek nem lehetnek egzaktak, de ne legyenek hibásak sem. Ezeknek az ismereteknek feltétlenül továbbfejlesztésre alkalmasnak kell lenniök. Az anyagszerkezeti ismeretek összeállításánál támaszkodni kell a fizikában megtanult fogalmakra és törvényekre.

A tananyagban a lexikális ismerethalmozással szemben az átfogó elvek, törvényszerűségek felismerésére és alkalmazására kell súlyt helyezni. A szerveskémia adjon segítséget a biológiai folyamatok jobb megértéséhez. Rá kell mutatni a kemizálás jelentőségére és problémáira, a környezetvédelem szempontjaira, egyes vegyszerek mérgező hatására.

Tananyag

7. osztály: Általános kémia

Az anyag tapasztalt megjelenési formái

(A külvilág anyagainak sokfélesége. A hétköznapi anyagok minőségi összetétele. Keverékek szétválasztása: szétválogatás, ülepítés, bepárlás, desztilláció, kromatográfia; sok látványos kísérlet a komponensek szétválasztására. Tiszta anyagok. Keverékek készítése tiszta anyagokból. Oldatok jellemző adatai. Tiszta anyagok sajátságainak megmaradása, illetve módosulása a keverékekben: gázelegyek, levegő, oldatok, ötvözetek. Tiszta anyagok további bontása: víz elektrolízise, higanyoxid hőbomlása stb. Elemek. Néhány elem sajátságainak bemutatása. Fémek, nem fémek. Vegyületek. Kémiai átalakulás, mint az alkotóelemek átrendeződése a vegyületekben. Vegyületek létrehozása elemekből: nátrium „égése" klórban, szén, magnézium, hidrogén oxidációja. Az égés. Vegyületek kvalitatív elemi összetétele egyszerű szénvegyületek példáján. Azonos elemösszetétel, különböző sajátságok. Kvantitatív elemösszetétel. Egyszerű és sokszoros súlyviszonyok törvénye. A daltoni atom- és molekulafogalom. Vegyérték. Az atomok kapcsolódási sorrendje a molekulában. Konstitúció, izoméria. Vegyjelek és képletek.)

Az anyag korpuszkuláris szerkezete

(A korpuszkuláris szerkezetre utaló tapasztalatok: oldott anyagok, gázok és gőzök diffuziója. Mólfogalom. Avogadro-szám. Atomtömeg és molekulatömeg.)

Az atomok szerkezetének ismertetése

(Az atomok szerkezete. Atommag; proton, neutron, rendszám, tömegszám. Elektronburok. Az elektron mint rendkívül könnyű töltésfelhő. Elektronállapotok és azok betöltődése. Atomtörzs és vegyértékhéj. A periódusos rendszer lényegének vázlatos ismertetése. Hasonló sajátságok, hasonló vegyértékhéj. Nemesgázok. Atomok elektronvonzó képessége. Ionizáció. Fémek és nemfémek. Pozitív és negatív jellemű elemek.)

A molekulák szerkezetének ismertetése

(Több mag és több elektron együttese. Atomok és molekulák. Kémiai kötés. Az előzőekben megismert egyszerű vegyületek molekulaszerkezetének ismertetése; egyszerű sajátságok értelmezése a molekulaszerkezet alapján. Molekulák, ionkristályok, fémek.)

A kémiai reakciók

(Molekulák atomjainak átcsoportosulása. Egyesülés, bomlás, oxidáció, redukció. Kémiai reakcióegyenletek. A tömegmegmaradás törvénye. A sztöchiometria alapjai. Egyszerű sztöchiometriai számítások. A reakciók sebessége. A hőmérséklet szerepe, lassú és gyors égés.)

8. osztály: Szerves és szervetlen kémia

Ipari és élettani fontosságú szerves vegyületek

(A szénvegyületek egyszerű összetétele és sokféle szerkezete. Szénváz és funkciós csoport nagyon egyszerű példákon. A csoportosítás elve. Szénhidrogének. Telített és telítetlen típusok. Földgáz és kőolaj. Olefinek polimerizációja, polietilén. Alkoholok: metil- és etilalkohol, glicerin: aldehidek; karbonsavak. Észterek, zsírok és olajok. Szappanok, mosószerek. Szénhidrátok: szőlőcukor, gyümölcscukor, répacukor, keményítő, cellulóz szerkezeti elve. Nitrogéntartalmú vegyületek: aminok, amidok; poliamidok, nylon. Aminosavak, peptidlánc, fehérjék, enzimek.

Vegyületek és elemek kölcsönhatása vízzel

(Nátrium-klorid oldása vízben, az oldat vezetőképességének vizsgálata, elektrolitos disszociáció. Megfordítható kémiai folyamatok, kémiai egyensúly. A víz disszociációja. Hidrogén-klorid kölcsönhatása vízzel. Ammónia oldása vízben. Sav és bázis fogalma. Nátrium-oxid, kalcium-oxid reakciója vízzel. Savak reakciója bázissal, sók fogalma. Sók hidrolízise. A kémiai reakciók típusainak áttekintése. Kémiai számítások.)

Ipari fontosságú szervetlen vegyületek

(Kéndioxid, kénessav. Kénsav, kénsavgyártás, a kénsav sói. A szén, a szén oxidjai, szénsav, a szénsav sói. Ammónia, salétromsav, a salétromsav sói, pétisó. A foszfor égése, foszforsav, a foszforsav sói, szuperfoszfát. Szilícium, szilícium-dioxid, kovasav, szilikátok. Nátrium-klorid elektrolízise, nátrium-hidroxid, sósavgyártás. Savak és bázisok összefoglalása, reakciójuk fémekkel. Bauxit, timföld, alumínium, alumínium ötvözetek. Vasgyártás, acélgyártás. A fémek néhány tulajdonsága, a fémek korrózió ja.)

Biológia

2—2—2 óra a 6. 7. és 8. osztályokban

A biológia tanítása az általános iskola minden osztályában megtalálható. Az 1—5. osztályokban mint a természetismeret integrált része, a 6—8. osztályokban mint önálló tantárgy. Az a tény, hogy a biológiai oktatás már az 1. osztálytól kezdve folyik, szükségessé teszi, hogy a biológia művelődési anyagát egységes ívnek tekintsük az első osztálytól a nyolcadik osztályig. Az egyes osztályokban különböző mélységben jelenik meg a biológiai ismeret. Ez szükségessé teszi, hogy már az 5. osztályban biológiaszakos (lehetőleg földrajz—biológia szakos) tanár oktassa a természetismeretet. Csak így lenne biztosított, hogy a feltételezett növénytani és állattani fajismerettel rendelkezzenek a tanulók a 6—8. osztályos biológiai oktatáshoz.

A 6. osztálytól kezdve önálló tantárgyként oktatott biológia a természettudomány többi tantárgyaival szoros,

koordinált kapcsolatban áll. E kapcsolat kölcsönös jellege szükségessé tette a fizika, a kémia és a földrajz művelődési anyagának figyelembevételét.

Alapvető követelménynek tekintettük továbbá azt a tényt, hogy iskolarendszerünkben az általános iskolát tanulók több mint 70 %-a a későbbi tanulmányok során biológiával nem foglalkozik. Ezért művelődési anyagunknak egyfelől nyitottnak, másfelől pedig egésznek kell lennie. Az adott életkori sajátságokat figyelembe véve tekintjük át az életet, mint az anyag mozgásformáját.

Az általános iskola biológia művelődési anyagának összeállításánál vezérlő elvnek az ökológiai és az evolúciós szemlélet megvalósítását tekintettük. A biológiai élettér, az élelemlánc, az élőlények életműködése és az élőlények egyedfeletti szintjei az ökológia szemléletét követik. Az evolúció függvényében tárgyaljuk a növény és állatvilág kialakulását, az ember kifejlődését, az organizációs rendszereket egészen az ökológiai rendszerig. Ez lehetővé teszi az élővilág egységének, az élő és élettelen természet elválaszthatatlan kapcsolatának, a struktúra és funkció összefüggésének, az evolúció legáltalánosabb törvényszerűségeinek megismerését. Így részese annak az igénynek, hogy a legáltalánosabb biológiai törvényszerűségek megismertetését kell biztosítani a természettudományos műveltség kialakításához.

Az egészséges életmód kialakításához az emberi szervezet felépítésének és működésének megismerése ismeretanyagot nyújt, amelynek tudatosulása az egészséges életmód kialakítását vonhatja maga után.

Ki kell alakítani az élővilághoz való etikus viszonyt. Tanítványainkat az élet, az élőlények tiszteletére kell nevelni.

Tananyag

6. osztály: Ökológia

Biológiai tér — Külső környezet

(Az élőlények illeszkedése a környezethez. A napfény hatása az élőlényekre. A víz és az élőlények kapcsolata. A talaj és az élőlények kapcsolata. A talaj kialakulása, összetétele, szerkezete, termékenysége és változása. A talaj védelme. A légkör és az élőlények kapcsolata. A légkör összetevői. A légkör jelentősége az élőlények elterjedésében. A légkör tisztaságának védelme.)

Anyag- és energia-átalakulás

(Energiafelszabadulás az élőlények életfolyamatai során: asszimiláció, disszimiláció; fotoszintézis, állati táplálkozás.)

Szervetlen anyagok körforgalma a természetben

(Az élő szervezetek közreműködése a szervetlen anyagok körforgalmában; a víz, az oxigén, a szén és a nitrogén körforgalma. A vizek védelme.)

Életközösségek

(Az életközösség. Termelő, fogyasztó és lebontó szervezetek. Az élelemlánc biztosítja az anyag- és energiaátalakulásokat. Az életközösségben szereplő fajok mennyiségi és minőségi viszonyai. Az életközösségek egyensúlya és annak megbomlása. További talajtani ismeretek. Humuszképződés. Természetes trágya, műtrágya.)

Alkalmazkodás

(Alkalmazkodás a külső környezet különleges feltételeihez. Idegen tájak élővilága. A természetes életközösségek egyensúlyának megbomlása az emberi gondatlanság következtében, vadrezervátumok.)

7. osztály: Élettan

Sejt

(Az élőlény legkisebb alaki és működési egysége a sejt. A sejt részei és azok működése. A sejtet alkotó anyagok. Baktériumok. A növényi és állati sejtek, azok életműködése.)

Szövetek, szervek

(A növényi és állati szövetek, mint a szerveződés sejtnél magasabb, nem önálló egységei. A szervek mint életfunkcióhoz alkalmazott szerveződési egységek.)

A növény életfunkciói

(Elsősorban zárvatermő növényekre vonatkozóan: A mag csírázása. A növények vízgazdálkodása és ásványi-anyagforgalma, asszimilációja, nitrogén-anyagcseréje, disszimilációja, anyagszállítása. A növények ingerlékenysége, mozgása, növekedése, szaporodása és egyedfejlődése.)

Az állat és ember életfunkciói

(Elsősorban gerincesekre vonatkozóan: Az állatok és az ember kültakarójának felépítése, táplálkozása, gázcseréje, anyagszállítása, kiválasztása, mozgása, ingerlékenysége. — Az idegműködés elemei, reflexek. Érzékelés. Vegyiszervezés, belső-elválasztású mirigyek rendszere. — Az állatok és az ember egyedfejlődése. Állatok viselkedése.)

Szaporodás

(Növény, állat, ember szaporodása. Szexuáletika biológiai alapjai. Ivadékgondozás.)

8. osztály: Evolúció

Az öröklődés

(Az öröklődés mint az élőlényekre jellemző tulajdonság. Sejtosztódás, kromoszómák. Mendel törvényei. Az öröklődés sejtes és molekuláris alapjai. A gén mint működési egység. Az örökletes tulajdonságok átadása. A kromoszómák mint a gének átvitelének eszközei. — A populáció. A géngyakoriság egyensúlya és megváltozási lehetőségei. A mutációk mint nem folyamatos, határozatlan irányú genetikai megváltozások. A változatok és az alfajok kialakulása. A környezetváltoztatás szelekciós hatása. A növény és állatnemesítés módszerei. — Az ember és az átöröklés.)

Az evolúció

(Az élet keletkezése. Az első élőlények. A növény és állatvilág fejlődéstörténete. Az általános iskolában tanult fajok rendszerezése származásuk és rokonságuk alapján, törzs, osztály, faj kategóriákkal. A növény- és állathatározókönyv használatával a környezetében előforduló élőlények besorolása. A jelenlegi élővilág mint rendszer, annak szerkezete, dinamikája, egyensúlyok feltételei.)

Az ember

(Az idegrendszer működése. A magasabb rendű idegtevékenység kifejlődése, az emlékezés, a tanulás, a tudat. Az ember kialakulása. Az emberfajták és elterjedésük. — Az ember és környezete. Az emberi alkalmazkodás sajátosságai. A modern ember mentál-higéniai problémái. A család. A család életének biológiai és pszichológiai problémái. Népesedési problémák. A népesedés szabályozása. A tömegben élő emberek problémái: közfogyasztás-élelmiszerellátás-élelmiszerhigiénia; járványok és megelőzésük; emberi magatartás és tömegesedés.)

20 ÉVES AZ EGYESÍTETT ATOMKUTATÓ INTÉZET

1976. március 26-án 20 éves az Egyesített Atomkutató Intézet, az európai és ázsiai szocialista országok első nemzetközi tudományos központja. 1956-ban Moszkvában ezen a napon írták alá az alapító országok kormányának meghatalmazott képviselői az új intézet szervezetéről szóló egyezményt.

A szovjet kormány, mint az EAI létrehozásának kezdeményezője, erre a célra átadta a Szovjetunió Tudományos Akadémiájának két tudományos kutató intézetét, amelyek Moszkva közelében, Dubnában vannak. A szovjet tudósok a Nukleáris Intézetben 1949-től nagyteljesítményű protongyorsítón, szinkrociklotronon végeztek kutatásokat, az Elektrofizikai Laboratóriumban pedig befejeződött a szinkrofazotron, az akkori legnagyobb gyorsító felépítése. Ezek az alapok lehetővé tették, hogy az új intézet nemzetközi tudóskollektívája azonnal megkezdhesse kísérleti munkáját a nagyenergiájú fizika területén.

Az atomfizikai kutatások további fejlesztése érdekében a moszkvai egyezménynek megfelelően az Intézetben megkezdték három új laboratórium létrehozását. Megszervezték az Elméleti Fizikai Laboratóriumot, amelyet elektronikus számítógépekkel is elláttak. A Magreakciók Laboratóriumában megkezdődött egy nehézion gyorsító ciklotron építése, a Neutronfizikai Laboratóriumban pedig egy gyorsneutronú impulzusreaktor építése. A ciklotront és a reaktort 1960-ban adták át. A fizikai uctatások kísérleti módszereinek fejlesztése két újabb aboratórium létrehozását tette szükségessé. A Számításkechnikai és Automatizálási Laboratórium 1966-ban, az Új Gyorsítási Módszerek Osztálya 1968-ban alakult meg.

Az Intézet 20 éves fejlődése alatt nagyon megerősödött. Hat laboratóriumában, amelyek közül nagyságuk és az ott folyó kutatómunka volumene alapján mindegyiket külön intézetnek is nevezhetünk, valamint a termelő részlegekben összesen több mint 6 ezer munkatárs dolgozik.

Ma az Egyesített Atomkutató Intézetet a világ egyik legnagyobb, vezető tudományos központjaként tartják számon. Azoknak a fontos kutatásoknak az eredményei, amelyeket az Intézet tudósai a modern tudomány széles területein, az elméleti fizika, az elemi részecskék fizikája, a mag- és neutronfizika, a gyorsítási technika és fizikai kutató berendezések kidolgozása terén végeztek, megalapozták az Intézet tekintélyét és általános elismerést váltottak ki.

Az Intézet tudományos sikereinek alapja a demokratikus elveken nyugvó szervezet és tevékenység, az egyedülálló kísérleti bázisok és a széles körű nemzetközi kapcsolatok, elsősorban az EAI tagországok nemzeti kutatóközpontjaival. A sikereket azonban természetesen az Intézet káderei határozzák meg: tehetséges, kiváló tudósok sora, tapasztalt mérnökök és technikusok, magasan kvalifikált szakmunkások. Ma az Intézet 900 tudományos munkatársa között 5 akadémikus, 8 a tudományos akadémia levelező tagja, 90 doktor és 380 kandidátus van.

Az EAI tudósai több, mint 50 monográfiát írtak, közülük néhányat sok országban kiadtak. Ezek a modern fizika aktuális kérdéseivel foglalkoznak. Tudományos folyóiratokban és konferenciák anyagaiban az Intézet munkatársai évente mintegy 1600 cikket publikálnak. A Szovjetunió Minisztertanácsa mellett működő Találmányi és Szabadalmi Állami Bizottságnál az EAI tudósainak 17 munkáját jegyezték be felfedezésként. Az EAI-nál 450 találmány van bejegyezve. Az Intézet munkatársai által elért tudományos eredmények egész sorát jutalmazták nemzeti díjjal vagy díszplakettel.

Az Intézet elméleti szakemberei alapvetően új gondolatokat és módszereket javasoltak, amelyek mind az EAI-ban, mind pedig sok más ország tudományos központjaiban további kutatásokra ösztönöztek. A részecskefizika terén kidolgozták a kvantumtérelmélet pontos matematikai leírását adó diszperziós relációkat, ez a módszer hatással volt a részecskefizika egészére, azon belül is különösen az erős kölcsönhatások elméletének fejlődésére. Az Intézetben kialakították a kvázipotenciál módszert a szóráselméletben és a kötött állapotok elméletében, ezenkívül jelentős helyet foglalt el a részecskeszimmetria kutatása is. Az elméletek alapelveivel kapcsolatos munkák közül a „Mikroszkópikus méretek geometriája" c. programot és az oksági elv kutatását kell kiemelni.

A kvantumtérelméletben és a szuperfolyékonyság elméletében kifejlesztett alapgondolatok és módszerek alapján kidolgozták az atommag félmikroszkopikus modelljét, amelynek alapján lehetővé vált az atom kvázirészeske és kollektív állapotainak, valamint ezek statikus és dinamikus jellemzőinek megértése. A modell alapján levont következtetéseket egy sor, Dubnában és más fizikai központokban dolgozó szakértő megerősítette.

Az elméleti szakemberek számos munkája közvetlenül összefügg az Intézet tudósainak kísérleti kutatásaival, amelyeket az EAI és más tudományos központok gyorsítóin és reaktorain végeznek.

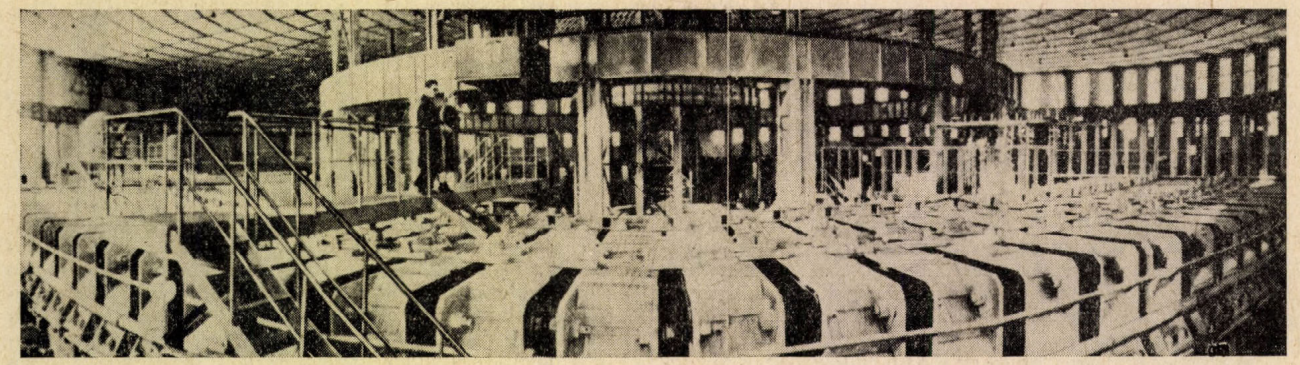
A szinkrofazotronon végzett kísérletek nagy részét a 10 milliárd elektronvolt alatti energiájú ritka részecskék előállítási folyamatának tanulmányozására fordítják. Az Intézet tudósai 1960-ban egy új részecskét fedeztek ell, az antiszigma — mínusz — hiperont. A rezonancia állapotok széles körű kutatása során egy sor új rezonanciát fedeztek fel, emellett tanulmányozták a már előzőleg felfedezettek sajátosságait. A rezonanciák elektromágneses tulajdonságainak tanulmányozása érdekes eredményeket hozott, ilyen pl. annak a felfedezése, hogy a φ mezon elektron-pozitron párokra bomlik.

Az elemi részecskék rugalmas és rugalmatlan szórással kapcsolatos sokéves kísérletek fontos adatokat szolgáltattak a részecskék szerkezetére vonatkozóan, lehetővé tették a modern elmélet alapvető következtetéseinek felülvizsgálását. A gyenge kölcsönhatás elméletének felülvizsgálásában nagy jelentőségük van a semleges kaon bomlási sajátosságaival kapcsolatos kutatások eredményeinek.

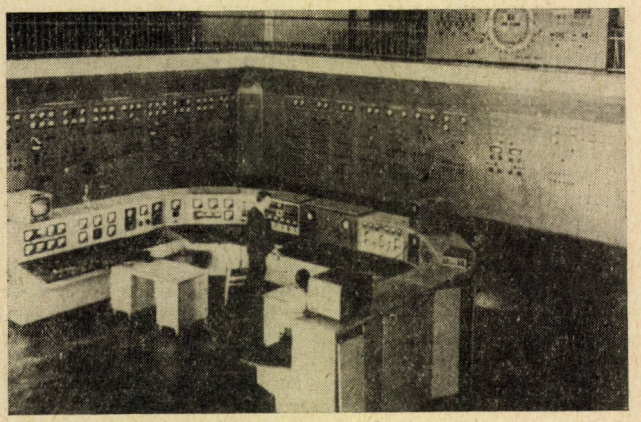
Az utóbbi években a szinkrofazotronon végzett munkákkal egy új tudományos irányzat fejlődik ki, a relativisztikus magfizika. Ezáltal lehetővé válik nagy energiájú atommagok ütközésének tanulmányozása.



1956 március 26.-án alapították az Egyesített Atomkutató Intézetet.



Az Intézet legnagyobb gyorsítója, az 1957-ben üzembehelyezett szinkrofazotron. A felgyorsított protonok energiája 10 milliárd elektronvolt (GeV), a deuteronok energiája 11 GeV, az alfa-részecskéké 22 GeV.



A szinkrofazotron vezérlőberendezése.

A szinkrociklotronon 680 MeV energiaszint alatt végzett nukleon-szóródási kutatások fontos információkat szolgáltattak az atommag nukleáris erőiről. Ezen erők töltésfüggetlenségének törvényét a pion és a nukleon kölcsönhatásának vizsgálatával sikerült megerősíteni. Kísérleti úton bebizonyosodott az oksági elv helyessége és meg lett határozva a pion és nukleon csatolási állandója.

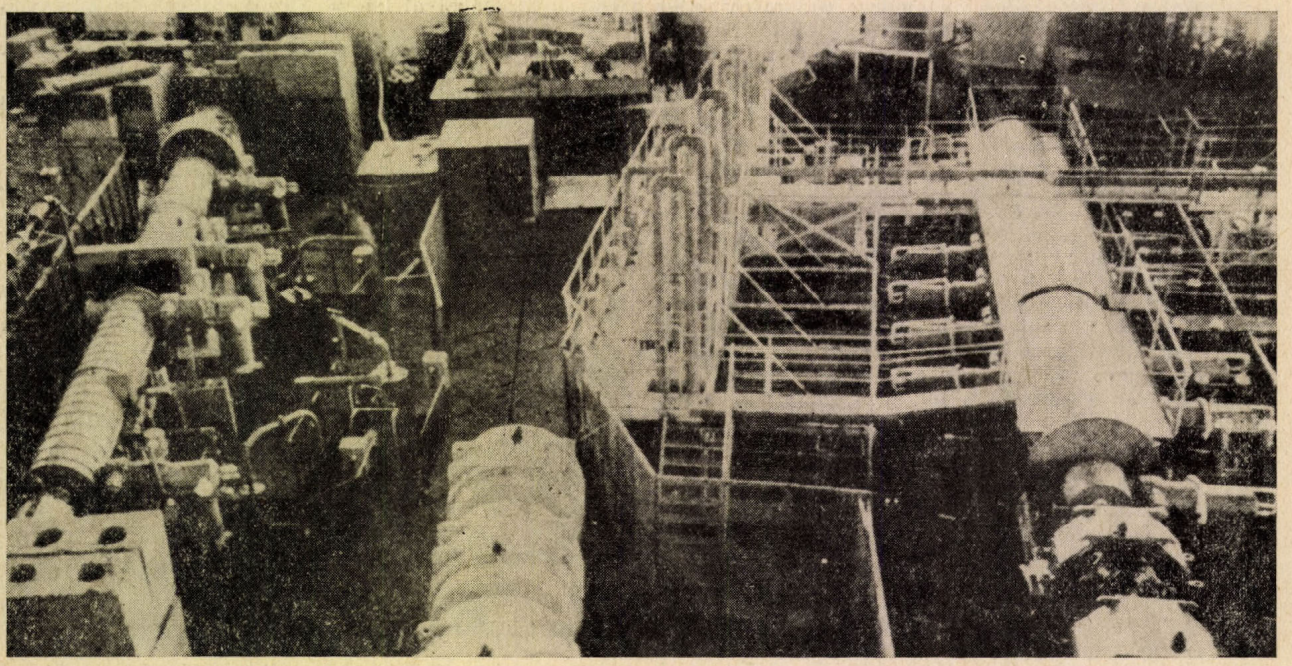
A mezonok jelenlétében lezajló ritka folyamatok kutatása megerősítette a gyenge kölcsönhatások univerzális elméletének következtetéseit. Az Intézet tudósai felfedezték a pionok béta-bomlását. Kísérletekben, amelyek során müonok befogását észlelték hélium 3-ban, müon-neutrinóktól visszalökött atommagokat figyeltek meg, s ezáltal beigazolódott a müon-elektron szimmetria.

Jelentős munkák folynak a mezoatomokkal kapcsolatban, köztük a hidrogén és deutérium μ-atomjainak szóródásával, a hidrogén magreakcióinak μ-katalizisével, stb. kapcsolatban. Sikeresen fejlődnek a mezokémiai kutatások.

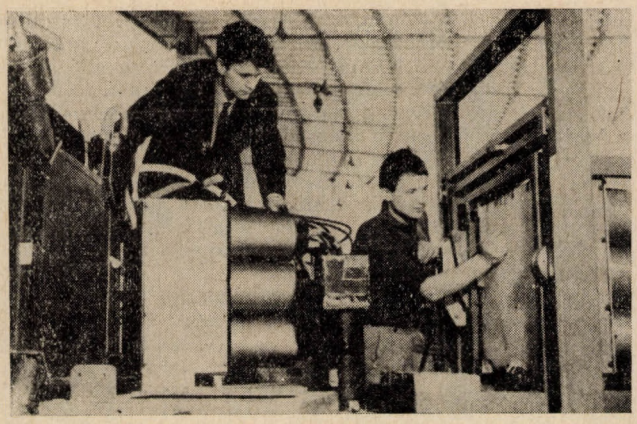
Gyakorlatilag már 20 éve folyik a szinkrociklotron target-lemezének besugárzásakor keletkező izotópok magspektroszkopikus kutatása. A kutatások során az EAI fizikusai száznál több új rádióaktív izotópot fedeztek fel.

Az Intézet tudósainak azon törekvése, hogy kiszélesítik kutatási területüket, valamint a kísérleti fizikusoknak a dubnai gyorsítókon szerzett nagy tapasztalatai révén lehetőség nyílt az EAI és néhány más fizikai kutatóközpont közötti együttműködés fejlesztésére és ezen központok gyorsítóin további kísérletek végzésére.

Az EAI tudósai széles körű kutatási programot végeznek a szerpuhovi Nagyenergiájú Fizikai Intézet gyorsító-



Szinkronfazotron szeparált pion és antiproton nyalábjai



Cserenkovszámláló és tartozéka.

ján, amely a Szovjetúnió legnagyobb gyorsítója (a protonenergia 76 GeV). A Dubnában kidolgozott, és a szinkrofazotronon végzett kísérletek során felhasznált eredeti módszerek segítségével a szerpuhovi gyorsítón protonok és deuteronok rugalmas bombázásával kapcsolatban folynak kutatások. A gyorsítón üzemel a kétméteres propán buborékkamra, valamint a „Ludmilla" elnevezésű kétméteres folyékony hidrogénkamra. Ezenkívül kísérletek folynak a Dubnában kialakított két hatalmas berendezés, a film nélküli szikrakamra-spektrométer és az ötméteres mágneses szikrakamra-spektrométer segítségével is. Az Intézet tudósai egy sor kutatómunkát végeztek és új lépést tettek az antimagok kutatása terén, kísérleti úton kimutatták az antitricium magját.

A Jereváni Fizikai Intézet 6 GeV-os elektrongyorsítóján az EAI tudósai elektronok nagyon kisszögű szóródását vizsgálták protonokon és deuteronokon. A kísérletek során közvetlenül meghatározták a proton és a deutron sugarát.

A hatalmas, 400 GeV energiájú protongyorsító átadása után (Batavia, USA) az első feladatok egyike dubnai és bataviai fizikusok közös kísérlete volt: protonok protonnal, majd deutronnal történő kisszögű szórása. A kísérletek a Dubnában kialakított „sugaras céllemez" felhasználásával folytak, ezeket később a szerpuhovi gyorsítón végzett kísérletek folyamán használták fel. A szerpuhovi kísérletek eredményeivel együtt ezek fontos adatokat szolgáltattak a nukleon szerkezetéről és a protonok kölcsönhatásakor fellépő nukleáris erőkről széles energiatartományban, egészen 400 GeV-ig.

Az EAI tudósai folytatják kutatásaikat a szerpuhovi, jereváni és bataviai gyorsítókon.

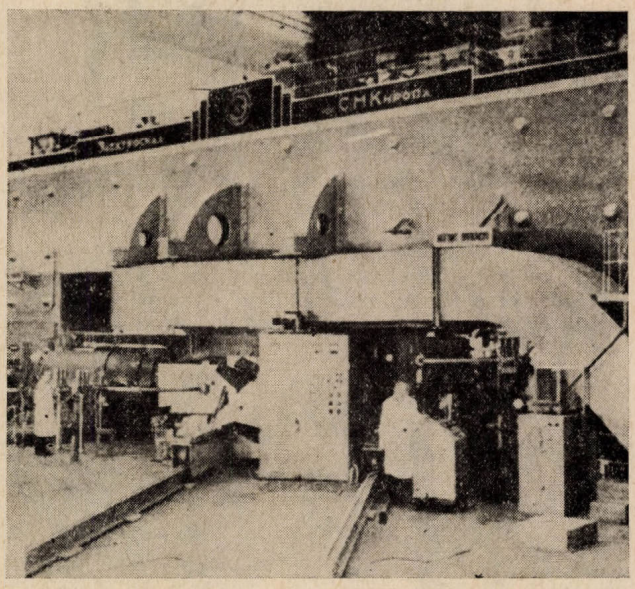
Az Intézet 3 méteres ciklotronja az elemek széles tartományában biztosítja a nagy intenzitású ionnyalábok gyorsítását, a bórtól a cinkig. A ciklotronnal és az EAI U—200 típusú kétméteres izokron ciklotronjával még nehezebb ionokat is felgyorsítottak, egészen a xenonig. Ez utóbbi energiája eléri az 1000 MeV-ot, míg egy nukleoné 8 MeV körül van.

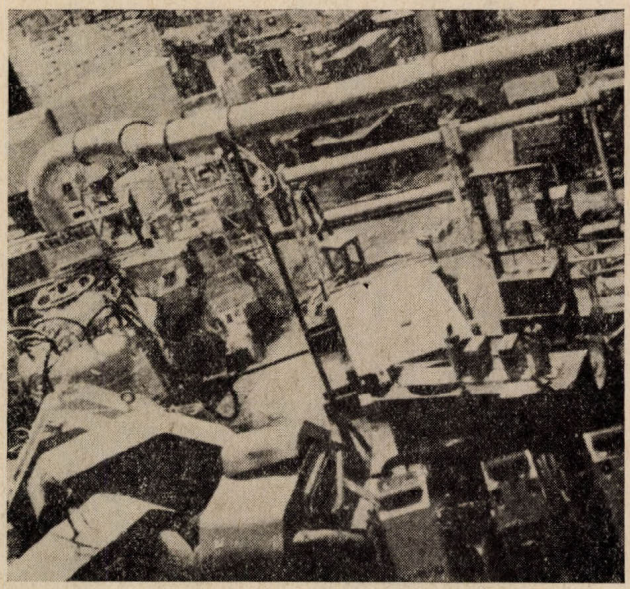
A nehézionok által kiváltott nukleáris reakciókban az Intézet tudósai szintetizálták a legnehezebb elemek (102, 103, 104, 105 és 106-os) különböző izotópjait. Kísérletek folynak még nehezebb elemek szintetizálására. A rövidéletű transzuránelemek kémiai sajátosságainak vizsgálatához a Dubnában kidolgozott gázkromatográfiai eljárást alkalmazzák. A kutatások egy része arra irányul, hogy a természetben olyan szupernehéz elemeket találjanak, amelyek atomszáma a 114—126 közötti tartományba esik.

A nehézionokkal folytatott sokéves kísérletezés az EAI tudósait új fizikai felfedezésekhez vezették. Ilyen pl. az atommag rendkívül rövid idő alatti osztódása az izomer állapotból, vagy az atommag rádióaktív bomlásának új formája, (proton radioaktivitás) a lassú protonok emissziója. A nehézionok gerjesztési reakcióiban a nagy neutronfelesleggel rendelkező könnyű elemeknek több mint 30 új izotópját szintetizálták.

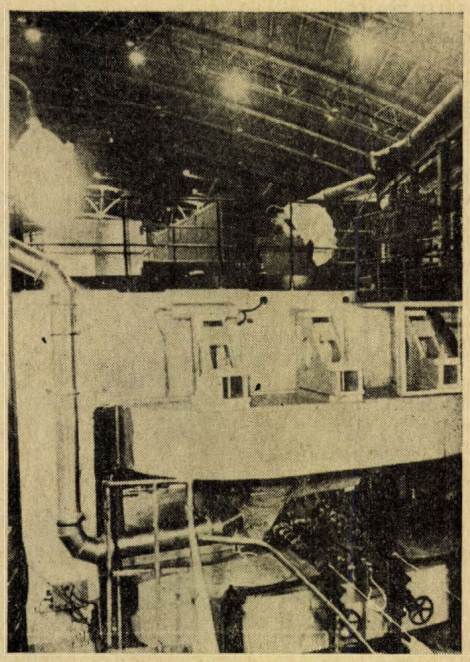
Az IBR-30 típusú gyorsneutron impulzusreaktor a periodikusan ismétlődő nagyon rövid és nagy teljesítményű neutron impulzusok egyedülálló forrása. E részecskék repülési ideje jól használható parameter a fizikai kísérleteknél. A spektrométeres kutatások gazdag információt szolgáltattak az atommagok neutron-rezonanciáiról, különösen ezen állapotok hátteréről és sugárzási szélességéről. Az Intézetben előállítottak 10 keV energiájú polarizált neutronnyalábot, ami lehetővé tette polarizált neutronok és a céltárgy polarizált atommagjai között fellépő kölcsönhatás vizsgálatát. Eredeti módszer segítségével mérik az erősen gerjesztett állapotú atommagok mágneses nyomatékát, fejlődnek az atommag neutron-rezonanciának alfa-bomlásával és a neutron-rezonanciák bomlásánál észlelt gamma-sugarakkal kapcsolatos kutatások.

Az Intézet tudósai kísérleteket végeztek ultrahideg neutronok zárt térben történő tárolására vonatkozólag. A Dubnában kifejlesztett módszer szerinti neutronnyalábok segítségével folyik a szilárd testek és folyadékok dinamikájának kutatása.





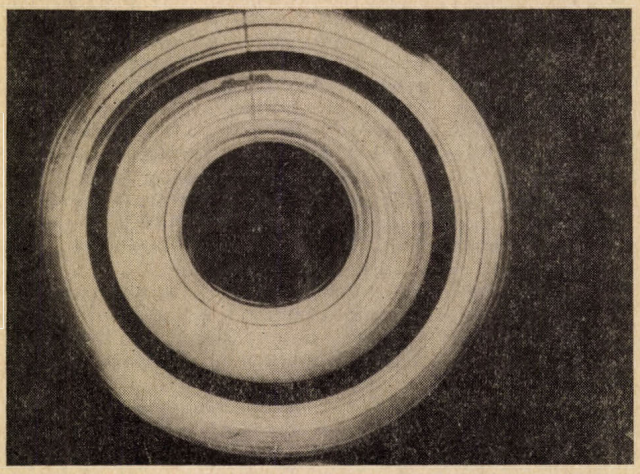
Az első dubnai gyorsító, a szinkrociklotron. 1949-ben helyezték üzembe. A felgyorsított protonok energiája 680 MeV. A kísérletek során a neutronok, pionok és müonok szekunder nyalábjait is felhasználják.



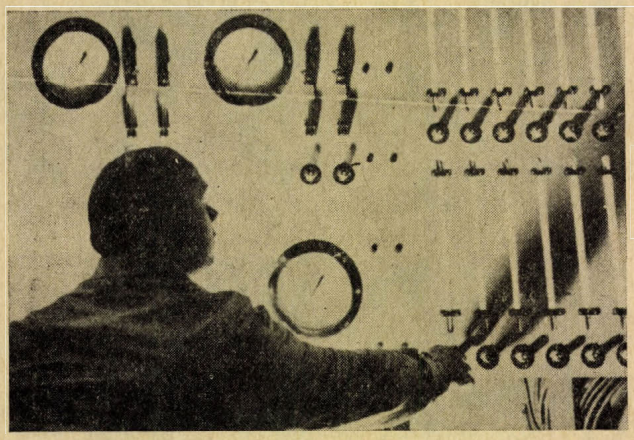
Propánbuborék-kamra, amely a 70 GeV-es gyorsító pion nyalábjában üzemel.

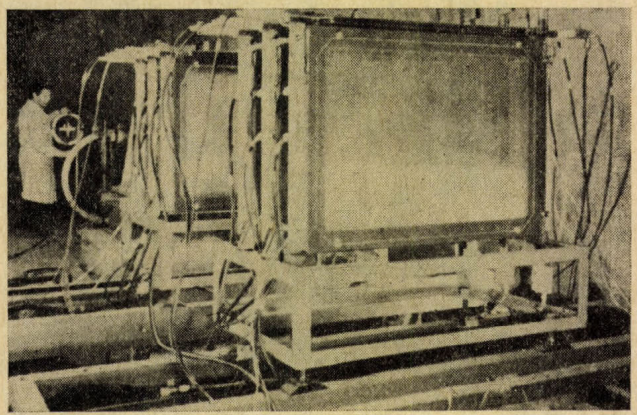
Az Intézetben egy több gépből álló számítógép-komplexum működik, amelyhez jelenleg mintegy 60, különböző kategóriájú elektronikus számítógép tartozik. Az EAI számítógép központjának alapja két nagy teljesítményű elektronikus számítógép, ezek összkapacitása kb. 3 millió művelet másodpercenként. A központ összekötő vonalakkal csatlakozik a laboratóriumok mérőközpontjaihoz, amelyek közép- és kis kategóriájú számítógépek. Az Intézet számítógép hálózata rendkívül sokrétű feladatok elvégzését teszi lehetővé. Biztosítja kísérleti adatok feldolgozását és elemzését, a fizikai berendezések és gyorsítók vezérlését és ellenőrzését, bonyolult matematikai feladatok numerikus megoldását, stb. A sikeres munkát a nagy számítógép programkönyvtár is elősegíti. Évről évre egyre nagyobb szerep jut a különböző display típusoknak, (ember-gép kapcsolat).

Az a nagy mennyiségű információ, amit a fizikusok a nagy buborékkamrákkal szereztek, nagy teljesítményű automatikus mérőberendezések létrehozását tette szükségessé. Most a kamerák által készített felvételek feldolgozása „futó sugaras" letapogató automatával, spirálmérővel és elektronsugár-csöves automata segítségével történik. Ezeken kívül 15 félautomatából és ellenőrző asztalból álló rendszert is alkalmaznak. Az ismertetett rendszerek mind elektronikus számítógéphez csatlakoznak.

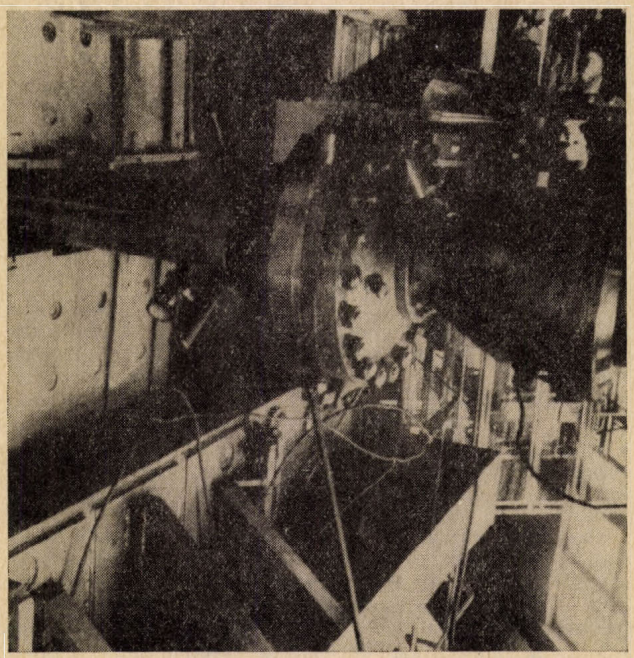


Mezonbomlásra szolgáló szcintillációs spektometer mágneses mezőben.

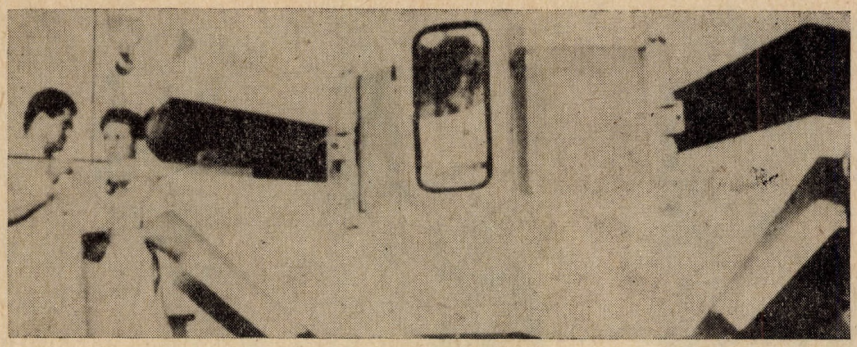




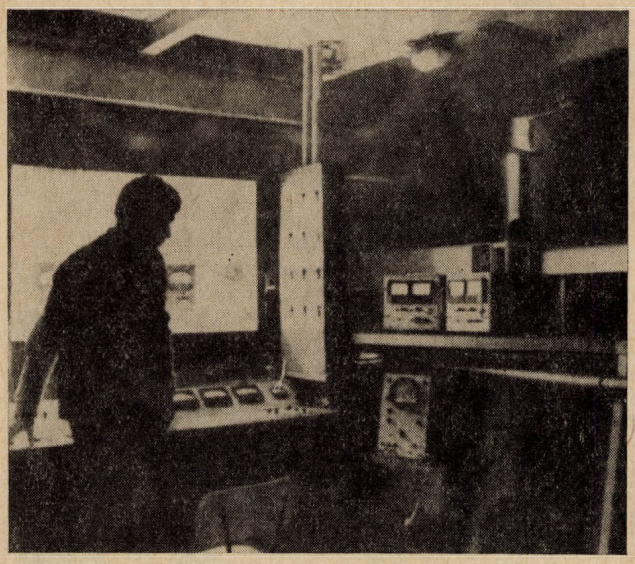
Többnyomú magnetostrikciós proporcionális kemra rendszer, számítógéppel összekötve K° mezon kutatások céljára



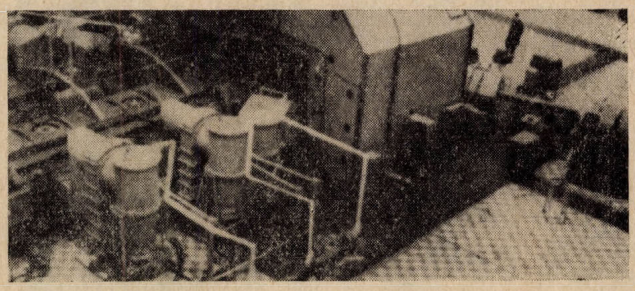
1 méteres propánbuborékkamra a mezonkutatás céljára



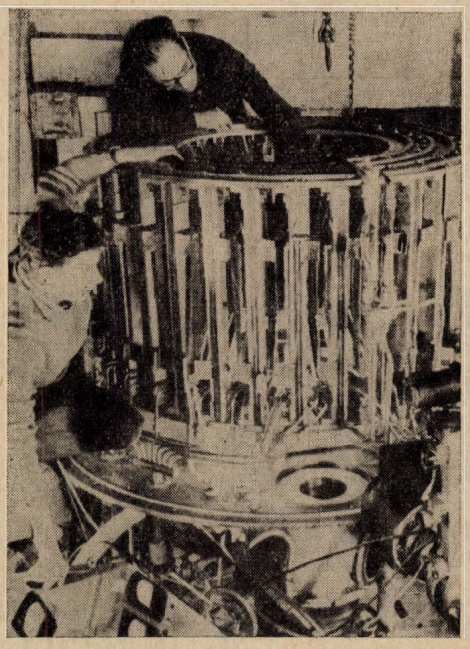
Precíziós mágneses α spektográf



Elektromágneses tömegszeparator



Az Intézetben működik a legnagyobb teljesítményű soktöltésű iongyorsító, az U-300-as ciklotron. 1960-ban helyezték üzembe. A szén-12-től a cink-66-ig terjedő elemek ionjait gyorsítják benne. (A nukleon energia kb. 10 MeV.)



Toroid bétaspektrométer

Az Intézetben folyó munkák közül sok a már létező gyorsítók tökéletesítésével, illetve új gyorsítási technika kifejlesztésével kapcsolatos. Így az első dubnai gyorsítót, egy szinkrociklotront már több alkalommal korszerűsítették. Megnövelték a nyaláb intenzitását, javult a nagyfrekvenciás rendszer, a széthúzó rendszer és a sugárnyalábok kivezetései, stb. Most rekonstrukció előtt áll: alapjain egy nagypontosságú fazotron kialakítását tervezik.

A szinkrofazotronon létrehozták a felgyorsított protonok lassú kivezetésének rendszerét, ez a rendszer a nyaláb csaknem száz százalékának kivezetését biztosítja.

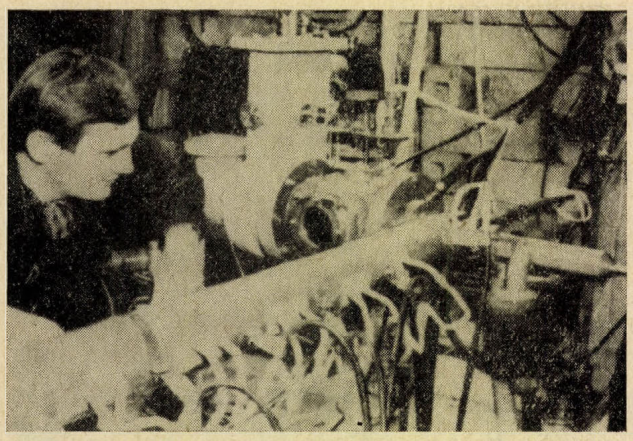
A szinkrofazotronon új injektort alakítottak ki, egy lineáris gyorsítót. A szinkrofazotronban deuteronokat és alfarészecskéket gyorsítanak. Az EAI szakemberei most egy új relativisztikus kriogén maggyorsító, a „nuklotron" tervein dolgoznak.

Az Intézetben fejlődik a nehézionok gyorsításának technikája. A hárommétereres klasszikus ciklotron után Dubnában felépült a kétméteres magas szintű mágneses mezőjű izokron ciklotron. Most folyik egy új nagy teljesítményű, 4 méteres ciklotron felállítása.

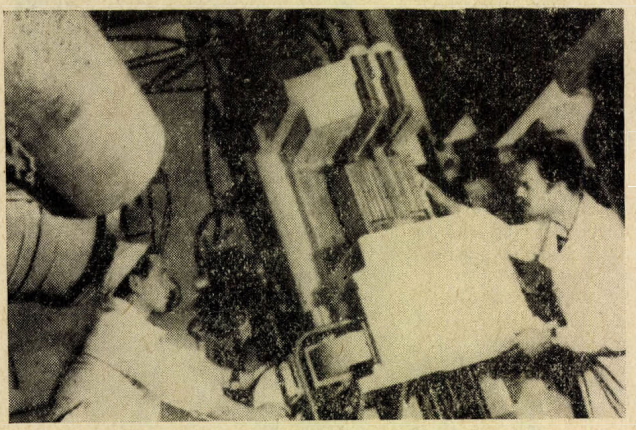
Az EAI tudósainak sok kutatása kapcsolatos az időben változó mágneses térrel rendelkező gyorsító kidolgozásával. Rengeteg elméleti munkát végeztek ezen a téren. Felépült az első spirális szerkezetű mezővel rendelkező izokron ciklotron és kísérleti kutatások folynak az Intézetben létrehozott erős fókuszálású elektrongyűrűs ciklotronon is. Itt dolgozták ki egy mezongyár, a nagypontosságú fazotron tervezetét. Folyik egy relativisztikus ciklotron, a „szupercikloton" tervezése.

Az Intézetben egy alapvetően új, módszert javasoltak a töltött részecskék kollektív gyorsítására. A tudósok kidolgozták a módszer elméleti alapjait, most a kísérletek folynak. A munka első lépcsője egy nehézion gyorsító felszerelése. Ezzel kapcsolatban létrehoztak egy nagy teljesítményű lineáris elektrongyorsítót, néhány fajta adhezátort gyűrűs csomók képzésére, nagy áramú kommutátorokat, gyűrűdiagnosztáló berendezést, stb. Az elektronion gyűrűk gyorsítására felszereltek egy kriogén rezonátorból és szupravezető mágnesből álló rendszert, a „kolcetron"-t.

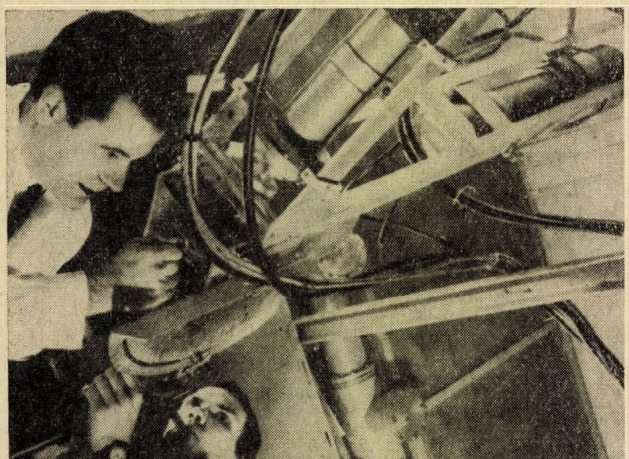
Az Egyesült Atomkutató Intézet valamennyi tevékenységének alapja a nemzetközi tudományos együttműködés. Az Intézet 20 éves fejlődése során ez az együttműködés



Gázkromatográfia rövid élettartamú magreakciók vizsgálatához

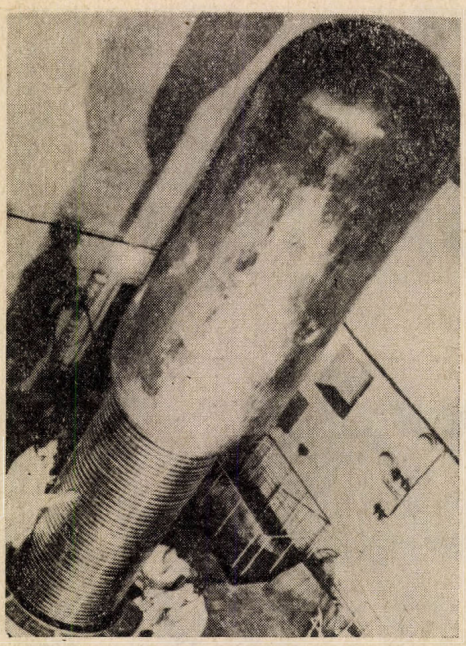


Az Intézetben új kutató komplexum épül az IBR-30 típusú nagy teljesítményű impulzusreaktor számára. Ez a reaktor a Dubnában működő periodikus működésű impulzusreaktorok harmadik nemzedékéhez tartozik. A képen szerelik az új reaktor aktív zónájának burkolatát.

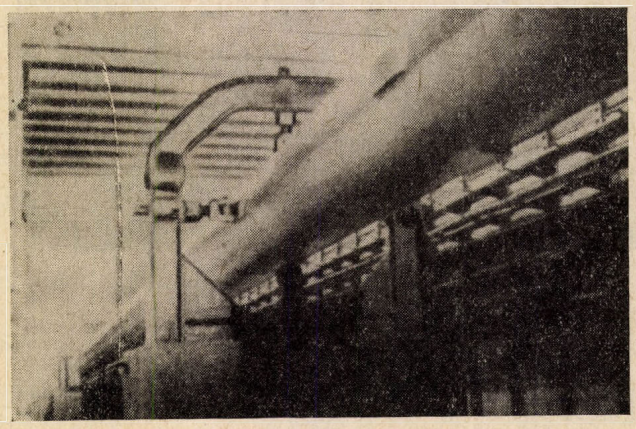


EG5 elektrosztatikus generator, protonok, deutronok, He^3-as ionok gyorsítására 5 MeV-ig

különböző formákat öltött és jelentős mértékben kiszélesedett. Ma az Intézetben gyakorlatilag minden fő tudományos vonalon nemzetközi tudós- és mérnökcsoportok dolgoznak. Minden évben szélesedik a munka mennyisége és tematikája, amelyet az Intézet a tagországok nemzeti laboratóriumaival együttesen végez. Ilyen kooperációban



Gyors neutron spektrométer

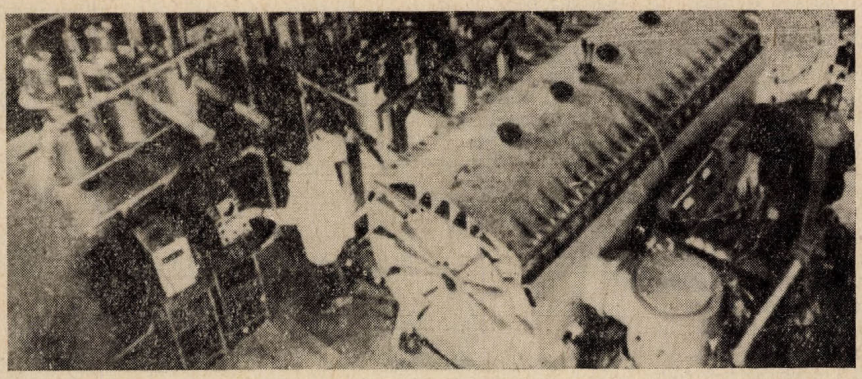


Neutronfizikai laboratórium (1000 m.-es neutron csatorna)

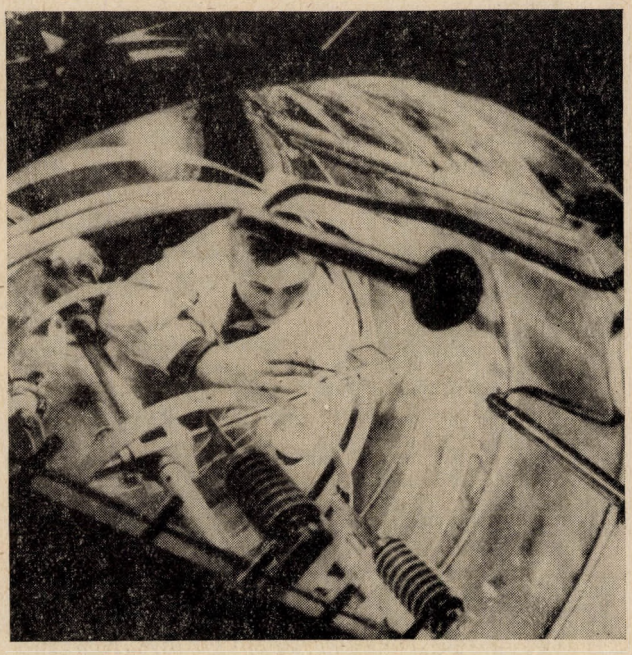
folynak elméleti és kísérleti kutatások, fizikai és rádióelektronikai berendezéseket dolgoznak ki és gyártanak, stb. Jelenleg az Intézet tervének 170 témájában folynak közös munkák.

Az EAI tudósai az Intézet tagországainak fizikusaival közösen végeznek kutatásokat ezen országok laboratóriumainak gyorsítóin és reaktorain. A legszélesebb kísérleti programot a Szovjetunió fizikai központjainak berendezésein valósítják meg. A munkák fejlődéséhez nagymértékben hozzájárult az EAI és a Szovjet Atomenergia Bizottság között 1970-ben kötött Műszaki-tudományos Együttműködési Egyezmény. A végzett munkák közül néhányat már megemlítettünk.

Az Intézet fennállásának első évei óta fejlődik az az együttműködés, amelyet később „távfizikának" neveztek el. A dubnai gyorsítókon nyert rádioaktív preparátumokat különböző országok laboratóriumaiba szállítják, hogy ott azokon tudományos kutatásokat végezzenek. Szélesedik a laboratóriumok közötti együttműködés a nagy mennyiségű kísérleti anyag egyidejű feldolgozása terén; az EAI-ból gyorsítókon besugárzott fotolemezeket, buborékkamerával készített felvételeket, magnetofon szalagon tárolt mérési eredményeket küldenek szét más laboratóriumokba. A kísérleti adatok ilyen közös feldolgozása meggyorsítja a kísérlet végleges eredményének meghatározását. Bonyolultabb fizikai kutatásokba olyan laboratóriu-



Új típusú iongyorsító



Az Egyesült Atomkutató Intézetben új, módszert javasoltak a töltött részecskék kollektív gyorsítására. A tudósok kísérletet folytatnak a kollektív gyorsító modelljén. A képen: a SILUND lineáris elektrongyorsító és az adhezátor (adiabatikus töltött toroid generátor).

mok tudósait is bevonják, amelyek nem rendelkeznek gyorsítókkal, de részt vesznek a munkában egyetemi hallgatók és munkatársak is.

Az Intézet nemcsak az EAI tagországainak intézeteivel, hanem más országok és nemzetközi szervezetek intézeteivel is fejleszti tudományos kapcsolatait. Az Intézet sikeres együttműködést folytat az Európai Atomkutató Szervezettel (CERN), a Niels Bohr Intézettel, a franciaországi Saclay és Orsay központtal, valamint a trieszti Nemzetközi Elméleti Központtal. Az EAI tudósai amerikai fizikusokkal együtt kísérleteket végeztek az szerpuhovi és bataviai gyorsítón.

Az Intézet tudósai valamennyi nagy nemzetközi tudományos konferencián részt vesznek, ott vannak sok országos tanácskozáson és szimpozionon is. Az Intézet évről évre mintegy 40 tudományos módszertani és tudományos szervező tanácskozást. konferenciát és tanfolyamot szervez. Különböző országokból évente ezernél több szakember érkezik Dubnába, hogy a közös munkában, konzultációkon és tanácskozásokon részt vegyen. Az EAI munkatársai közül évente 500-nál többen utaznak ugyanezzel a céllal az Intézet tagországaiba és más országokba.

Az Intézet 20 éves tevékenységének eredményeit megvonva meg kell említeni, hogy az Intézet érdemei nem csupán a kiváló tudományos eredmények és műszaki vívmányok. Az Intézet a tagországok tudósainak és mérnökeinek egyedülálló iskolájává vált, a modern fizika számos területén. A dubnai iskolán nevelkedett szakemberek közül ma már sokan tudományos csoportok, osztályok, intézetek vezetői, professzorok vagy a tudományos akadémia tagjai. Az EAI-nak a tagországok fizikai kutatási szintjének fejlesztésében betöltött meghatározó szerepét jól mutatja az a tény, hogy az egyes országok központjainak tudósai az EAI gyakorlatilag összes alapvető munkájában részt vesznek. Most az Intézet munkatársaival közösen kísérleteket folytatnak a gyorsítókon és a reaktorokon, saját intézeteikben fizikai berendezéseket dolgoznak ki dubnai kísérletek céljára, hatalmas kísérleti berendezések kialakításában vesznek részt, ezenkívül az EAI szakértőivel együtt új gyorsítók létrehozásán dolgoznak.

Az Egyesült Atomkutató Intézet ötödik ötéves tervét kezdi meg. Nemrég fogadták el az Intézet új fejlesztési tervét, amelynek alapja egy modern, első osztályú kísérleti bázis létrehozása és a tudományos kutatások fejlesztése a modern fizika időszerű területein. Ez a terv jól tükrözi, milyen nagy jelentőséget tulajdonítanak a szocialista országok kormányai az Intézet tevékenységének és hogy milyen figyelmet szentelnek az Intézetnek.

ESEMÉNYEK

KISS JÓZSEF

1933—1975

Dr. Kiss József docens, a fizikai tudományok kandidátusa, a Budapesti Műszaki Egyetem Fizikai Intézetének igazgatóhelyettese, a Kísérleti Fizika Tanszék és az MTA Kristálynövekedési Tanszék Kutatócsoport vezetője 1975. november 17-én súlyos betegség következtében, rövid szenvedés után elhunyt.

1933-ban született Budapesten. Középiskoláit Salgótarjánban és Balassagyarmaton végezte. Az Eötvös Loránd Tudományegyetemen 1957-ben szerzett fizikus oklevelet. Ebben az évben került Gyulai Zoltán akadémikus kutatócsoportjába, a BME Kísérleti Fizikai Tanszékére tudományos kutatóként.

Első tudományos témája: a színcentrumok vizsgálata alkalihalogenid kristályokban. Kimutatta, hogy a plasztikus deformáció nemcsak az egyes, már meglevő abszorpciós sávok erősségét növeli meg, hanem az ultraibolya tartományban új sávok létrejöttéhez is vezet. Rendkívül gyümölcsöző kutatásba kezdett, amikor érdeklődése az ionkristályok plasztikus deformációját kísérő elektromos jelenségek felé fordult. Tudjuk, hogy az alkalihalogenid kristályok plasztikus deformációja során egyrészt a kristályok elektromos vezetőképessége ugrásszerűen megnő (Gyulay-Hartly effektus), másrészt a kristályok felületén elektromos töltés lép fel külső elektromos tér alkalmazása nélkül is (Sztyepanov effektus). A nemzetközi irodalomban sok munka jelent meg a fenti effektusokkal kapcsolatban, azonban ezek között igen sok ellentmondás volt található.

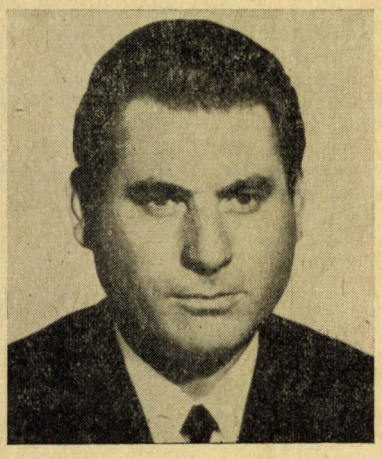
Kiss József rámutatott, hogy az eltérő eredmények oka abban kereshető, hogy az egyes méréseknél használt minták szennyezéstartalma, valamint a plasztikus deformáció folyamata különböző volt. Méréseit (Jeszenszky Bélával közösen) a Zeitschrift für Physik-ben közölte 1962-ben. Kandidátusi értekezésében, melyet a moszkvai Lomonoszov Egyetemen 1966-ban védett meg, sikerült a két effektus modern értelmezését is megadnia. A témához később sem lett hűtlen. Néhány hónappal halála előtt a Szilárdtestfizikai Komplex Bizottság ülésén tartott előadást a vonalhibák ponthibakeltéséről, alkalihalogenid kristályokban.

Mindig érdeklődéssel fordult az ipari munkák felé. Résztvett az infravörös sugárzást átengedő NaCl-ablakok készítésében, melyeket gázkromatográfokhoz használtak fel. Egyik vállalatunk részére alkalihalogenid egykristály-növesztő technológiát adott át. Ipari célokra $NaNO_3$ kristályokat növesztett.

Ő vezette a ferroelektromos kristályok oldatból történő előállításával kapcsolatos munkálatokat is, és ezzel egy perspektivikus és egyre több eredményt hozó témát indított el.

Tevékenyen részt vett a BME oktató-nevelő munkájában, 1967-től kezdve mint docens. Jelentős eredményeket ért el az Építőmérnöki Kar fizika oktatás korszerűsítésében, a tananyagnak a mérnökképzés igényeihez való illesztésében. Új fizika- és elektrotechnika tantervet dolgozott ki. Az építőmérnökök számára fizika jegyzetet írt. Súlyt fektetett az oktatáson keresztül történő világnézeti nevelésre. Az Építőmérnöki Kar Nevelési Bizottságának elnöke volt.

Több tudományos és társadalmi szervezet vezetőségébe választották be. A hallei Nemzetközi Elektronmikroszkópiai Tudományos Centrum tudományos tanácsának és az ELFT Kristályfizikai Szakcsoport vezetőségének volt tagja.



Életének utolsó napjaiban is nevelési terveket készített, tudományos beszámolókat tárgyalt meg és a jövő kutatási feladatait vázolta fel, melyek kivitelezésében sajnos már nem vehet részt. Közvetlen, jókedélyű egyéniségét, tanácsait, útmutatását örökre megőrizzük emlékezetünkben.

H. E.

KISS JÓZSEF IRODALMI MUNKÁSSÁGA

Könyvrészletek, tankönyvek

- — A Természettudományi lexikon szilárdtestfizikai címszavai. Vol. 1. Bp. 1964. Akadémiai Könyvkiadó.
- — Építőmérnöki irodalomkutatás (szerk.: Héberger Károly). Bp. 1971. Tankönyvkiadó. 397 p.
- — Laboratory manual on crystal growth. (szerk.: Tarján Imre, Mátrai Mária). Bp. 1972. Akadémiai Könyvkiadó. 250 p.
- — Fizika Építőmérnököknek. Bp. 1976. Tankönyvkiadó. 370 p.

Tudományos dolgozatok

- — Vlijanyije davlenyija na szpektr pogloscsenyija klorisztovo natrija, okrasennovo pri pomoscsi elektroliza = Czech. Fiz. Zsurn (B) *10* (1960) p. 616—620
- — Színcentrumok alkalihalogenid kristályokban — Fizikai Szemle *10* (1960) p. 309—315
- — Színcentrum-vizsgálatok NaCl egykristályokon — Ép. Ip. Közl. Műsz. Egy. Tud. Közl. *7* (1961) No. 1 p. 3—13
- — Neuere Messungen zur Leitfähigkeit verformter Steinsalzkristallen (Jeszenszky Bélával) — Acta Physica *13* (1961) p. 479—480
- — Neuere Messungen zur Leitfähigkeit verformter Steinsalzkristallen (Jeszenszky Bélával) — Zeitschrift für Physik *169* (1962) p. 323—325
- — Haarsalz. Természetes kősó-tűkristály — Fizikai Szemle *14* (1964) p. 205—206
- — Isszledovanyije elektricseszkih effektov, voznyikajuscsih pri plaszticseszkoj deformacci krisztallov NaCl — Krisztallografija *10* (1965) p. 890—894
- — Isszledovanyije elektricseszkih effektov voznyikajuscsih pri plaszticseszkoj deformacii krisztallov kamennoj szoli. Kandidátusi Értekezés. Moszkva, 1966. 156 p.
- — Recent data on the nature of the Gyulai—Hartly effect — Acta Phys. Hung. *24* (1968) p. 241—253
- — A Gyulai—Hartly-féle effektus az újabb eredmények tükrében — Fizikai Szemle *18* (1968) p. 139—145
- — Izmenyenyije mikrotverdosztyi scselocsno- haloidnüh krisztallov pri zakalke (Sárközi Józseffel) — Krisztallografija *16* (1971) p. 955—960
- — The Changes in the Microhardness and in the Charge of Dislocation of Quecheed NaCl Monocrystals (Sárközi Józseffel és Vannay Lászlóval) — Phys. Stat. Sol. (b) *43* (1971) K157—K159
- — Contribution to the view held on Microhardness of Alkali Halides (Sárközi Józseffel és Tóth Andrással) — Per. Pol. El. Eng. *16* (1972) p. 199—204
- — Estimation of the Electric Charge Carried by Dislocation in NaCl Crystals (Tóth Andrással) — Phys. Stat. Sol. (a) *19* (1973) K61—K64

FÖLDÖN KÍVÜLI CIVILIZÁCIÓ

Teleki Péter
Dunaújváros

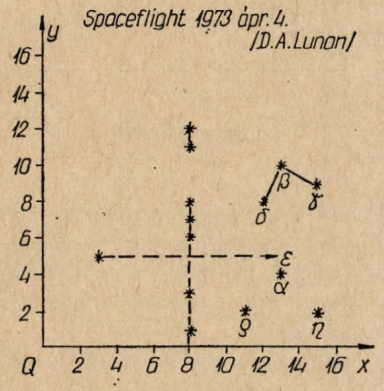
Napjainkban immár tudományos körökben elfogadott feladat a Földön kívüli technikai civilizációk felderítése. Hatalmas rádióteleszkopok figyelnek a világmindenségre, hogy a kozmosz rádiózörejéből intelligens jelzéseket próbáljanak kiszűrni. Az eredmény közismert: még idáig semmi.

Ezért okozott némi megdöbbenést D. A. Lunan elmélete, mely szerint valójában nem is kell messzire mennünk, mert egy idegen civilizáció automatikája kerint a Föld körül. Feltételezését azokra a hosszan késleltetett rádióvisszhangokra alapozta, amelyeket először a húszas évek végén észleltek Hollandiában. Külön érdekesség, hogy volt olyan kibocsájtott rádióimpulzus, amely visszhangként kétszer is visszaérkezett. (A visszhangoknál Doppler-effektust nem észleltek!) Táblázatban:

$y =$	1	2	2	3	4	5	6	7	8	8	9	10	11	12
$x =$	8	11	15	8	13	3	8	8	8	12	15	13	8	8

Ahol y = a jelimpulzus sorszáma,
Míg x = a visszhangkésés másodpercekben mért idejével.

Ebből alkotta Lunan az oly sok vihart elindított ábráját:



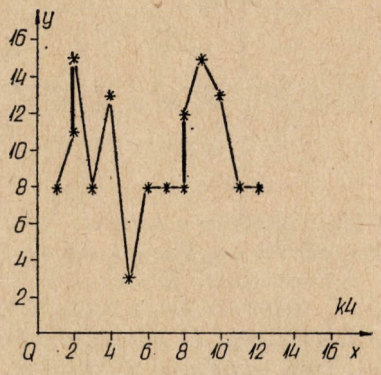
1. ábra

Nem célom Lunan érvelését külön ismertetni, amelynek lényege: a fiatal skót csillagász azt feltételezi, hogy a fenti ábrán a Boötes csillagkép látható, ahonnan az automatikát küldték. Még pontosabban: az ε pont közelében levő ε Bootes csillag egyik bolygójáról, és az 12 600 évvel ezelőtt ért a Földhöz. Ezt az időpontot Lunan az égbolton lassan elmozduló Arkturusz, ábrán feltüntetett és most látható helyzetének egybevetésével számította ki. Az ábra összeállításánál azonban hiányzik egy matematikailag megalapozott rendezési elv. Részemről nem tartom kizártnak D. A. Lunan feltevését, mert ha nem természeti jelenségről van szó — bár ez a valószínűbb! — akkor mint egyetlen létező okot kell vizsgálnunk. Tekintve, hogy ha a természeti jelenséget nem tételezzük fel, egyetlen kérdés marad: létezhet-e olyan rendezési elv, amely a rádióvisszhangokból kapott információt egyértelműen meghatározza?

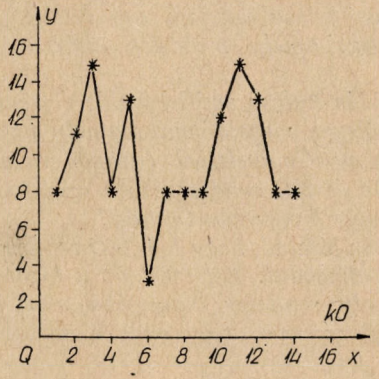
Azaz egyszerűbben szólva: előre megmondom, hogy a jelekkel mit csinálok, mielőtt látnám a végeredményt, és ebbe a programba menetközben sem avatkozom bele.

Hasonló gondolattal már Bracewell is foglalkozott, mondván, hogy nem talált semmilyen összefüggést, amely információra utalna. Ez bizonyosan így van, amíg a visszhangjeleket pl. olyan geometriai pontoknak képzeljük, amelyek egymáshoz képest állandó helyzetűek. (Pl.: Lunan-féle ábra kialakulása.)

Nézzük újra a visszhangjeleket, de x, y koordináták felcserélésével, amelyben a k4 koordináta rendszer elemeit rendre összekötjük. K a koordináta rendszerre, a számjegy pedig a koordináta rendszerben előforduló a kettős visszhangok y tengelyre vetített hosszúságára utal. Most x lesz az impulzus sorrend, csakhogy ez a kilépő impulzusok sorrendje! Valójában a visszaérkező jelek időben jól elkülönülve érkeztek, amelynek ábrája k0 koordinátában:

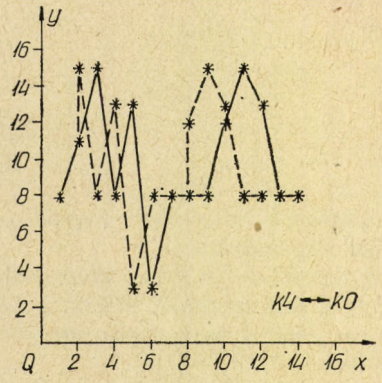


2. ábra



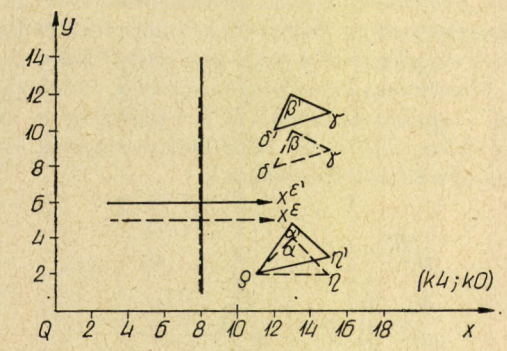
3. ábra

Itt már x tengely az információs impulzusok beérkezési sorrendjét tartalmazza! A két koordináta rendszer egymáshoz képest torzulást szenvedett:



4. ábra

Könnyű belátni, hogy k0 koordináta rendszerből alkotott „csillagtérkép" már nem a Boötest ábrázolja! A csillagkép β pontja kivételével minden pont egyként egységnyit eltolódott!*



5. ábra

Másik oldaláról közelítve a kérdést:
az összes kisugárzott impulzusok száma: 12.
az összes visszaérkezett impulzusok száma: 14.

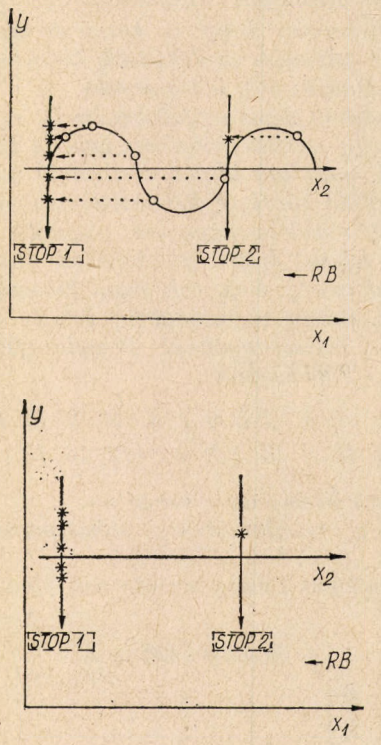
Elvben az is bekövetkezhetett volna, hogy egyetlen kisugárzott impulzusra 14 válaszjel érkezik. K 14 rendszerben leírva, egy egyenest kapnánk.

Helyesnek vélem, ha egyelőre nem tekintjük konkrét információnak a Lunan-féle ábrát, hanem csak egy lehetőségnek: hátha valóban egy (stilizált) csillagképet látunk, amely mellesleg akár a Bootes is lehet.

A megoldás kulcsa nyilvánvaló: Csak azt tekinthetjük tényleges megoldásnak, amely azonos programmal vezetett műveletnél (azonos rendezési elv) mindkét K4 és KO rendszerekben egyértelműen egymással is egyező végeredményt ad!

A 4. ábrán látható, hogy K4 ,KO rendszer egymáshoz képest elmozdul. Ezt lehet az a bizonyos kulcs, hogy bármely rendszer önmagába véve is mozog! Nincs meghatározva, hogy melyik rendszer mozdul el a másikhoz képest, így kettősséget kell feltételezni!

Bármely (K4, KO) rendszer sajátmozgása csak úgy feltételezhető, ha olyan szinusz-görbének tekintjük, amely a görbe bizonyos fázispontjainak irányába rendeződik. Ezek a fázispontok y tengellyel párhuzamos egyenesek, amelyekre minden egyes hullám (félhullám) vetületként zsugorodik.



6/a és 6/b ábra

Ez a rendeződés lehet bal és jobb irányú, az ábrákon ←RB, RJ→-vel jelölve. Önkényesen bár, de a 8 másodperces késéseket x2 tengelynek tekinthetjük, KO rendszer ←RB saját mozgása lépésről lépésre így néz ki: (Lásd: 7/a, b, c, d ábra)
A 7/c ábra, mely összesen 12 elmozdulásból tevődött össze, geometriailag rendezettnek látszik, ha indikáció céljából összekötjük azokat a pontokat, amelyek bármely koordinátatengelyhez képest

a, merőlegesen

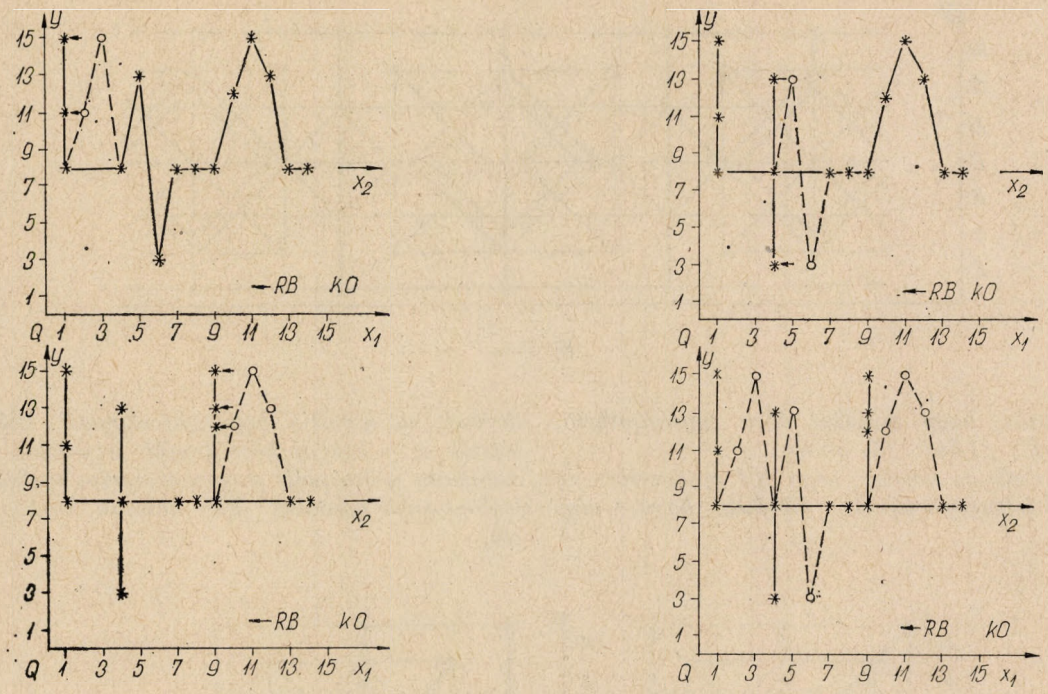
b, párhuzamosan

c, 45°-os szög alatt (elsősorban a vizuális kontrollban szerepel) egymással összeköthetők. (Lásd: 8. ábra)

Későbbiekben látni fogjuk, hogy ez valóban a legkevesebb kötelező lépés, egyéb más indikációs kiegészítés — pl. 30°-os teljesen fölösleges.
Szerintem az itt látható kép nem maga a teljes információ, hanem töredék!
Kiegészítése egész logikusan csak annyi, hogy létrehozom az ábrához illeszthető 4 és 3 szögeket, míg az

* Nyilvánvaló elírás, ugyanis a ϱ jó közelítéssel az $\alpha\gamma$ egyenes felezőpontja körül van
A helyes betűjelzés: ξ

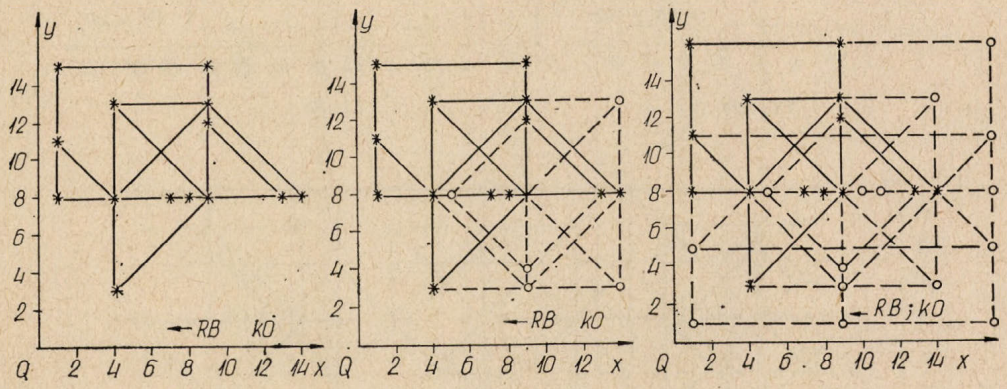
Spaceflight 1973 ápr. 4.
D.A. Lunan: Space Probe from Epsilon Boötis



7/a, b, c, d ábra

ábra befejezettnek nem látszik. Elsőlépésben a feltételezett részeket szaggatott vonallal: (Lásd: 9. ábra)

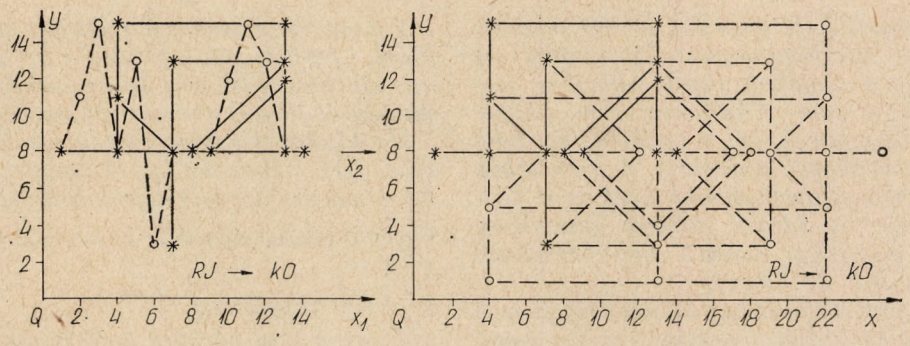
Még mindig nem teljes, ezért most a második lépés következik: (Lásd: 10. ábra)



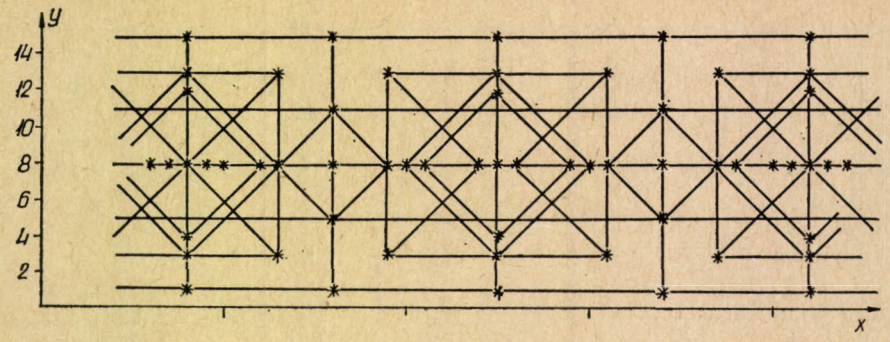
8. ábra *9. ábra* *10. ábra*

Mielőbb különböző spekulációkba bonyolodnánk, villámgyorsan nézzük RJ→ kialakulását: (Lásd: 11. ábra).

Teljes információként az előzőkben megismert játékszabályok szerint: (Lásd: 12. ábra).

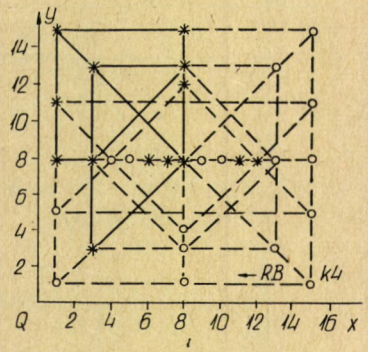


11. ábra *12. ábra*

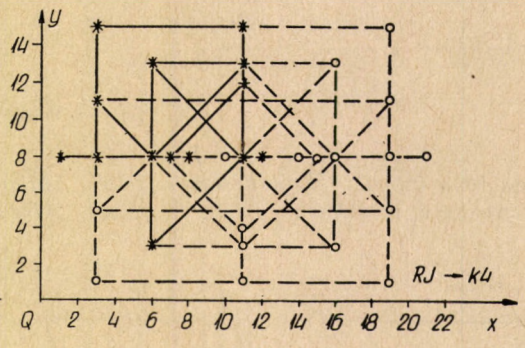


13. ábra

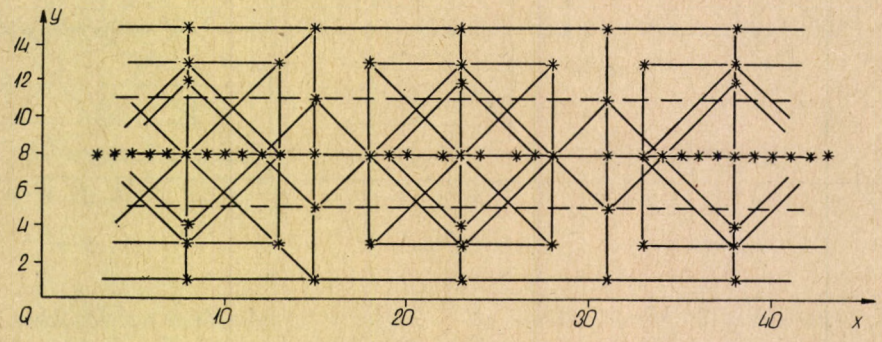
Külön ráadás, hogy mindkét ábra egységesíthető, „összeillenek" (Lásd: 13. ábra).
Most már csak az kellene, hogy K4 rendszerben is ugyanezt a jelenséget lássuk! Elhihető, hogy a végeredmény:



14. ábra



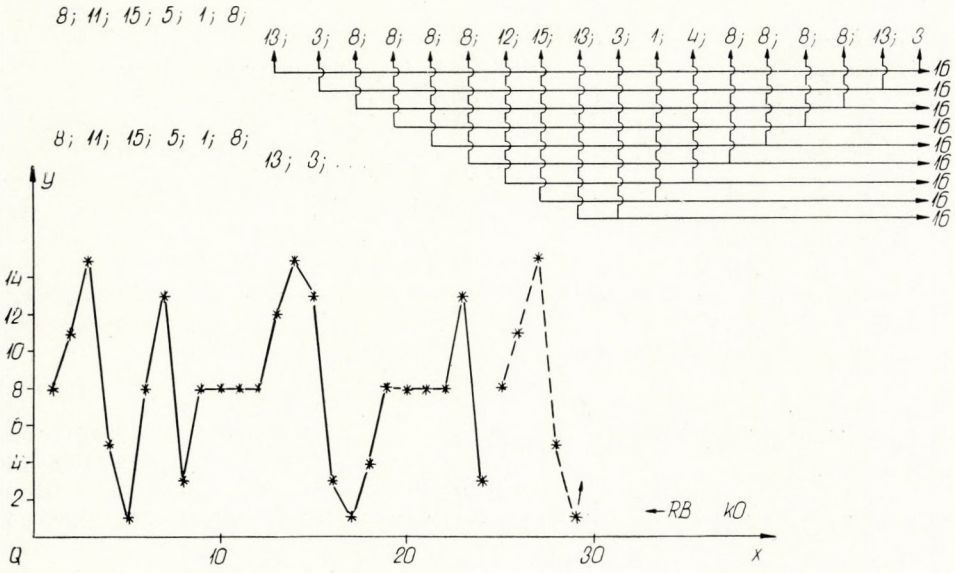
15. ábra



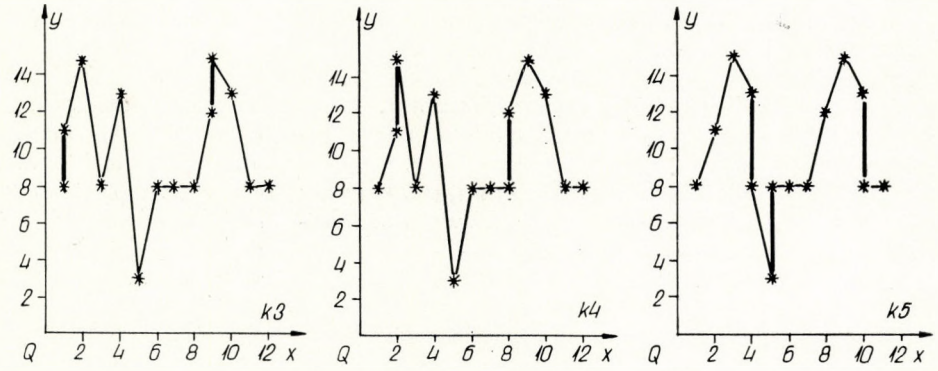
16. ábra

Logikai és szerkezeti felépítésre K4 és KO rendszer megegyezik: Így nem marad más hátra, mint azt feltételezni, hogy a kialakult képek valójában monoszkóp képek. (A monoszkóp képek közül bármelyik azonos elvi felépítésű, így a továbbiakban csak általában a monoszkópot említem.) A monoszkóp szignálként történő visszasugárzása lehet az a kódjelsorozat, amely az idegen űrhajó valamilyen automatikáját működésbe hozza! Egy feltételezett válaszkódjel: (Lásd: 17. ábra).
Nagyon is elképzelhető, hogy az idegen űrhajó nem egy homályosan értelmezhető csillagképre fog mutogatni, hogy „onnan küldtek", hanem ha elég jól kérdezünk, azt mondja, hogy „itt vagyok". Előnyösnek látszik ez a sokkal közvetlenebb kapcsolat, mert az automata a betáplált program szerint egyből közli a legfontosabb adatokat: kik, honnan, mikor küldték stb.

Visszatérve a monoszkóp-elmélet kettős visszhangjeléhez; feltételezzük azt, hogy a két kettős visszhang nem ott létezik ahol van, hanem máshol! (X2 tengely eltolódását fel sem tételezhetjük, ezt bárki beláthatja!)
Ha a kettős visszhangok nem egyenlő hosszúságúak, akkor KO rendszerhez képest (esetenként saját ← RB RJ → mozgásához is.) képzavar keletkezik.
Egyenlő hosszúságuak a következők:
3—3
4—4 (ezt vizsgáltuk).
—5—5—5 ahol bármely kettő, vagy mindhárom jel elemezhető. (Lásd: 18. ábra).



17. ábra



18. ábra

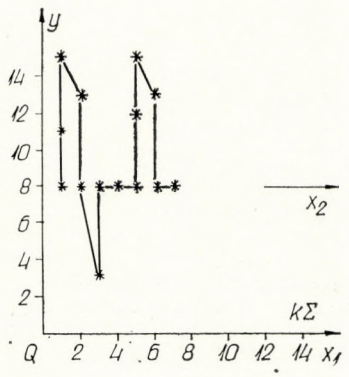
K3 és K4 monoszkópok nagyfokú hasonlóságát magyarázza az a tény, hogy K3, K4 kettős visszhangjai, majdnem szimmetrikusak.

K5 hasonlósága már csak főbb vonalakban egyezik. (Ezek a szimmetriák sérültek, mert elforgatás nélkül egyetlen monoszkóp sem osztható négy egybevágó részre.)

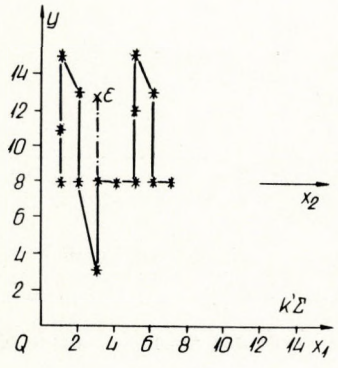
K rendszer saját-mozgás elméletéről félbehagyott gondolat lenne, ha nem feltételezném ennek a mozgásnak a befejezett állapotát. (Amikor információvesztesség nélkül még értelmezhető jelzéseket kapok.) Csak annyit kell és szabad feltételezni, hogy minden beérkező visszhangot meg tudok különböztetni a másiktól.

$$X = 1\ \ 1\ \ 1\ 2\ \ 2\ 3\ 3\ 4\ 5\ 5\ \ 5\ \ 6\ 6\ 7$$

$$Y = 8\ 11\ 15\ 8\ 13\ 3\ 8\ 8\ 8\ 8\ 12\ 15\ 8\ 8$$



19a. ábra



19b. ábra

Minden erőltetés nélkül kijelenthetem, hogy a fenti ábrán a Lunan-féle szimbólum látható!

A 8 másodperces visszhangok egységesen, szépen felsorakoztak. Választóvonal, tengely-jellegüket többé nem lehet vitatni. Lunan — ε -val jelölt pontjához nem kell külön iránymeghatározó ábrát manipulálni, mert x 3 y 3 egyenes ezt eleve meghatározza!

Összegezve az eddigieket: Feltételezem, hogy az automata rádió kódját valamilyen szimbolikus képből konstruálták. Lehetséges, hogy a szimbolikus kép valóban a Bootesre utal, ahol a képnek nem is kell a valóságos égbolttal megegyeznie. Nem a képi ábrázolás az elsődleges információ, hanem csak kísérő jelensége a rádiókódnak.)

A kettős visszhangokat is úgy értelmezem, hogy itt is szabad feltételeznem bizonyos sajátmozgást. Lényegében ez vezetett a 19a, b., ábrákhoz. A kettős visszhangok két eredeti feladata az lehetett, hogy elgondolkoztassa a kutatóit; majd egy általam jónak vélt megoldásnál csak egy féleképpen értelmezhetővé tegye az egész impulzus sorozatot.

Egy létező rádiókód feltételezésénél látszólagos ellentmondás van, mert az automata mélységes hallgatása tagadja az automata létezését. Legsúlyosabb ellenérv:

Miért nem szólal meg az automata rádióadója „magától", hiszen a földi civilizációra rábukkant.

Ez a kérdés valójában az egész automataügy legbonyolultabb része.

Jobb megértés végett kezdjük talán a legelején:

Az automata érkezésével két alaphelyzet volt lehetséges:

A. *vagy küldték.*

B. *vagy itt hagyták.*

Viszont mindkét alaphelyzetet megelőzte az a program, amely az automata „viselkedését", tevékenységét előirányozta. Gondoljuk meg: etikailag milyen súlyos kérdés, hogy egy civilizációba miként avatkozzon be egy másik civilizáció. Mindenféleképpen helyesnek látszik, ha egy bizonyos társadalmi, technikai — színvonal alatt ez a beavatkozás — mind két idegen civilizáció találkozása — nem jön létre. (Tehát etikai előírás: az előző értelembe vett korlázott mérvű be nem avatkozási program.)

Bizonyosra veszem, hogy minden civilizáció fejlődési velejárója a társadalmi érdekellentétek kialakulása. Ez a hatalomért folyó harc legelőször a hatalom megtartásához szükséges fegyvereket — és politikát — alakítja ki. (A rakétaipar sem a békés kutatásoktól indíttatva fejlődik rohamléptekkel.)

Szerencsére elérkeztünk abba a korba, hogy az emberiség elhatározhatja, nem követ el öngyilkosságot. Nem tudni mennyire segítené — vagy esetleg megtorpedozná — az emberiség jövőjét; ha ebben a bizonytalan korban előadásokat hallhatnánk más civilizációk fejlődéséről.) A vesztes félnél elkerülhetetlen a pánikhangulat, és ez végzetes lehet!)

Ennyire szerteágazó és sokrétű feladatnak megfelelni nagyon nehéz. Ezért választhatták az automatát megalkotói azt a módszert, hogy az automatát a földi rádióadások kezdetéig pihentetik. A rádióadások „felébresztették" az automatát, amely egy véletlenszerű kiválasztott rádiókísérletnél közölt a memoriájában tárolt kódokból egyet. Említettem, hogy ezt a kódot túlzott gyakorisággal nem hajtogathatja, mert ezzel nyilvánvalóvá teszi saját létezését; ez pedig számára tilos!

Ehhez hasonló indokokkal magyarázom azt is, ha már esetleg jártak a Földön a történelmi ókorban űrhajósok, semmi színalatt nem hagyhattak maguk mögött emlékművet, vagy egyéb üzenetet. Azt sem lehet tudni, hogy az információs kapcsolatok tilalma milyen esetekre — társadalmi, politikai, katonai — érvényes. (Lehet, hogy majd egy idegen és távoli civilizáció számára jelent tanulságot, ha a Földön az emberiség úgy dönt, hogy még sincs szüksége a hálás utókorra. . .)

A rádiókód megfejtése a belépőjegyet jelentheti abba az űrklubba, ahol már bizonyára eldöntötték: jelenlegi társadalmi, technikai színvonalunkon milyen információkat kaphatunk.

A Fizikai Szemle szerkesztőbizottsága az 1972. évben meghirdetett Vélemények sorozatát az olvasók kérésére továbbfolytatja ez évben is. A szerkesztőbizottság állásfoglalása alapján, „a Fizikai Szemle feladatául vállalja el, hogy teret nyit a fizikai kutatás és a fizika oktatására vonatkozó egyéni véleményeknek, ha azok értékes gondolatokat tartalmaznak és építő szándékúak, függetlenül attól, hogy egyeznek-e a lap szerkesztőinek nézetével, vagy sem". Ennek szellemében várjuk továbbra is olvasóinknak, várjuk a magyar fizikusoknak leveleit.

A szerkesztőbizottság

A szerkesztésért felel: Turiné Frank Zsuzsa
Szerkesztőség: Budapest V., Anker köz 1, Eötvös Loránd Fizikai Társulat. Távbeszélő: 227-040
A kiadásért felelős: Siklósi Norbert igazgató
Kiadja a Lapkiadó Vállalat, Budapest VII., Lenin körút 9—11. Levélcím: 1906. Postafiók 223. Távbeszélő: 221-293
Terjeszti a Magyar Posta. Előfizethető bármely postahivatalnál, a kézbesítőknél, a Posta hírlapüzleteiben és a Posta Központi Hírlap Irodánál (KHI, 1900 Budapest V., József nádor tér 1.) Közvetlenül vagy postautalványon, valamint átutalással a KHI 215-96162 pénzforgalmi jelzőszámára
Előfizetés egy évre 72,—Ft; egyes szám ára 6,—Ft. Megjelenik havonta
76.3212 Akadémiai Nyomda, Budapest V., Gerlóczy utca 2. — Felelős vezető: Bernát György

Index: 25.289

fizikai szemle

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat lapja



1976/8

A szerkesztőbizottság elnöke:

Marx György

A szerkesztésért felelős:

Turiné Frank Zsuzsa

A szerkesztőbizottság titkára:

Berényi Dénes

Szerkesztőbizottság:

Balázs Béla, Barlai Katalin, Barta György, Bozóky László, Csekő Árpád, Dede Miklós, Fehér István, Flórián Endre, Gaal István, Groma Géza, Haiman Ottó, Hoffmann Tibor, Holics László, Károlyházy Frigyes, Keszthelyi Lajos, Kovács István, Mihály László, Schanda János, Soós Károly, Szigeti György, Tóth Eszter, Valkó I. Péter, Vermes Miklós

Címképünk:
Hatvani István szobra, „A professzor" a debreceni Kossuth Lajos Tudományegyetemen.
Varga Imre alkotása

TARTALOMJEGYZÉK

Keszthelyi Lajos: A napenergia hasznosítás problémái 281 old.
Tarnóczy Tamás: Az ipari zaj, mint méréstechnikai és egészségügyi probléma 286 old.
Vatai Endre: Alapvető kölcsönhatás-e a gyenge kölcsönhatás? 240 old.
Illy József: Az általános realivításelmélet megszületése 293 old.

A FIZIKA TANÍTÁSA
D. Hawkins: Én, te és a harmadik 305 old.
Javaslat a természettudomány tanítására II. 310 old.

VÉLEMÉNYEK
D. Hawkins: Levél Budapestre 320 old.

СОДЕРЖАНИЕ

Л. Кестхельи: Вопросы использования солнечной энергии
Т. Тарноци: Шум в промышленности как проблема измерительной техники и гигиены труда
Э. Ватаи: Фундаментально-ли слабое взаимодействие?
Й. Илли: Рождение общей теории относительности

ПРЕПОДАВАНИЕ ФИЗИКИ

Д. Хокинс: Я, Ты и Оно
Предложение относительно обучения естественным наукам в средних школах II

ОТЗЫВЫ И ВЫРАЖЕНИЯ МНЕНИЙ

INHALT

L. Keszthelyi: Die Probleme der Nutzung der Sonnenenergie
T. Tarnóczy: Lärm in der Industrie als Problem der Messtechnik und des Gesundheitsschutzes
E. Vatai: Ist die schwache Wechselwirkung eine fundamentale Wechselwirkung?
J. Illy: Die Geburt der allgemeinen Relativitätstheorie

UNTERRICHT DER PHYSIK

D. Hawkins: Ich, Du und Es
Vorschlag bezüglich des Unterrichts der Naturwissenschaften in Mittelschulen II

STELLUNGNAHMEN UND MEINUNGSÄUSSERUNGEN

CONTENTS

L. Keszthelyi: The problems of using solar energy
T. Tarnóczy: Industrial noise as a metrological and as a hygienical problem
E. Vatai: Is the weak interaction a fundamental one?
J. Illy: The birth of the general theory of relativity

THE TEACHING OF PHYSICS

D. Hawkins: I, THOU, and IT
Proposal concerning the teaching of sciences in secondary schools II

OPINIONS

fizikai szemle

AZ EÖTVÖS LORÁND FIZIKAI TÁRSULAT LAPJA
Alapította Eötvös Loránd 1891-ben Mathematikai és Physikai Lapok néven

XXVI. évfolyam 8. szám 1976. augusztus

A NAPENERGIA HASZNOSÍTÁS PROBLÉMÁI

Keszthelyi Lajos
KFKI, Budapest, SZBK Biofizikai Intézet Szeged

Az utóbbi évek eseményei a figyelmet erősen ráirányították az energiatermelés kérdésére. Az életszínvonal növekedés materiális alapjainak a megtermeléséhez elsősorban energia kell. Energia forrásaink jelenleg a szén, az olaj, a gáz. Mindezeket az energia hordozókat végső soron a Nap földünkre sugárzott energiája hozta létre évmilliók során. Világviszonylatban is kismértékű még a vízenergia és a szélenergia felhasználása, amelyet a Nap folyamatosan hoz létre. Elenyésző a nukleáris energia is. A napsugárzás évmilliók alatt felhalmozott energiáját (becslések szerint $4{,}8 \cdot 10^{19}$ kkal), amely szén, olaj, gáz formájában található kb. 100—150 év alatt elfogyasztja az emberiség.

Nagy aggodalomra azonban nincsen ok. Az energiahiány miatt várható óriás visszaesés valószínűleg nem fog bekövetkezni, mert kb. 30 év távlatában olyan új energiaforrás jelenik meg, amely már ma is lényeges energia mennyiség előállítására képes. Ez a nukleáris, egyenlőre az atommaghasadáson alapuló energiatermelés. Remény van arra, hogy néhány évtizeden belül a termonukleáris energiatermelés is technikai valósággá válik.

Mégsem vagyunk túlságosan boldogok, mert a nukleáris energia termelés „mellékhatásaitól", fokozott sugárártalomtól félünk. A különböző számítások, becslések azt mutatják, hogy a félelem részben indokolatlan, a nukleáris energiatermelés veszélye lényegesen kisebb, mint a közlekedés veszélye. A veszély azonban hosszú távon ismeretlen.

Ezek miatt az okok miatt alternatív energiaforrásokat is kell keresnünk. Pillanatnyilag nem ismerünk más energiaforrást a nukleáris energián kívül, mint a föld mélyében levő óriási hőtartalékok és a Nap földre érkező sugárzása.

A következőkben azt vizsgáljuk meg, hogy lehetséges-e a napenergia jobb, okosabb felhasználása, mint ami a természetben az élővilág evolúciója során kialakult.

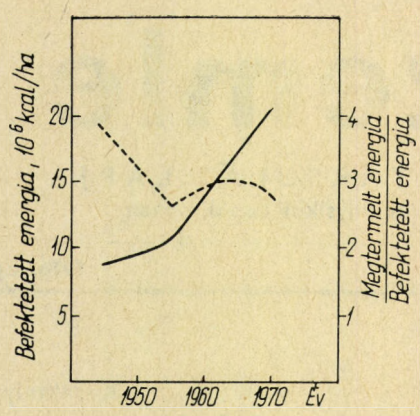
Néhány adat

A Nap földre sugárzott energiája a föld felszínén $7{,}2 \times 10^{20}$ kkal/év. Becslések szerint $1{,}9 \times 10^{11}$ tonna szerves anyag szintetizálódik a Földön. (Ebből $0{,}7 \times 10^{11}$ tonna óceánokban. Az óceánok felülete 2,4-szer nagyobb mint a szárazföld felülete.) A szerves anyag ekvivalens $7{,}4 \times 10^{17}$ kkal energiával. A fotoszintézis folyamata, amelynek során a napfény hatására a CO_2-ből és H_2O-ból $(CHO_2)_n$ típusú energiahordozó vegyületek szintetizálódnak, globálisan nagyon kis hatásfokú. Egy fotoszintetikus rendszer elvi hatásfoka sokkal nagyobb (kb. 34%). Mégis az egy ezrelékes hatásfokkal is kb. 10-szer több energiát raktároznak el az élőlények évente, mint a világ teljes energiafogyasztása ($\sim 7{,}2 \times 10^{16}$ kkal, 1970 éves adat).

A kb. 4×10^9 ember az összes szerves anyag 0,5%-át fogyasztja el élelem formájában. (Közvetlenül növényi eredetű táplálék és átalakított állati eredetű fehérjék és zsírok formájában. Minden állati eredetű kkal $\sim$ 7 növényi kkal ellenében képződik.) A számok azt jelentik, hogy átlagosan 2700 kkal/nap egy ember fogyasztása a világon táplálék formájában és kb. húszszor ennyi az összes energiafogyasztás/fő. (Ez megy lakásra, ruházatra, közlekedésre etc.) Az egy ezrelékes fény hasznosítási hatásfok átlagérték a Föld egész felszínére. Nyilvánvalóan ez függ a földrajzi szélességtől, nedvességtartamtól és nem utolsósorban a növénytermesztés intenzitásától. Cukornád esetében 0,6% cukorrépa esetén kb. 0,2% érhető el.

A kultúrnövények termesztésének intenzívvé tételével azonban nem lehet a hatásfokot túlságosan növelni. Érdemes ebből a szempontból megnézni az 1. ábrát. Az Egyesült Államokban a kukorica termeléshozama 1950 és 1970 között kb. 2,3 szorosan növekedett az intenzív termesztés következtében. Ugyanakkor a termelés hatásfoka, vagyis a nyert energia — befektetett energia viszonya 3,75-ről kb. 2,8-ra csökkent. A nagyobb termeléshez több műtrágya, növényvédőszer, jobb gépesítés kellett. A befektetett energiában az emberi munka elég kicsi hányad.

A kukorica szemeknek megfelelő 2.10^7 kkal/hektár termést (1970-ben) $5{,}10^9$ kkal/hektár napenergia tette lehetővé a növekedési szezonban. Ez 0,4%-os hatásfok lenne. Ha hozzávesszük a kukoricaszárban, levélben, szintetizált szénhidrátokat is, akkor 1,26%-os hatásfokot kapnánk erre a fontos kultúrnövényre. Minthogy a kukoricában rejlő energiának csak mintegy 65%-a ered a Nap sugárzásától és a Nap energiának mintegy 2/3 része jön



1. ábra. A kukorica termelés hatásfokának változása 1945—1970 között az USA-ban.

a növekedési időszakban a valóságos hatásfok csak kb. 0,5% az egész növényre és kb. 0,17% a kukoricaszemekre egy évre vonatkoztatva. Magyarországon a napsugárzás 105 kkal/cm² év, tehát a 93 000 km² felületre $\sim 10^{17}$ kkal/év. 1974-ben a teljes hőenergia fogyasztás: szén, kőolaj, földgáz és az energiahordozókból előállított villamos energia $2{,}2 \times 10^{14}$ kkal volt, vagyis kb. két ezereléke az ország felületére érkező napsugárzás energiájának. A teljes szerves anyag termelés $5{,}4 \times 10^7$ tonna (1974-ben), ami megfelel $2{,}1 \times 10^{14}$ kkal/év energiának. Magyarország a világátlag felett van, kb. annyi energiát használ el, mint amennyi a Nap sugárzásából fotoszintetikus úton keletkezik. A fotoszintetikus úton keletkező energia mintegy 12—13 %-át fogyasztjuk el táplálék formájában. (A napi fogyasztás mintegy 3300 kkal/fő, ez $\sim$ 6%, de az állati termékek, fehérje és zsír termeléséhez 5—7-szer több energia kell, mint amennyit táplálék formájában visszakapunk így kb. 7000 kkal/nap/fő a fogyasztás.)

Nem biológiai lehetőségek a napsugárzás fokozott felhasználására

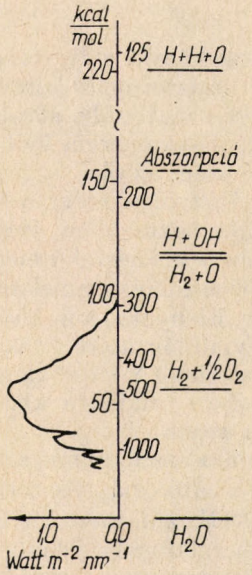
Bethe szerint a legegyszerűbb napsugár — energiaátalakító berendezés egy óriási tükörrendszer (1—2 km átmérővel), amely a napsugárzást egy központi vízforralóba gyűjti. A rendszert computer vezérli, hogy optimálisan gyűjtse a fényt, vagyis a tükröket mozgassa a Nap után. A vízből gőzt termelnek, amely hagyományos módon turbinák segítségével állítja elő az elektromos energiát. Minthogy a napsugárzásnak napi periódusa van, felhős napok is vannak, átlagos 100 MW termeléshez 400 MW csúcsokra kell tervezni a berendezést és gondoskodni kell az energia tárolásáról. A becslések szerint a beruházási költség kilowattra vetítve kb. 5-szöröse egy atommaghasadásra alapozott atomerőmű költségeinek.

Már ma is használják a napenergiát kísérleti célokra épített lakóházak fűtésére és hűtésére. A tetőn elhelyezett gyűjtő felületben abszorbeált napenergia éves szinten elegendőnek bizonyult a feladatra. Egyelőre azonban a szükséges beruházások költsége nagyon magas.

Más lehetséges megoldás a víz közvetlen fotolízise:

$$H_2O \xrightarrow{h\nu} H_2 + 1/2\, O_2$$

összefüggés alapján. A folyamathoz 56,6 kkal/mol, vagyis 2,46 eV/molekula szükséges. A H_2 elégetésekor ezt visszakapjuk. A 2,46 eV megfelel $\lambda =$ = 5000 Å hullámhosszúságú fénynek, ennél rövidebb hullámhosszú fény még bőven van ($\sim$ 16%) a napsugárzás spektrumában (2. ábra). A folyamathoz valamilyen katalizátor kell, mert a víz nem abszorbeálja közvetlenül az 5000 Å hullámhosszú fényt. Több megoldást javasoltak, ezek közül ismertetünk egyet.



2. ábra. Energia diagram: a napsugárzás spektruma, és a víz disszociációjához szükséges energiák. (Átszámításhoz 1 kkal) mol = 0,043 *eV*).

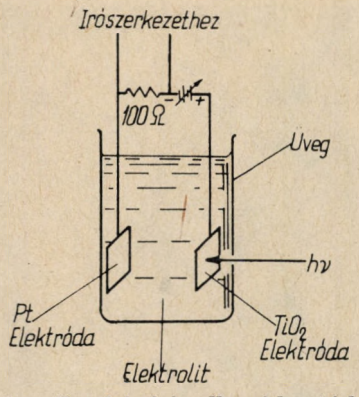
A 3. ábrán látható edényben levő elektrolitba platina és TiO_2 egykristály elektróda merül. A TiO_2 n-típusú félvezető, amelyet 410 nm hullámhosszúságú fénnyel megvilágítva a Pt elektródán H_2, a TiO_2 elektródán pedig O_2 gáz szabadul fel. A felszabadult gáz mennyisége növekedik, ha a cellára kívülről 0,2—1 V feszültséget kapcsolnak. Ilyen körülmények között a H_2 termelés hatásfoka (elégetéskor nyert energia/fényenergia + az anódpótlóból fogyasztott energia) kb. 1%. A TiO_2 elektróda valódi katalizátorként működik, mert mennyisége a megvilágítás közben állandó marad. Probléma a kis hatásfok és a napsugárzás spektrumához való rossz illeszkedés: H_2 termelés küszöbe 350—400 nanométer hullámhossznál van.

Biológiai fényenergia hasznosítás (fotoszintézis)

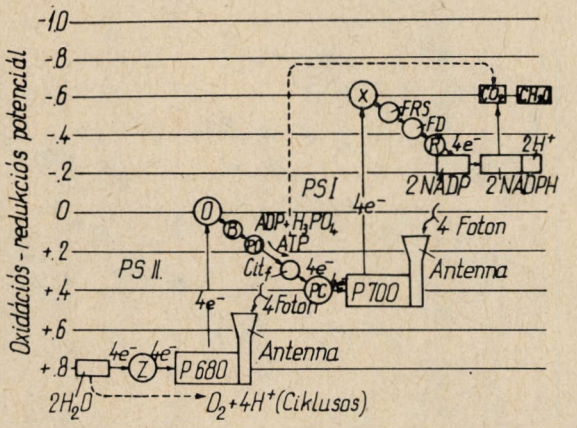
A fotoszintézis alapfolyamata a következő reakció:

$$6\, CO_2 + 6\, H_2O \xrightarrow{h\nu} C_6H_{12}O_6 + 6\, O_2,$$

vagyis széndioxid és víz molekulákból fényenergia hatására szénhidrát (glükoz) szintetizálódik és O_2



3. ábra. Fotokémiai cella vízbontáshoz.



4. ábra. A fotoszintézis sémája. Az oxidációs-redukciós potenciál voltokban van megadva.

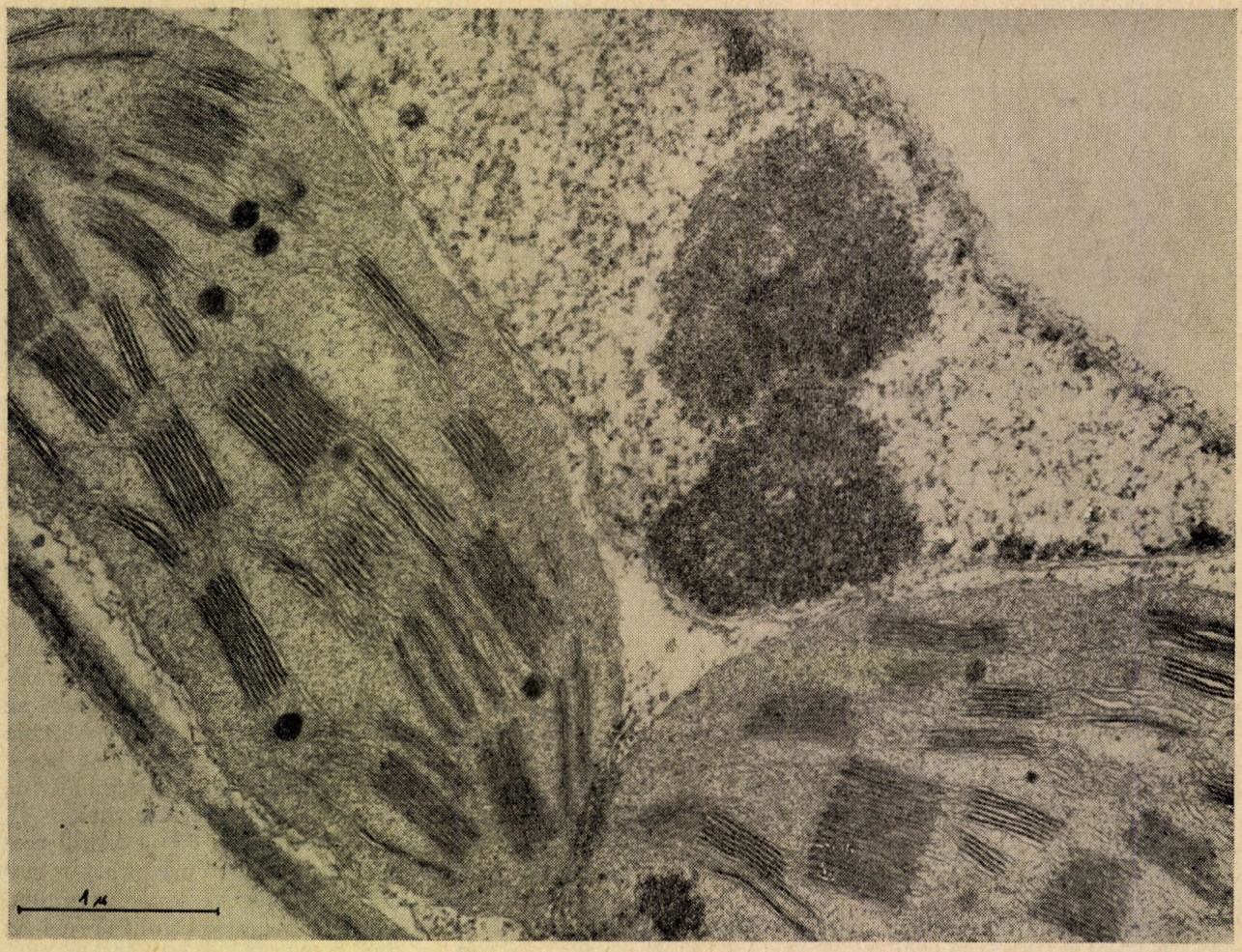
szabadul fel. Az elraktározott energia ~ 28 eV/glükoz molekula. Nézzük kicsit egyszerűsítve a fotoszintézis folyamatát. A 4. ábrán láthatjuk a fotoszintézis ún. Z modelljét. Általában két fotoszintetikus egység van a levelekben és algákban: szisztém I (PSI), és szisztém II (PSII). Természetesen vannak kivételek, ahol csak egy rendszer van (pl. baktériumok). Mi az általánosabb rendszert tárgyaljuk, az adatokat a spenót levélre vonatkoztatva. A fotoszintetikus egységek a levelek kis részeiben, az ún. kloroplasztiszokban helyezkednek el. Ezek 1,5 μ átmérőjű 5—6 μ hosszú sejtszervecskék. Bennük párhuzamos membránok vannak, (ld. 5. ábrát), ezekben ülnek viszonylag szabályos elrendeződésben a fényt abszorbeáló klorofill molekulák, egyéb fényabszorbeáló anyagok és fehérjék. A 4. ábrán végigkövethetjük a szintézis mechanizmusát, ahogy azt a legutóbbi időkben elképzeljük.

A kiindulás a PSII, amelyben kb. 300 klorofill molekula van. Ez egy antenna jellegű egység: bármely klorofill molekula abszorbeálja is a kb. 660—680 nm hullámhosszúságú fényt (1,76 eV), az egységben az nagyon gyors, ($\sim 10^{-9}$ sec), praktikusan veszteségmentes folyamattal eljut az ún. reakció centrumhoz. Az ábrán P 680 jelöli, amely lényegében azt jelenti, hogy ez egy olyan, részleteiben nem ismert egység, amelynek 680 nm-nél van abszorpciója (a folyamatban nem abszorbeál, hanem kifehéredik, ha a gerjesztési energia eljut hozzá). A reakció centrumban a P 680 egység egy elektront átad a Q acceptornak (elektrokémiai gradiens ellenében, ehhez használja fel a foton által hozott energia egy részét) és átvesz egy elektront egy donortól (Z) és végül vízmolekulát bont. Az ábrán 4 elektron van feltüntetve, mert az egész $CO_2 \rightarrow CH_2O$ alapfolyamathoz 4 elektron átfolyásához van szükség. Minthogy a fotonok egyenként abszorbeálódnak a *4* elektron is egyenként, nem kapcsolva halad át a láncon. Az ábrából látjuk, hogy 2 vízmolekula elbontásáról van szó, miközben még 4 elektront is elvon a Z rendszer. A vízmolekulák elbontásakor szabadul fel az O_2 molekula és 4 proton (H^+) jelenik meg. Nagyon fontos, eddig még megválaszolatlan alapkérdés, hogy a *4* foton abszorpciójából származó energia hogyan halmozódik fel, hogy a 2 molekula víz elbomlásához és a 4 elektron elvonásához szükséges energia együtt legyen. Nem ismeretes továbbá, hogy a 4 foton összesen kb. 7 eV energiája hogyan oszlik meg a Z és Q rendszer között. A folyamat megértése sokban vinné előre a napenergia hasznosítás problémáit.

Az elektronok Q-ból elektronátadó molekulák során haladnak át, először *B*-n, ami még ismeretlen, aztán a PQ plasztokinon majd a citokróm f molekulán. A kettő között az élő szervezetekben az energia hordozó szerepét betöltő ATP molekula szintetizálódik (egy molekula ~ 0,3 eV-ot hordoz). A végső állomás a PC plasztocianin molekula, amely az elektront átadja a PSI rendszernek.

A PSI rendszer antennája kb. 150 klorofill molekulát tartalmaz. A gerjesztési energia itt is nagyon gyorsan eljut a P 700 reakciócentrumba. A PC-ből jövő elektront a gerjesztési energia az *X* akceptorba (eddig ismeretlen molekula) továbbítja. Itt megint probléma van. A gerjesztés 1,7 energiáját meg kell osztani (X-ig 1 eV kell) és valahogy tárolni is kell, hogy PC-ből érkező elektron — amely valószínűleg nem akkor jelenik meg, amikor a P 700 éppen gerjesztve van — további energiát kapjon. X-ből az elektron tovább halad, FRS-hez, amely olyan anyag, amely az FD-vel jelzett ferredoxin molekulának ad át elektront, és eljut R-hez, amely egy másik típusú energiahordozóhoz (NADP) köt hozzá egy protont és elektront NADPH-t képezve. Ismét energiahordozót találunk, amely a már képződött ATP molekulákkal együtt bonyolult, de viszonylag jól tisztázott folyamatok során a CO_2-be beköt 2H atomot, CH_2O képződik és víz molekula szabadul fel. A fotoszintézis hatásfoka az alapfolyamatból megítélhető: 8 foton (1,75 eV × 8 = 14 eV) abszorpciója eredményeképpen kapunk egy CH_2O molekulát, amelynek energiatartalma 4,7 eV. A maximális elérhető hatásfok tehát ~ 34%. Nézzük meg ezzel szemben, hogy a nap sugárzása esetén hogyan alakul a maximális hatásfok. Az adatokat az 1. táblázat tartalmazza. Látjuk, hogy a teljes hatásfok 6,5% lehet maximálisan. Ez állandó napsütést feltételezve adódik. Az éjjelek, évszakok, földrajzi elhelyezkedés azonban ~ 3%-ra csökkenti a fotoszintézis maximális hatásfokát.

A napenergia átalakítás fő formája tehát a szén-



5. ábra. Kloroplasztisz elektronmikroszkópos képe.

1. táblázat

Fotoszintézis hatásfoka és energia veszteségek

	Fényenergia mennyisége
A föld felszínén	100%
50% veszteség, mert csak 400—700 nm között használják a fényt a növények	50%
20% veszteség a leveleken történő visszaverés, abszorpció és áteresztés miatt	40%
72% veszteség a 33%-os hatásfok miatt és amiatt, hogy a napfény max-a 575 nm-nél és nem 680 nm-nél van	11%
40% veszteség a respiráció miatt	6,7%

hidrogének felépítése. Néhány alga azonban képes más utat is választani. Amint láttuk, a fotoszintézis egyik fontos lépése a vízbontás. Itt O_2 szabadul fel közvetlenül és H^+ ionok képződnek. Elképzelhető olyan mechanizmus, élőlények esetében olyan enzim rendszer, amely a H^+ ionokból H_2 gázt képez.

Az Anabaena cylindrica nevű algák hosszú fonalakat alkotnak. A sejtek között vannak ún. vegetatív sejtek (itt történik a fotoszintézis) és kisebb számban heterociszta nevet viselő sejtek. Ez az élő rendszer képes H_2 gázt termelni. Valószínűleg oly módon, hogy a vegetatív sejtekben termelt H^+ ionok átdiffundálnak a heterociszta sejtekbe, ahol belőlük e sejtek sokkal vastagabb falának a védelmében működő enzimrendszer H_2 gázt képez.

Bioanalóg átalakító rendszerek

Az utóbbi években egyre több vizsgálatot folytattak olyan céllal, hogy a biológiai rendszerekben megismert vagy ismertnek vélt folyamatokat az élő rendszer komplikáltsága nélkül használják fel a napenergia átalakítására. A kutatások két lehetséges irányban folynak: egyrészt olyan rendszerek keresése, amelyek H_2-t termelnek, másrészt keresik annak lehetőségét, hogy a napfény hatására közvetlenül elektromos energia keletkezzék.

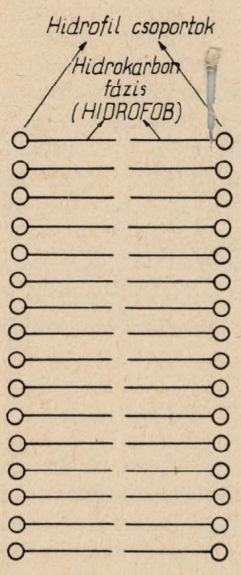
Sikerült H_2 gázt termelni élő szervezetekből kivont anyagokkal. Spenótból kivont kloroplasztisz, ferredoxin és bizonyos baktériumokból kivonható hidrogenáz enzim (pontos receptek is vannak a ke-

verék elkészítéséhez) néhány órán át fenttartható folyamatban megvilágítás hatására H_2 gázt termel. A bioegységeket tartalmazó keverék stabilitása egyelőre nem kielégítő, a H_2 termelés csak néhány órán át tartható fenn. Széleskörű kutatómunka indult annak érdekében, hogy a rendszer stabilitását és hatásfokát fokozzák.

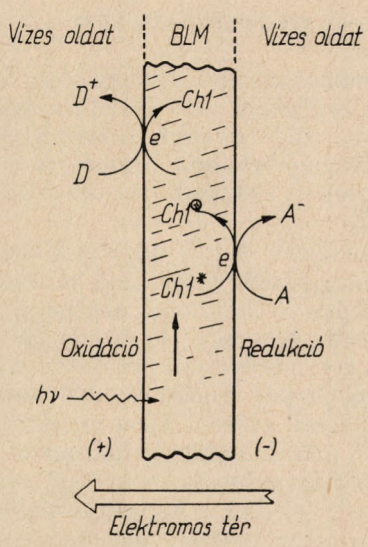
Bizonyos gazdaságossági számításokat is végeztek a fenti biokatalitikus rendszerrel kapcsolatban. 10%-os hatásfok esetén $\sim$ 9 mol H_2 gázt lehetne naponta m^2-enként termelni. A biorendszer versenyképes lehet a napenergia hőhatásán alapuló rendszerekkel. Természetesen addig még sok vizsgálatot kell elvégezni és sok eredményt kell elérni a stabilitás fokozása terén.

A napenergia átalakítás természeti folyamata, a fotoszintézis membránokhoz kötött jelenség. Azt várjuk, hogy a bioanalóg rendszerekben is membránokat kell felhasználni, hogy működő energia átalakító egységeket kapjunk. A legegyszerűbb modell, amelyben fotoválaszt várunk, valamilyen membránképző anyag és klorofill keveréke lehet.

Membránokat alkotó molekulákból (pl. a tojássárgájából kivont lecitin molekulákból) bimolekuláris lipid membránok képezhetők két vízréteg között. A lipid molekulák hidrofil feje a víz felé, hidrofób vége befele mutat (6. ábra). A membránba klorofill molekulákat építenek be, a két oldalon elektron akceptor, és elektron donor típusú vizes oldat van pl. ferri-ferrocianid oldat. Megvilágítás hatására az oldatokba bemerülő elektródákon $\sim$ 100 mV elektromos erő lépett fel. A jelenség értelmezése céljából tekintsük a 7. ábrát. A klorofill molekulákban az abszorbeált foton hatására egy elektron gerjesztett állapotba jut (Chl*) amely a membrán felületén elektront ad át az A akceptor molekuláknak és $Chl^{\oplus}$ pozitív töltésű molekula keletkezik amely a D donortól átvett elektronnal vissza alakul megint alapállapotba levő klorofill molekulává. A fény hatására tehát töltés szétválasztás történt, következésképpen egy az oldatokba merült elektródák közé kötött terhelő ellenálláson energia használható fel.



6. ábra. A bimolekuláris lipid membrán vázlata.



7. ábra. Fény indukált redox reakció sémája. A BLM fényérzékeny, mert klorofill molekulákat tartalmaz.

A bimolekuláris lipid membrán + klorifill rendszeren széleskörű vizsgálatokat végeztek: tanulmányozták az elektromotoros erő fény hullámhossztól, intenzitástól, időtől, az A és D molekuláktól való függését. További fontos ismeretek szerezhetők, ha a krolofill mellett más fényabszorbeáló pigmenteket pl. karotint is építenek a membránba.

A bimolekuláris lipid membránok egyelőre csak nagyon kis felületen (1–2 mm átmérőjű kör) valósíthatók meg és időbeli stabilitásuk nagyon csekély (néhány óra).

Sokkal stabilabb képződménynek bizonyult a Halobacterium halobiumból előállítható bakteriorodopszin, mint fényabszorbeáló közeg segítségével képzett rendszer. A baktérium majdnem telített só oldatokban él, szaporodik. Ilyenek pl. azok a nyitott medencék, amelyekben a tengervíz elpárologtatásával sót termelnek. Laboratóriumi tenyésztésük is egyszerű, nem kíván steril körülményeket. A bakteriorodopszin egy fehérje és fényabszorbeáló pigment molekula kapcsolata (lényegében hasonló a szemben levő fényérzékeny rodopszinhoz.) A baktérium membránjában kisebb szigetekben helyezkedik el hexagonális rácsszerkezetben. A baktériumot szétpukkasztva a membrándarabkák (bíbormembrán a nevük) struktúrájukat és funkciójukat megtartva kerülnek az oldatba, ahonnan centrifugálással elválaszthatók. Egy kis membrándarabka átmérője 0,5 μ, vastagsága 48 Å, és kb. 10^5 orientáltan elrendeződött molekulát tartalmaz. 75% a bakteriorodopszin és csak 25% a rácsszerkezet kialakításában szerepet játszó lipid molekula.

A bíbormembrán két oldalának a felületi szerkezete és elektromos töltése különböző (A, B oldal). Fény hatására protonok szabadulnak fel a B oldalon és a membrán az A oldalon protonokat vesz fel. Az élő baktériumban ez a folyamat egy

elektrokémiai gradienst tart fenn a sejtfalon keresztül.

Ez a folyamat szintén használható a fényenergia elektromos energiává való átalakítására. A bíbormembránokat Ca^{2+} ionok hozzákötik azolektinből készített sík membránhoz. A membránt körülvevő oldatba helyezett elektródákon 150 mV fotofeszültség mérhető.

A rendszer élettartamát növelni kívánva milipor szűrőt impregnálnak foszfolipid molekulákkal és ehhez kötik hozzá Ca^{2+} ionok segítségével a bíbormembránokat. Kb. egy cm átmérőjű membránt készítenek így, amelyet megvilágítva legalább egy hétig működőképes rendszert lehet kapni, 60 mV fotofeszültséggel. Három ilyen membránt „sorbakapcsolva", a fotofeszültség háromszorosra növekedik. Teljesítményben és élettartamban ez a rendszer látszik a jelenleg a legígéretesebbnek a napenergia bioanalóg módon való átalakítására.

Az elmondottakból kitűnik, hogy széleskörű kutatás folyik világszerte a témakörben. Az eredményes vizsgálatok jelentősége óriási lehet. Jelenleg úgy látszik, hogy inkább kis egységeket lehet majd gyakorlatilag használni, kisebb és elszórtabb energia igények kielégítésére. A várható eredményekre egyelőre csak becslések vannak. Az USA energia kutatásokat koordináló szervének a becslése szerint 1985-ben mintegy 1%, 2000-ben mintegy 6% és 2020-ban mintegy 25% lehet a napenergia átalakító rendszerek részesedése az ország energia termelésében. Ha ezt elfogadjuk, akkor belátjuk, hogy kutatások hosszú távon jelentenek konkrét hasznot, amennyiben a jelenleg ismert tényekre alapozzuk a becsléseket. Ha azonban a fotoszintetikus folyamatok megértésében lényeges előrelépés történik, akkor a becslések könnyen túl óvatosnak bizonyulhatnak.

AZ IPARI ZAJ MINT MÉRÉSTECHNIKAI ÉS EGÉSZSÉGÜGYI PROBLÉMA

Tarnóczy Tamás
MTA Akusztikai Kutatólaboratóriuma

Összefoglalás

A zaj nagysági jellemzőjének meghatározása háromféle méréstechnikai feladatot jelent. A zajforrások csak úgy jellemezhetők és minősíthetők, ha a térbe sugárzott összes zajteljesítményüket ismerjük. Az emberre ható zaj azonban csak a tartózkodási helyen mérhető intenzitásadattal írható le. Végül a zajnak adagszerű hatása is van, ami a nagysági adat statisztikájával és időtartamával van kapcsolatban. Az újszerű feladatot főként az a tény jelenti a fizikus számára, hogy az emberen jelentkező hatás pszichológiai oldalról nehezen fogható meg. Az egyetlen ellenőrzési lehetőség az idő folyamán jelentkező halláskárosodás, ami viszont a „korral járó" hallásveszteségtől nehezen választható el. A korszerű kutatások az utóbbi probléma tisztázására irányulnak.

A zajmérések paradoxona

A „*noise*"szónak kétféle definíciója van. Fizikai tulajdonságok szerinti osztályozásban folytonos vagy közel folytonos színképű zörejt jelent. Ez esetben a határozott hangmagasságú zenei hangokkal állítható szembe. Pszichológiai hatása szempontjából a „*noise*" a kellemetlen vagy a zavaró hangokat jelenti. S ekkor a kellemes hatású vagy hasznos információt hordozó hangokkal áll szemben. A magyarban a két tulajdonság megjelölésére a „*zörej*" és a „*zaj*" szót használjuk. Az alábbiakban tehát a zaj fogalma a pszichológiai hatásra vonatkozik.

A Nemzetközi Fizikai Unió „Fizika az iparban" c. konferenciáján Dublinban 1976. március 12-én tartott előadás bővebb változata.

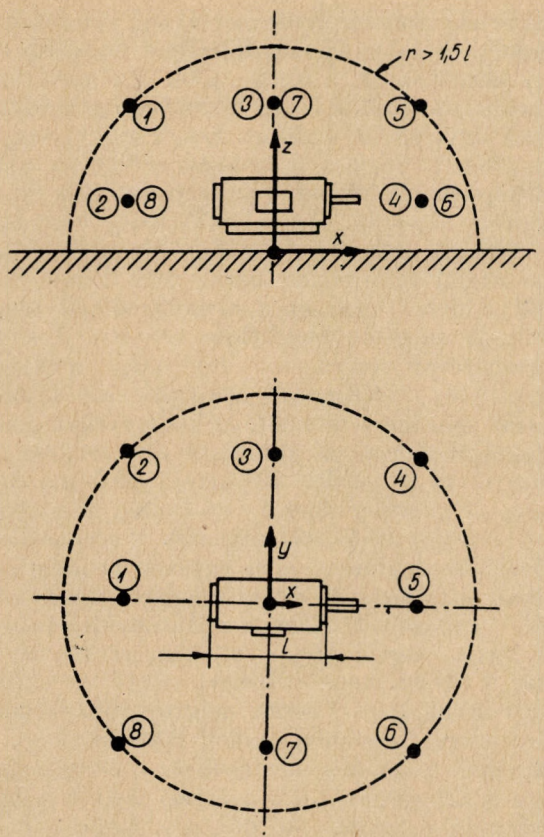
A hatás jellemzése szempontjából elsősorban a hang nagysági értéke határozandó meg. A zajmérés legfontosabb adata tehát a hang fizikai intenzitása. Úgy gondolható, hogy ebből a célból a zajforrás zajkeltési hatásfoka ill. zajteljesítménye a meghatározandó adat. Az emberre gyakorolt hatás szempontjából azonban egy ilyen adat nem mond sokat. Akármilyen nagy zajt bocsát ki egy gép vagy szerkezet, a távolban tartózkodó emberre nincs hatása. Ezért teljesen függetlenül az előző adattól, azt is mérnünk kell, hogy az ember tartózkodási helyén mekkora az embert ért hatás, mekkora az ember zavartsági foka.

Mindkét mérés igen fontos. A zajforrás teljesítménye a gépek minősítése és a zajcsökkentés konstrukciós lehetősége szempontjából nélkülözhetetlen adat. A zajosság vagy kellemetlenség meghatározása viszont az ember megvédése és a megengedhető zajszintek szabályozása érdekében szükséges. A zajmérési technika érdekes paradoxona, hogy sem az egyik, sem a mások adat *közvetlenül* nem mérhető. Mérőműszereinkkel csak a tér valamely pontjában uralkodó hangnyomást illetve hangnyomásszintet tudjuk meghatározni.

A megoldandó feladat tehát az, hogy hangnyomás mérésekből kell rekonstruálnunk egyrészt a zajforrás teljesítményét, másrészt az ember zavarásának vagy veszélyeztetettségének mértékét.

A zajteljesítmény mérése

A könnyebbnek látszó fizikai feladat paradoxona, hogy a hangteljesítmény a forrás állandója, a mérhető hangnyomás azonban a közegállandók és a hangtér függvénye. Helyes méréshez pontosan definiált hangtérre van szükség, pl szabad haladó



1. ábra. Zajos gép „szabadtéri" körülmérésének egyszerűsített szabványos elrendezése, ha a 8-pontos mérés elegendő. Nagyobb gépeknél és megengedettnél nagyobb értékingadozás esetén a mérési pontok száma emelkedik.

hullámú vagy zárt diffúz térre. Fontos követelmény még a hangforrás közelítőleg pontszerű volta. Az ilyen térben végzett mérésekből a hangteljesítmény átszámításának további nehézsége, hogy az alapszintek megegyezése csak valós $z = \varrho_0 c = 400$ MKS értékű karakterisztikus impedancia esetén áll fenn. A levegő ún. normálállapotában (1000 mbar légköri nyomás, 0% páratartalom 0°C hőmérséklet, 0,03 mol % CO_2 tartalom) az eltérés a kétféle alapú szint között 7%. Ez természetesen korrekcióba vehető.

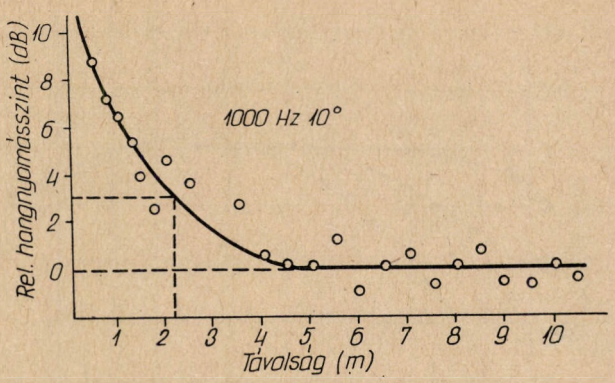
A mérés gyakorlati kivitele az akusztikai sugárzás *Poynting*-féle tételén alapszik:

$$\iint |pv| \cos(n, v)\, dS = -\frac{\partial}{\partial t}\left[\frac{1}{2}\iiint \varrho_0 v^2 dV + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{2}\iiint K p^2\, dV\right]$$

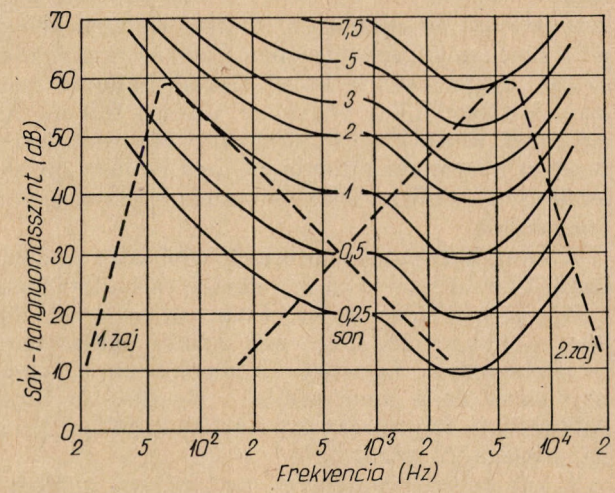
ahol p és v a hangnyomás ill, a részecskesebesség, ϱ_0 és K pedig a közeg sűrűsége, ill. adiabatikus összenyomhatósága.

Az összefüggés azt fejezi ki, hogy a térbe adagolt összes sugárzási teljesítménnyel az összenergia időbeli disszipációs csökkenése tart egyensúlyt. A szabadtéri vagy fél-szabadtéri mérés során a bal oldalt határozzuk meg. A végesszámú körülméréssel helyettesített integrálás (1. ábra) meglehetősen korlátozott pontosságú [1]. A jobb oldal viszont tökéletesen diffúz térben határozható meg. Ez a mérés ugyan egyszerűbb, de valójában ezúttal sem elégedhetünk meg egyetlen méréssel [2], hiszen a tökéletes diffúz tér sem valósítható meg (2. ábra).

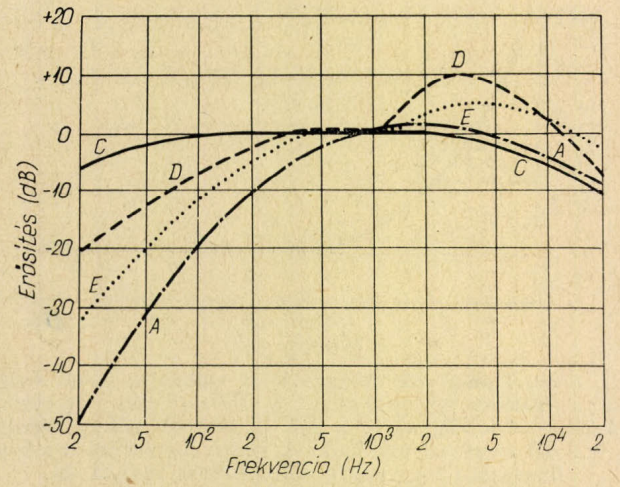


2. ábra. Hangforrás hangterének változása a távolság függvényében egy teremben. A kihúzott görbe az elméletileg várt függvény, a mérési pontok ehhez képest ± 1 dB szórással adódnak. A 10° a mérési iránynak a hangszóró tengelyétől való eltérést tünteti föl.

A nehézségekkel és a megoldásmódokkal kapcsolatban *Hübner* előadására [3] és *P. François* nemrég megjelent dolgozatára [4] utalunk. Ezúttal arra problémára irányítjuk figyelmünket, hogy e fizikai adat meghatározásában sem nélkülözhetjük a szubjektív elemeket. Ilyen már maga az a tény, hogy minden mérést a hallható tartományban, azaz egy megfelelő szélessávú szűrővel végzünk. De fontosnak látszik a hallás frakvenciajellegének figyelembe vétele is. A 3. ábrán kétféle zörej színképét ábrázoltuk. Egyik közülük alig hallható zajként hat az emberre, a másik terhelően zavaró. Ugyanakkor a fizikai hangteljesítményük nagyjából azonos. Ha a gép zajteljesítményének jellemzésében ezt a különbséget nem vennénk figyelembe, sokszor igen drága és teljesen



3. ábra. Két elméletileg elképzelhető zajszínkép ábrázolása az egyenlő hangosságok görbeseregében. Az 1. zaj mélyhangú összetevői 1 son hangosságot, a 2. zaj magashangú zörejei 7,5 son hangosságot érnek el. A két zavartatási érték között mintegy 8-szoros az arány.



4. ábra. A zajmérő műszerek szokásos erősítési, azaz „súlyozó" jelleggörbéi. Az A-görbe a mai zajmérések emberi hatásának értékelésére használatos, de a valóságos hatásnak a D-, vagy az E-görbe jobban megfelelne.

fölösleges megoldásokba kényszerítenénk a tervezőket.

Világos tehát, hogy a forrás zajteljesítményét is az emberi zavarás oldaláról kell szemlélnünk. Ezért alakult ki a hallási érzékelés frekvenciafüggését úgy-ahogy figyelembe vevő A-szűrővel való mérés (4. ábra). Ez nem egészen következetes gyakorlat, mivel a hangosság és még inkább a zajosság frekvenciagörbéinek a D- vagy az E-szűrő sokkal jobban megfelel.

A kellemetlenség fokának meghatározása

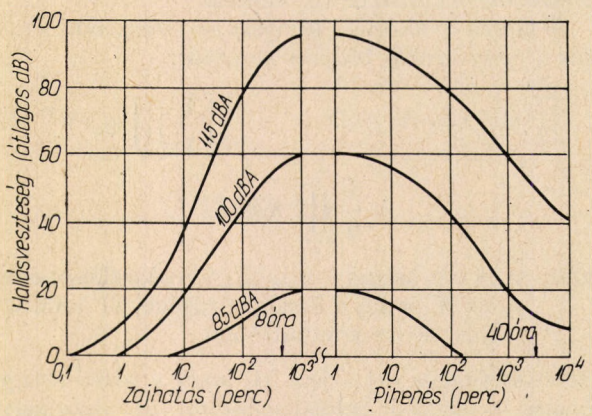
Sokasodnak a nehézségek, ha az ember zavartatását kívánjuk objektív méréssel meghatározni. Az alap ezúttal is hangnyomásmérés, amit az ember tartózkodási helyén (a fülénél), de az ember távollétében kell végrehajtani, hogy a jelenlevő személy a teret ne torzítsa el. A hallójáratban végzett szondás mérések azonban arra vallanak, hogy a fül mechanikai felépítésében olyan nagy az egyéni szórás, hogy azonos külső fizikai hangtér nem azonos viszonyokat hoz létre a belső fülben. Az egyénileg mutatkozó érzékenységi eltérések tehát részben anatómiai különbségekben és nem okvetlenül csak idegfiziológiai, és pszichológiai okokban keresendők.

A hang hatásának mértékéül többfajta pszichikai értékelést vehetünk figyelembe. A hallott hang tulajdonságai közül a legjobban ismert értékelési adat a hangosság, amelynek fizikai paraméterei is tisztázottak. Legnagyobb mértékben a hangnyomástól és a hang színképi eloszlásától függ. Állandósult, folytonos vagy vonalas színképű hang hangossága jól számítható.

A zaj kellemetlenségére vagy zavaró hatására vonatkozó emberi válaszok azonban azt mutatták, hogy a hangosság nem pontosan fedi a zavartatás mértékét. Ezért különféle zajossági kritériumok bevezetésére is sor került. A zavarás emberi értékelését bizonyos mértékben befolyásolja a színkép. A zajosság megítélésében nagyobb súllyal jelentkeznek a 3000—4000 Hz körüli frekvenciák, amit pl. a D- és E- súlyozó görbével veszünk figyelembe (4. ábra). Ennél sokkal nagyobb jelentőségű, hogy a hangosság értéke az időben másképpen alakul, mint az ugyanarról a hangról megítélt zajosság. Az állandó hang hangossága kb. 200 ms után éri el legnagyobb értékét, majd kismértékű adaptációs hatás jelentkezik, végül beáll az időtől független, pszichológiailag is állandó érték. A zajosság megítélése azonban 1 s után folyamatosan növekszik, amit idegi reakciónak tekinthetünk. *Kryter* és *Pearsons* [5] kísérletei szerint igen nagy intenzitású keskenysávú zörejek zajosságát kétszeres idő alatt úgy ítéljük meg, mint ha az az eredeti időtartam alatt 4,5 dB-lel nagyobb intenzitásszintű lett volna. A kísérletet 90 dB és 110 dB között végezték, 2 s vonatkozási idővel. Az eredmény nem egyezik az idegfiziológiában általában érvényes energia elvvel, amely szerint kétszeres idő alatt a szállított idegenergia is kétszeres, vagyis olyan, mintha az eredeti idő alatt 3 dB-lel megnövekedett szintű lett volna. Ezért az említett kísérlet még további megerősítésre szorul. Továbbá el kell dönteni, hogy mit tekintünk a zavarás mértékének: a hangosságot-e vagy a zajosságot, ill. *a zajosság melyik fajtáját?* Manapság ugyanis már mintegy 20-fajta definíciót és számítási módszert ismerünk arra, hogy a zaj emberre gyakorolt zavarási fokát megállapítsuk.

A halláskárosodás kockázata

A hangosság és zajosság sok esetben nem kielégítő adat az ember zavartatási fokának meghatározására. A zavartatás *pszichológiai* mérték, amit helyes volna *fiziológiailag* vagy egészségügyileg is kimutatható adatokkal alátámasztani. Annál is inkább, mert az egyéni érzékenység nagy szórása miatt a tűrési határértékek megállapításához az



5. ábra. Átlagos hallásveszteség (az 500, 1000 és 2000Hz frekvencián mért adatok középértéke) különféle erősségű és hatóidejű zajok esetén. Látható, hogy 8 órai, 85 dBA erősségű zaj hatása még másfél óra alatt kipihenhető, de 100 dBA erősségűé már egy hét alatt sem.

adatok statisztikus eloszlásának ismeretére is szükség van. A különféle próbálkozások, mint pl. a zaj hatására bekövetkező vérnyomás megváltozásának mérése vagy az alvás megzavarásának regisztrálása, nem hoztak egyértelmű és megbízható eredményeket. Az egyetlen jól megfogható, és méréssel is mindig ellenőrizhető adat a *maradandó* halláscsökkenés [6]. Hosszabb idejű zajos környezetben tartózkodás után időszaki hallásveszteséget szenvedünk. Ez a veszteség idővel rendbejön, a hallás eredeti érzékenysége visszaáll (5. ábra). Bizonyos intenzitású zajban eltöltött hosszabb idő alatt azonban a hallásveszteség állandósul, többé az eredeti hallásérzékenység nem áll vissza. Ez a maradandó hallásveszteség, amit aztán bármikor megismételhetően ki lehet mutatni.

A zajadag a már említett energia elv alapján számítható vagy mérhető. Ezt az elvet, elég sok állatkísérlet támogatja, tehát a számításokhoz helyesebbnek látszik, mint az időfelezéshez 4,5 dB szintnövekedés kapcsolása. Az ISO szabványok [7] az energia elv szerint írják elő az ún. *„egyenértékű zajszint"* kiszámítását időben változó intenzitású zajhatás átlagos értékének meghatározására:

$$L_{eq} = 10 \lg \left(\frac{1}{100} \sum t_i \; 10^{L_i/10} \right)$$

ahol t_i időszázalék, amelyben
L_i A-szintű zajérték mérhető.

Az egyenértékű zajszint, amit végeredményben A-szintű hangnyomásmérések időbeli eloszlásának összegezésén alapszik, már megfelelőnek látszik a maradandó halláskárosodással való korreláció vizsgálatára; de csak akkor, ha a színkép elég egyenletes, nincsenek benne tisztahang összetevők és nem tartalmaz igen rövididejű elemeket.

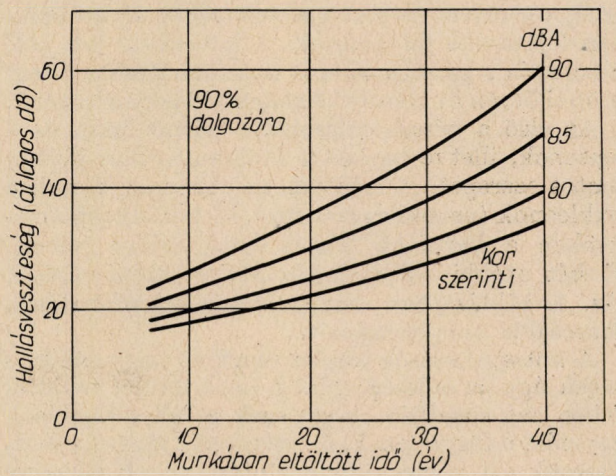
Az 1 ms időtartalomnál rövidebb impulzushangok jelenléte azért okoz problémát a halláskárosodás szempontjából, mert a viszonylag nagy időállandójú (35 ms, 125 ms és 1000 ms) műszereink nem képesek valódi amplitúdójukat meghatározni [8]. Ezek az időállandók a fül integrációs idejének utánzásaként alakultak ki, ámde a leolvashatóság érdekében a gyorsabb felfutási idő mellett is lassú lefutási időket kellett beiktatni. Az impulzus hangok okozta halláskárosodások vizsgálata során. *Coles* és *mások* [9] azt következtették, hogy az impulzusok csúcsértéke és időtartama dönti el a halláskárosodás mértékét. Ezért szükség lehet olyan műszerekre is, amelyek ezeket az adatokat is szolgáltatják. *Brüel* [10] 30 μs-ra becsüli fül elemzési idejét, és ilyen műszerrel végzett újabb, igen érdekes méréseket. Eszerint az elektroakusztikai rendszerek hangjának mérésekor egy valódi impulzus mérés 2—4 dB-lel szolgáltat nagyobb szintet, mint a hagyományos (1000-szer nagyobb integrációs idővel rendelkező) mérés. Közlekedési és háztartási zajoknál ez a különbség 8—12 dB-re növekszik, végül ütődési zajoknál, légkalapácsoknál, fegyverropogásnál 25—30 dB-t is elérhet. Mindez arra vall, hogy a halláskárosodási kockázat az impulzushangokkal nagy mértékben növekszik, s így ezek mérését is be kell venni a kötelező akusztikai mérések közé.

A korral járó hallásveszteség

A halláskárosodás nemcsak mérési és *egészségügyi*, hanem *jogi* probléma is, hiszen munkahelyi ártalom esetén a dolgozót kártérítés illeti meg. Mivel maga az ártalom rendkívüli esetektől eltekintve az időben halmozódó zajadag függvénye, csak zajban eltöltött hosszabb idő után mutatható ki. Igen ám, de régóta ismeretes a korral járó hallásveszteség ténye is, amit tömeges mérési eredmény támaszt alá [11]. A jelenlegi nemzeti és nemzetközi gyakorlat általában 80—85 dBA-ban jelöli meg azt a zajhatárt, amelyben eltöltött napi 8 órai munka mellett a halláscsökkenés nem nagyobb mértékű, mint a korral járó hallásveszteség (6. ábra).

Az ellenőrző mérések eredményei azonban igen nagy szórást árulnak el, ezért az előző adatot statisztikailag úgy értelmezzük, hogy a határ a dolgozók bizonyos százalékára (pl. 90%-ára) vonatkozólag jelent biztos védelmet. E tekintetben azonban még egyáltalán nem elegendők a mérési adatok. Nem ismerjük eléggé az egyéni érzékenység, a külső és belső tényezők hatását.

Újabban kételkedni kezdünk a korral járó hallásveszteség eddigi statisztikáinak hitelességében is. *Hinchcliffe* [12] több esetben is hivatkozik kísérleti tényekre, amely szerint természeti népeknél *nem ismeretes* a korral járó hallásveszteség. Elképzelhető tehát, hogy az iparilag fejlett országokban éppen a normális élettel összefüggő zajártalomról van szó. Ebben az esetben azonban másként kell értelmezni a 6. ábra görbéit, sőt fölül kell vizsgálnunk a presbyacusis és a halláskárosodás



6. ábra. A maradandó halláscsökkenés értéke (átlagos hallásveszteségben) a zajban eltöltött idő függvényében, a dolgozók 90%-ára. Az egyes görbék a ható zaj egyenértékű zajszintjére vonatkoznak, a legalsó a „korral járó" hallásveszteséget tünteti fel. A kor leolvasására az alsó számokhoz + 20 adandó, mivel a munkakezdés átlagos kora 20 év.

kapcsolatáról eddig vallott felfogásunkat is. Esetleg szó lehet a zajhatárok megszigorításáról, annak ellenére, hogy különleges halláskárosodást nem idéznek elő.

Amellett állatkísérletek utalnak a halláskárosodásnak más tényezőktől, pl. a klímától és a táplálkozástól való függésére is. Az ebben az irányban folytatandó kutatások reményt nyújtanak arra, hogy az embernek a zajon keresztül erősen megtámadott hallási, idegi és közérzeti állapotát, tehát egészségének egyik összetevőjét, hatékonyabban tudjuk a jövőben megvédeni.

IRODALOM

1. ISO: Determination of sound power levels of noise sources. Precision methods for anechoic and semi-anechoic rooms. ISO/DIS 3745 (1975)
2. *T. Tarnóczy*, Bedeutung, Messung und Berechnung der Energieäquivalenz-Fläche. Intern. Fachtagung Bau- und Raumakustik, Dresden 1957, 112
3. *G. Hübner*, Industrial noise sources — Developments in methods of measurement and assesment of noise output. First Intern. Conf. on Physics in Industry, Dublin 1976, Paper 5.3.1
4. *P. François*, Apport de la normalisation dans la détermination de la puissane acoustique des machines équipements. Revue d'Acoustique *8/35*, 7 (1975)
5. *K. D. Kryter—K. S. Pearsons*, Some effects of spectral content and duration on perceived noise level. J. Acoust. Soc. Amer. *35*. 866 (1963)
6. *D. W. Robinson*, Occupational Hearing Loss. British Acoust. Soc. Special Volume No 1., London 1971 — *W. Burns*, Noise and Man. 2nd Edition, J. Murray London 1973
7. ISO: Assessement of occupational noise exposure for hearing conservation porposes ISO/R 1999 (1975)
8. IEC: Recommendations for precision sound level meters. Publication 179 (1965) — Recommendations for impulse sound level meters. Publication 179A (1973)
9. *R. R. A. Coles* et *al.*, Hazardous exposure to impulse noise. J. Acoust. Soc. Amer. *43*, 336 (1968)
10. *P. V. Brüel*, Noise — Do we measure correctly? B et K. Naerum, Danmark 1975
11. *K. D. Kryter*, Hearing Damage Risk. Proc. Internoise 1974, 547
12. *R. Hinchcliffe*, Population studies concerned with presbycusis. Ind. J. Otolaryng. *20*, 52 (1968)

ALAPVETŐ KÖLCSÖNHATÁS-E A GYENGE KÖLCSÖNHATÁS?

Vatai Endre
ATOMKI, Debrecen

A megismerés fontos momentuma a jelenségek lényeges, fontos vonásainak elválasztása a lényegtelenektől. Az egyik ilyen lényeges momentum a kölcsönhatások erőssége. A leggyengébb kölcsönhatás a gravitáció. Hatása a jelenlegi ismereteink szerint csak nagy tömegek jelenléte esetén dominál; ez a kölcsönhatás irányítja az égitestek mozgását.

Érthető, hogy az emberiség ezt ismerte fel legelőször, elméletét Newton alkotta meg első formájában. A gravitáció hosszú hatótávolságú, hasonlóképpen az elektromágneses kölcsönhatáshoz, amit másodikként ismertek fel. Az elektromágnesesség (EM) törvényei szerint mennek végbe az atomokban lejátszódó folyamatok. A következő két kölcsönhatás a gyenge és erős kölcsönhatások, a legutóbbi ötven év fontos felismerései közé tartoznak.

Az első a béta-bomlásokban jelenik meg, és a leptonok, illetve barionok átalakulásában játszik fontos szerepet. A második az atommag részei, a nukleonok (proton és neutron), illetve tágabb értelemben a barionok között ható erőket jelenti. E két utóbbi kölcsönhatás rövid hatótávolságú. Az. 1. táblázatban összegezzük a kölcsönhatások fontosabb tulajdonságait.

A kölcsönhatások között meglevő nagy különbségek úgy az erősség, mint a ható terület tekintetében azt sugallják, hogy ezek a kölcsönhatások egymástól függetlenek, ún. *alapvető kölcsönhatások*. Tesszük ezt a megkülönböztetést annak ellenére, hogy érezzük: mindegyik kölcsönhatás ugyanannak az általános ANYAG-nak a különböző, vagy különböző körülmények között a felszínre kerülő, tulajdonságait jelenti. Ehhez járul még az, hogy az utóbbi időben egyre többet hallunk az elektromágneses és gyenge kölcsönhatások egységes elméletéről, amit Weinberg alkotott meg 1967-ben Innen már csak egy lépés vezet annak a kérdésnek a feltevéséhez, hogy alapvető kölcsönhatás-e a gyenge kölcsönhatás. Természetes ugyanis feltételezni, hogy a mindennapi életben és gyakorlatunkban olyan fontos szerepet játszó elektromágnesesség fontosabb és alapvetőbb a gyenge kölcsönhatásnál. Így van-e ez? E kérdést szeretnénk tisztázni a jelen dolgozatban.

I. A béta-bomlás és megismerésének rövid története

Radioaktív magok béta-bomlását már a század elején felfedezték, az elektronbefogást és pozitronemissziót csak az 1930-as években. A legismertebb, β-bomlás útján végbemenő átalakulások típusai a következők:

1. Müon bomlása: $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$. Ebben a folyamatban csak leptonok vesznek részt, így az erős kölcsönhatások módosító szerepe nem lép fel.

2. Barionok átalakulása, pl.:
Neutron bomlása: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$
müon befogás: $\mu^- + p \rightarrow n + \nu_\mu$ stb.

3. Magok béta-bomlása.

A béta-bomlás első elméletét Fermi alkotta meg, nem sokkal Pauli neutrino hipotézisének megjelenése után. Érdekes megjegyezni, hogy elméletét az elektromágneses átmenet (sugárzás) analógiájára építette fel, az elektront és neutrinót a gyenge-kölcsönhatási tér kvantumainak tekintve.

Az elektromágneses kölcsönhatás sűrűsége az ej_μ vektoráram és A_μ vektorpotenciál között:

$$H = \sum_n \sum_\mu e\, j_\mu (r_n)\, A_\mu (r_n), \qquad (1)$$

1. táblázat

Kölcsönhatás	Dimenziónélküli csatolási állandó	Hol diminál?
Erős	$g^2/\hbar c \sim 1$	magban
Elektromágneses	$e^2/\hbar c = 1/137$	atomi jelenségek
Gyenge*	(1) $\tilde{g}(e) \sim 3{,}1 \times 10^{-12}$ (2) $\tilde{g}(p) \sim 10^{-5}$	β-bomlás
Gravitáció	$\gamma m_p/e^2 = 0{,}8 \times 10^{-36}$	égitestek mozgása

* $\tilde{g}(i) = g_F/(m_i c^2 \lambda\!\!\!^{-}_{ci})$, ahol m_i és $\lambda\!\!\!^{-}_{ci}$ az elektron (1) illetve proton (2) tömege és Compton hossza ($\lambda\!\!\!^{-}_{ci} = \hbar/m_i c$).

ahol r_n az n-ik részecske helyzetvektora,

$$j_\mu = \psi_\nu \gamma_\mu \psi_k, \qquad (2)$$

ahol ψ_ν és ψ_k a vég- és kezdeti állapot hullámfüggvénye, γ_μ a Dirac matrix.

A Fermi féle elmélet szerint a béta-bomlás kölcsönhatási sűrűsége hasonló az elektromágneses sugárzáséhoz:

$$H = \sum_n \sum_\mu g J^+_\mu (r_n) L_\mu (r_n) \qquad (3)$$

ahol $J_\mu = \bar{\psi}_p \gamma_\mu \psi_n$ a nukleon áram és $L_\mu = \psi_e \gamma_\mu \psi_\nu$ a leptonáram.

Az itt jelentkező teljes analógia azonban a későbbiek során fellazult, illetve megszűnt, mivel kiderült, hogy a magspin megváltozhat bizonyos β-átmenetekben. Ezek értelmezésére a tiszta vektorkölcsönhatás már nem volt elegendő. Ezért hosszú évek során a skalár, tenzor és pszeudoskalár kölcsönhatásokat részesítették előnyben, ami az EM kölcsönhatással minden analógiát megszüntetett.

Az 1950-es évek második felében a béta-bomlást létrehozó kölcsönhatásokról egyértelműen kiderült, hogy azok *a vektor és axiálvektor* kölcsönhatások kombinációjából állnak. Ez azt jelenti, hogy a (3) képletben γ_μ helyett $\gamma_\mu (1 + \gamma_5)$ áll. Ekkor az analógia a gyenge és EM kölcsönhatások között ismét előtérbe került.

Egy másik fontos tényről kell még megemlékeznünk: ez a *gyenge kölcsönhatás univerzális volta.* Ez azt jelenti, hogy a gyenge kölcsönhatás erőssége (csatolási állandója) változatlan a legkülönbözőbb bomlások esetében. Pl.: müon bomlásában, müon befogása proton által, neutron, illetve magok β-bomlásában kb. ugyanaz a csatolási állandó. Természetesen figyelembe kell venni néhány kisebb korrekciót, illetve az axiálvektor kölcsönhatás átnormálódását magok béta-bomlásában. Ez utóbbi jelenséget az okozza, hogy a magban levő nukleon idejének egy részében virtuális pionokat emittál az erős kölcsönhatás létrehozására.

A fenti tényezők lehetővé teszik egy egységes, univerzális β-bomlás elmélet kialakítását, másrészt az összefüggés keresését az elektromágneses kölcsönhatással.

Az elektromágneses és gyenge kölcsönhatás egységes elméletének kidolgozására már az 50-es évek végén és 60-as évek elején volt néhány próbálkozás. Két alapvető nehézséggel találták magukat szemben a kérdéssel foglalkozó kutatók:

1. Közismerten a foton nulla nyugalmi tömegű, illetve nyugalmi tömege nem mutatható ki. Ugyanakkor feltételezve, hogy a normált gyenge csatolási állandó az elektromos töltéshez ($e^2/\hbar c$) hasonló nagyságú (1. táblázat), a fotonnal analóg W vektor bozon tömegére

$$m_w \approx (137 \times 10^{-5}\ m_p^{-2})^{-1/2} \approx 30\ GeV$$

adódik abból a feltételből, hogy e^2/m_w^2 a Fermi csatolási állandóval azonos nagyságrendű kell legyen ($\hbar = c = 1$ egységekben). Az 1. táblázatban a gyenge kölcsönhatás dimenzió nélküli csatolási állandója így $g_F/(m_w c^2 \lambda\!\!\!^{-3}_w) \approx 1/137$ lesz.

A foton és a vektor-bozon ennyire különböző nyugalmi tömegét a szokásos elméletekben nehéz összeegyeztetni.

2. Nehézségbe ütközik a gyenge kölcsönhatás nagyenergiájú viselkedésének értelmezése. A vektor-bozon egyszerű bevezetése javított a lepton-lepton szórás aszimptotikus viselkedésén, de más esetekben (pl. $\nu - \bar{\nu}$ szórás) rontott.

II. Weinberg modell

Ezekből a nehézségekből 1967-ben Weinberg, illetve 1968-ban Salam mutatott meg egy lehetséges kiutat. Elméletük kiinduló pontját az képezi, hogy a közbenső vektor-bozon és a γ-kvantum egyformán egy Yang-Mills típusú vektor tér kvantumai. Ezek a terek elsődlegesen helyileg egzaktul mértékinvariánsak. A vektor-bozonok véges nyugalmi tömege a mértékinvariáns csoport *szimmetriájának spontán sértéséből adódik.* Ezt a jelenséget a felfedezőjéről Higgs mechanizmusnak nevezik. A Higgs mechanizmus felhasználásával kettős célt értek el.

1. Sikerült értelmezni a foton és vektor-bozon nyugalmi tömegének különbözőségét. A fotontömeg zérus marad, mert a megfelelő alcsoport szimmetriája nem szenved spontán sérülést — összhangban az elektromos töltésmegmaradással. A vektor-bozon viszont sérült szimmetriának felel meg, amit a leptonok és barionok tömegkülönbsége is mutat.

2. Már korábban is feltételezték, 1967 után pedig igazolták is, hogy a Lagrange-függvényben explicite jelenlevő nyugalmi tömeg akadályozza meg a renormalizálható elmélet megalkotását. Az új elméletben nyugalmi tömeg nem szerepel, így várható volt, később be is bizonyították, hogy az elmélet renormalizálható az elektrodinamikához hasonlóan. Ez annyit jelent, hogy az elméletben megjelenő végtelenek kölcsönösen kompenzálódnak.

Magát az elméletet nem szükséges itt részletezni, a megfelelő eredmények felsorolása azonban mindenképpen hasznos lesz.

Weinberg a lehető legegyszerűbb mértékivariáns csoportot használta fel, amelyben a lepton-multiplettek nem redukálható reprezentációja a következő:

$$\left(\frac{1+\gamma_5}{2}\right)\begin{pmatrix}\nu_e\\ e^-\end{pmatrix} \qquad \left(\frac{1-\gamma_5}{2}\right)e^-$$

$$\left(\frac{1+\gamma_5}{2}\right)\begin{pmatrix}\nu_\mu\\ \mu^-\end{pmatrix} \qquad \left(\frac{1-\gamma_5}{2}\right)\mu^- \qquad (4)$$

A jobbforgású dublettekre a Q elektromos töltésen kívül a T lepton „izospin" is hat, így meghatározható egy Q-hoz hasonlóan izoskalár „hipertöltés":

$$Y = T_3 - Q, \qquad (5)$$

amely kommutál T-vel. A mértékivariáns csoport így az SU (2) és U (1) csoportok direktszorzatából áll, a megfelelő A_μ és B_μ mértékinvariáns terekkel, amelyeket a „lepton töltés" (gT) és hipertöltés ($g'Y$) hoz létre. g és g' független csatolási állandók. Q-t kifejezve a két utóbbi töltésen keresztül:

$$Q = (1/g)\ (gT_3) - (1/g')\ (g'Y). \qquad (6)$$

Ennek a töltésmegmaradás miatt sértetlen szimmetriának felel meg a nyugalmi tömeg nélküli vektor-bozon, a foton, amely az A_μ vektortérhez kapcsolódik

$$A_\mu \sim \frac{1}{g}A_{3\mu} - \frac{1}{g'}B_\mu. \qquad (7)$$

Az erre merőleges kombinációból adódik a semleges nehéz vektor-bozon tér

$$Z_\mu \sim \frac{1}{g}A_{3\mu} + \frac{1}{g'}B_\mu \qquad (8)$$

míg a megmaradó mértékinvariás terekből komplex tereket képezve kapják a töltött nehéz vektorbozonokat,

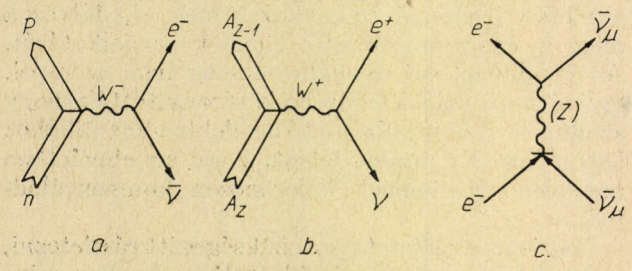
$$W_\mu \sim \frac{1}{\sqrt{2}}(A_{1\mu} + iA_{2\mu}). \qquad (9)$$

Idézzük még a nehéz bozonok tömegére kapott értéket:

$$m_w = \frac{37{,}3\ GeV}{\sin\theta} \qquad (10)$$

$$m_z = 74{,}6\ GeV/\sin(2\theta),$$

ahol θ az $A-Z$ terek keveredési szöge, $tg\ \theta = g'/g$.



1. ábra. A β-bomlás leírása közbenső vektor-bozonok segítségével.

Összefoglalva az 1967-es Weinberg modellből a foton mellett három nehéz (2 töltött és egy semleges) vektor-bozon adódik. A töltött vektor-bozonok hozzák létre a szokásos β^--bomlást (1a ábra) és elektronbefogást és β^+-bomlást (1b ábra).

A semleges Z bozon azonban új, a szokványos elméletben nem szereplő folyamatokat enged meg (pl. 1c ábra).

Megjegyezzük, hogy a fentiekhez hasonlóan olyan modell is szerkeszthető, amelyben az egyedüli semleges részecske a foton. Ezt el tudják érni, ha triplet reprezentációt használnak a szokásos bispinor helyett:

$$\psi^L = \frac{(1+\gamma_5)}{2}\begin{pmatrix}E^+\\ \nu_e\sin\beta + E^\circ\cos\beta\\ e^-\end{pmatrix} \qquad (12)$$

$$\psi_R = \frac{(1-\gamma_5)}{2}\begin{pmatrix}E^+\\ E^\circ\\ e^-\end{pmatrix} \qquad (13)$$

Ebből az elméletből $m_w = 53{,}0\ GeV \cdot \sin\beta$ adódik a vektor-bozonok tömegére, ami 53 GeV-es felső határt jelent. Ezt a modellt az 1974-ben közölt kísérleti eredmények cáfolni látszanak. Ezek igen valószínűvé teszik az 1c ábrán megadott folyamatban a semleges vektor bozon közreműködését, ami a mért érték értelmezéséhez szükséges a

$$\bar{\nu}_\mu + \nu_\mu \to Z^\circ \to e^+ + e^-$$

folyamat közrejátszásával.

Nem szeretném azt a látszatot kelteni, hogy ezekkel az elméletekkel a gyenge kölcsönhatás problematikája megoldottnak tekinthető. A modell megalkotója, Weinberg is csupán azt feltételezi, hogy a jelenlegi megoldás részét képezheti egy végleges megoldásnak.

A legfontosabb, ami hiányzik, egy olyan szupergyenge kölcsönhatás megismerése, amely több tekintetben sérti a gyenge kölcsönhatásban jelenleg helyesnek tartott szimmetriákat.

Úgy érzem, hogy a fenti ismeretek már elegendőek annak az eldöntésére, hogy

III. Alapvető kölcsönhatás e a gyenge kölcsönhatás?

A felelet jelenlegi ismereteink szerint, tehát a legújabb modellek szerint is csak igen lehet, ugyanis ezekben nem állapítanak meg alá- vagy fölérendeltségi viszonyt az elektromágneses és gyenge kölcsönhatás között. Az elméletekben egy „szupertöltés" ((5)-ik képlet) és az általa létrehozott „szuper-vektortér" (A_μ és B_μ) keretében egymás mellé rendelik a két kölcsönhatást. Ez önmagában is fontos eredményekre vezetett pl. az elmélet renormálhatósága, új folyamatok előrejelzése stb. Ne zárjuk le azonban a kérdést ezzel, mert ehhez ma még túl keveset ismerünk. Nem ismerjük pl. az elektron szerkezetét; a belsejében uralkodó viszonyokat. Tételezzük fel pl., hogy az ott uralkodó viszonyok hatására az elektromág-

neses tér tulajdonsága megváltozik és ez alkotja a gyenge töltést. Ekkor azt mondhatnánk, hogy az elektromágnesség hozza létre a gyenge kölcsönhatást, tehát a gyenge kölcsönhatás nem alapvető. De megfordítva is okoskodhatunk, ekkor az elektromágneses tér fogható fel a gyenge tér kiszűrődéseként az elektronon kívülre.

A két ellentétes szemlélet összeegyeztethető, ha mi is feltételezzük, hogy létezik egy szupertér, amelynek a gyenge és elektromágneses tér egy-egy megjelenési formája. Látható, hogy a fenti egyszerű okoskodás is azt mutatja, hogy *adott szinten* mindkét kölcsönhatás eleminek fogható fel. Egy magasabb, szupertér szintjén azonban egységes kölcsönhatást alkotnak. Tovább folytatva különböző kölcsönhatások egységesítését, amire egy további példát szolgáltat a barionok quark elmélete, végül eljuthatnánk egy olyan „szupertérhez" ami mindent magában foglal, és mikroszkopikus, esetleg makroszkopikus szinten is a filózófiai „ANYAG" fogalomhoz lenne hasonló. Minden bizonnyal ez a fizika fejlődésének egyik iránya.

ÖSSZEFOGLALÓ IRODALOM:

1. S. Weinberg, Rev. Mod. Phys. *46*, 255 (1974)
2. Y. Bernstein, Rev. Mod. Phys. *46*, 7 (1974)
3. А. И. Вайнштейн, И. б. Хрипловичь, УФН *112*, 685 (1974)

AZ ÁLTALÁNOS RELATIVITÁSELMÉLET MEGSZÜLETÉSE

Illy József
MTA Izotópintézete

Bevezetés

Az általános relativitáselméletet Einstein először 1916-ban írt nagy cikkében, a „Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie"-ben fejtette ki teljes összefüggésében. (1)

A cikk négy nagyobb fejezetből áll. Az első az elmélet fizikai részét, a második matematikai apparátusát ismerteti; a harmadik összekapcsolja az első kettő eredményeit, s a gravitációs erőtér elméletét tartalmazza; a negyedik a fizika egyes területeire (az elektrodinamikára és a Merkur perihéliummozgására) alkalmazza az általános relativitás posztulátumát.

Kezdjük a fizikai alapokkal.

Az első fejezet gondolatmenete ugyanúgy filozófiai megfontolásokkal indul, mint az 1905-ös cikk. A speciális elmélet szerint, írja Einstein, a geometria állításai szilárd testek lehetséges relatív elhelyezkedésére vonatkoznak, a kinematika törvényei pedig mérőrúdak és órák viselkedésére. Eközben a szilárd test bármely két pontja közti szakasznak meghatározott mérőszám felel meg, amely nem függ a test helyzetétől, irányítottságától vagy az időtől. Az óramutatók két állása közt is mindig ugyanannyi idő telik el (egy bizonyos koordinátarendszerben), a helytől és időtől függetlenül. Az általános elméletben azonban nem így van: nem lehet ilyen közvetlen fizikai jelentést tulajdonítani a hosszúság, illetve időtartam által képviselt térnek és időnek. Ez Einstein machizmustól való lassú eltávolodásának nyilvánvaló jele, de erről részletesebben később.

Egyébként az általános elmélet kidolgozását a klasszikus mechanika és a speciális relativitáselmélet ismeretelméleti fogyatékossága tették szükségessé. Először Mach mutatott rá arra — folytatja Einstein —, hogy a klasszikus fizikában a fizikai rendszer állapotát nem megfigyelhető tények határozzák meg, hanem fiktívek: a Galilei-féle tér (inerciarendszer). Einstein szerint viszont kísérletileg is megfigyelhető ok csak anyagi lehet. Így pl. a forgó folyékony test ellapulásának oka nem a Galilei-féle térhez, hanem a világegyetem többi anyagi testéhez viszonyított mozgás. Ha tehát ez az ok független a tetszés szerint felvehető koordinátarendszertől, kézenfekvő a következtetés: „A fizikai törvényeknek olyan módon kell felépülniök, hogy helyesek maradjanak tetszés szerint mozgó koordinátarendszerben is."

A relativitás általánosítását másik kísérleti tény is követeli. Egy Galilei-féle K koordinátarendszerben gyorsuló K' koordinátarendszerben a magára hagyott anyagi test gyorsuló mozgást végez (K-ban nyugalomban van). Meg tudja-e állapítani a K'-ben nyugvó megfigyelő, hogy rendszere egyenletesen gyorsul K-hoz képest? Nem, mivel a test gyorsuló mozgását gravitációs erő is előidézhette, s akkor gondolhatja, hogy K' valójában nyugalomban van K-hoz képest. Csak gravitációs erőtérre gondolhat, mivel a K'-ban valamennyi magára hagyott test egyenlő gyorsulással mozog, és csak a gravitációs erőtérnek van meg az a tulajdonsága, hogy minden testnek egyenlő gyorsulást kölcsönöz. (Itt Einstein Eötvösre hivatkozik.)

Mivel a testek mechanikailag mindkét rendszerben egyformán viselkednek, bármelyik alkalmas a folyamatok leírására. E megfontolásból látható, hogy az általános relativitáselméletnek egyszersmind gravitációs elméletre is kell vezetnie, mivel a gravitációs erőteret a koordinátarendszer puszta megváltoztatásával elő lehet idézni. Az is rögtön látható, hogy a fénysebesség vákuumbeli állandóságának elve nem tartható, mert a fény útja K'-ben általában görbe lesz, ha egyébként K-ban egyenes vonalú és állandó sebességű.

A 3. §-ban Einstein a nem-euklidészi geometria szükségességét bizonyítja. Ha egy Galilei-féle koordinátarendszerben egyenletesen forgó K' koordinátarendszerben a kör kerületét merev méterrúddal, illetve órákkal megmérjük, a mozgásból következő kontrakció és időtágulás miatt az eredmény attól függ, hogy K-hoz vagy K'-höz képest nyugodnak-e ezek az eszközök. Ha K'-höz képest nyugszanak, a kör kerületének nagyobbnak kell adódnia K-ban, mint $2r\pi$, azaz nagyobb π-t kapunk, mint ellenkező esetben, K'-ben tehát nem lehet igaz az euklidészi geometria. Einstein így arra a következtetésre jut, hogy „az általános relativitáselméletben a tér és idő mértékét nem lehet úgy meghatározni, hogy a térkoordináták különbségét közvetlenül egységnyi mérőrúddal, az időkoordináták különbségét pedig szabvány órákkal lehessen mérni." Mivel pedig nem talál módot, miként tudna a négydimenziós világhoz olyan koordinátarendszert illeszteni, amelyben különösen egyszerű alakban kapná a természettörvényeket, nem marad más választása, minthogy kijelentse: „A természet általános törvényeit olyan egyenletekkel kell kifejezni, amelyek minden koordinátarendszerben érvényesek, azaz ezeknek az egyenleteknek kovariánsnak kell lenniök bármilyen (általános kovariáns) transzformációval szemben." Az ezeknek a követelményeknek eleget tevő fizikai elmélet egyszersmind kielégíti az általános relativitási elvet is.

Einstein a cikk A. része végén megmutatja, hogy a tíz g függvény, amely a gravitációs erőteret írja le, a négydimenziós tér metrikáját is meghatározza, így az általános relativitáselméletben a gravitációs erők különleges szerephez jutnak.

Nem részletezem, miként fejti ki Einstein a B. részben, láthatólag a matematikai apparátussal nem ismerős fizikusok számára, a továbbfejlesztett Ricci-Curbastro-féle abszolút differenciálkalkulust. Csupán arra a fontos eredményre utalok, hogy a Riemann—Christoffel-féle tenzor nullává való válása a szükséges (és elegendő) föltétele annak, hogy a koordinátarendszer alkalmas megválasztásával, a $g_{\mu\nu}$-k állandóvá váljanak, azaz, hogy véges tartományban igaz legyen a speciális relativitáselmélet.

A C. rész a gravitációs erőtér elmélete. Miután Einstein megállapította, hogy a speciális relativitáselmélet szerint

egy anyagi pont tetszés szerinti kordinátarendszerben tekintett mozgása geodetikus vonalon megy végbe, amelynek egyenlete

$$\frac{d^2x}{ds^2} = \Gamma^{\tau}_{\mu\nu} \frac{dx_\mu}{ds} \frac{dx_\nu}{ds},$$

fölteszi, hogy ez a kovariáns egyenletrendszer határozza meg a pont mozgását gravitációs erőtérben is, még akkor is, ha nincs olyan koordinátarendszer, amelyben igaz lenne a speciális relativitáselmélet. Ha $\Gamma^{\tau}_{\mu\nu} = 0$, a pont egyenes vonalú, egyenletes mozgást végez, tehát $\Gamma^{\tau}_{\mu\nu}$ szabja meg az egyenestől való eltérést: nem más, mint a gravitációs erőtér komponense.

A továbbiakban a $B_{\mu\sigma\tau}{}^{\vartheta}$ Riemann-tenzornak a speciális relativitáselméletben kézenfekvő viselkedéséből általánosítva anyag nélküli térben érvényes gravitációs egyenletrendszert állít föl:

$$\frac{\partial \Gamma^{\alpha}_{\mu\nu}}{\partial x_\alpha} + \Gamma^{\mu\beta}_{\mu\beta} \Gamma^{\nu\alpha}_{\nu\alpha} = 0,$$

$$\sqrt{-g} = 1.$$

Az egyenletrendszer helyességét az igazolja, hogy az előbbi mozgásegyenletekkel együtt egyrészt első közelítésben a newtoni gravitációs egyenleteket adja, második közelítésként a Merkur perihéliumának mozgását.

Az általános esetben érvényes gravitációs téregyenletek levezetéséhez a Poisson-egyenletből indul ki. Mivel a speciális relativitáselmélet szerint a tömeg nem más, mint energia, amelyet szimmetrikus másodrangú tenzor ír le, az általános relativitáselméletben is célszerű olyan energia-impulzustenzort bevezetni, amely éppúgy viselkedik, mint a gravitációs tér komponensei, ugyanakkor szimmetrikus és kovariáns.

Az egyenletrendszer fölállításához az a fizikai megfontolás vezet, hogy zárt rendszerben a rendszer össztömege, tehát összes gravitáló hatása, a rendszer összes energiájától függ, vagyis a súlyos anyag és a gravitációs tér energiájának összegétől. Az így kapott egyenletrendszer:

$$\frac{\partial \Gamma^{\nu}_{\mu\nu}}{\partial x_\alpha} + \Gamma^{\mu\beta}_{\mu\beta} \Gamma^{\nu\alpha}_{\nu\alpha} = \varkappa \left(T_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} T \right),$$

ahol $T_{\mu\nu}$ az energia-tömegtenzor (mai elnevezéssel az energia-impulzustenzor), $T = T^{\mu}_{\mu}$ a Laue-skaláris.

Einstein külön fölhívja a figyelmet arra, hogy a levezetésnél nemcsak a relativitási elvre támaszkodott, hanem arra a föltevésre is, hogy a gravitációs tér energiája gravitációs szempontból pontosan úgy hat, mint bármely másfajta energia.

Az egyenletrendszer helyességét leghatékonyabban az igazolja, hogy belőle levezethető az impulzus és az energia megmaradása.

Végül a cikk D. részében Einstein megadja Euler egyenletét adiabatikus folyadékokra, súrlódás nélküli esetben; a Maxwell-egyenleteket vákuumban; Newton elméletét, mint első közelítést, végül a fényelhajlást és a Merkur perihéliumának mozgását.

A cikk kulcspontjait a következőkben látom:

1. Einstein filozófiai álláspontja 1905 óta lényegében nem változott, sőt, a forgó mozgás relativitása közvetlenebbül Mach gondolata, mint a speciális relativitási elv. Az a tény azonban, hogy a tér- és időkoordinátáknak nem tulajdonít közvetlen metrikus jelentést, már a pozitivizmustól való eltávolodását előlegezi.

2. Továbbra is döntő szerepet játszik a megfigyelő, most forgó koordinátarendszerben, illetve szabadon eső rendszerben. Az utóbbival kapcsolatos gondolatkísérlete a kulcsa annak a fölismerésnek, hogy a relativitáselmélet általánosítása szükségképp gravitációs elmélet alakját ölti.

3. Az általánosított elméletnek az általános relativitási elv, valamint két másik elv az alapja: a tömeg és az energia, valamint a tehetetlen és a súlyos tömeg egyenértékűségének elve.

4. Az 1. ponttal szoros kapcsolatban szükségessé válik, hogy az elmélet matematikája bonyolultabbá váljék. El kell dobnia Einsteinnek az euklidészi geometriát, és a nem-euklidészi (közelebbről a Riemann-) geometriára kell támaszkodnia. Ezt a speciális relativitáselmélet Minkowski-féle négydimenziós megfogalmazása készítette elő.

A cikkben utalást találunk Machra, Eötvösnek a második ekvivalenciaelvre vonatkozó kísérleteire, Gauss, Riemann, Christoffel, Ricci és Levi-Civitá matematikai, Minkowski, Laue, Hilbert és Schwarzschild fizikai eredményeire.

Megemlíti, hogy barátja, Marcel Grossmann nemcsak az idevágó, akkor nehezen föllelhető matematikai irodalom tanulmányozásában segítette, hanem a gravitációs egyenletek fölállításában is.

A három elv kialakulása (1905—1908)

Az általános relativitási elv

„Amikor 1905-ben a speciális relativitáselmélet kimondta az összes ún. inerciarendszer egyenjogúságát a természettörvények leírásában — írja Einstein —, teljes élességgel merült föl a kérdés: nem áll-e fönn a koordinátarendszerek még átfogóbb ekvivalenciája. Fizikailag az inerciarendszerek kivételes helyzetben voltak... Természetesen ismertem Mach azon gondolatát, hogy az inercia nem annyira az önmagában vett gyorsulással, hanem inkább a világegyetem többi testéhez viszonyított gyorsulással szembeni ellenállás. Ezt a gondolatot vonzónak találtam, de új elmélethez semmilyen alapot nem adott."(2)

Mach a Mechanikában így fejtette ki ezt a gondolatot: „... nincs szükségünk arra, hogy a tehetetlenségi törvényt különleges abszolút térre vonatkoztassuk. Helyesebben elismerjük, hogy mind azok a tömegek, amelyek a szokásos kifejezéssel erőt gyakorolnak egymásra, mind pedig azok, amelyek nem gyakorolnak, egymáshoz képest teljesen egyenértékű gyorsulás állapotában vannak, éspedig *valamennyi* tömeget egymással kapcsolatban állónak tekintünk." (3)

Einstein ezt az általánosabb relativitást 1907-ben, tekintélyes terjedelmű cikkében írta le először (4), de nagyon valószínű, hogy már legalább 1905-ben tudatában volt annak, hogy a speciális relativitáselmélet kidolgozásával a feladatnak még csak egy részét oldotta meg.

A két ekvivalenciaelv

Az általános relativitás egyik kiindulópontja a tömeg és az energia egyenértékűsége, más szóval az energia tehetetlenségének elve, amelyet Einstein még 1905-ben fogalmazott meg, habár csak elektrodinamikai rendszerre. (5) Felismerésében jelentős szerepet játszottak a sugárzás természetére vonatkozó vizsgálatai, ezek révén pedig Planck eredményei. A termodinamika alapozta meg ugyanis azt az állítást, hogy a test tehetetlensége függ a hőmérséklettől (belső energiájától). A tömeg és az energia egyenértékűségéből — a relativitáselmélet szerint, de a korpuszkuláris fényelmélet szerint is — az következik, hogy a fényt kisugárzó testből tömeg áramlik az elnyelő testbe.

Általános-e ez az ekvivalencia? Meghaladja-e az elektrodinamikát? A választ több lépésben adta

meg Einstein. Elsőnek, 1906-ban, megmutatta, hogy az ekvivalenciaelv szükséges és elegendő feltétele annak, hogy egy mechanikai és elektromágneses folyamatokat egyaránt felölelő rendszer súlypontjának mozgása megmaradjon (6). Második lépésben, majdnem egy évvel később, azt bizonyította be, hogy az elv más speciális esetekben is érvényes (7).

A már említett nagy cikkében (4) körvonalazódik a másik ekvivalenciaelv, a tehetetlen és a súlyos tömeg egyenértékűsége. Az energia tehetetlensége „arra a gondolatra vezet — írja —, hogy nincs-e az energiának súlyos (gravitáló) tömege is?" Ezt a kérdést szinte szó szerint így teszi föl Planck is 1907. június 13-i előadásában (8). Mivel Einstein cikke idézi ezt az előadást, az elvet először Planck mondta ki.

A továbbiakban Einstein két koordinátarendszert tekint: az egyik gyorsulva mozog, a másik nyugszik, de homogén gravitációs térben. Mivel a gravitációs erőtérben minden test egyformán esik, „nincs semmi alapja annak a föltevésnek, hogy a vonatkoztatási rendszerek bármilyen szempontból különböznek egymástól." A homogén gravitációs teret tehát helyettesíteni lehet egyenletesen gyorsuló vonatkoztatási rendszerrel, amely már elméletileg könnyebben kezelhető. Einstein megmutatja, hogy gravitációs térben az órák lelassulnak, a nap sugarai eltolódnak a vörös felé, s a fénysugár elgörbül.

A tehetetlen és a súlyos tömeg ekvivalenciáját Eötvös vizsgálta kísérletileg. Eötvös cikke német nyelvű magyar folyóiratban jelent meg, valamint az Annalen der Physik Beiblätterében. E cikkekre azonban Einstein csak 1914-ben hivatkozik. „Abban, hogy e törvény szigorúan érvényes, nem kételkedtem, bár nem tudtam Eötvös azon finom kísérleteiről, amelyekről, ha jól emlékszem, csak később szereztem tudomást." — írja később (9). Eötvös eredményénél jelentősebb szerepet játszott az a mindennapi tapasztalat, hogy gravitációs térben minden test egyformán esik. (10)

Aligha állapítható meg, hogy Einsteinnek Planckot megelőzően feltűnt-e már ez a jól ismert tény, s hogy az általános elmélet egyik alapköve lehet. Úgy tűnik azonban, hogy az általános relativitáselmélet és a gravitációs elmélet ebből az ekvivalenciából kivilágló természetes egysége, a kezdeti időkben, nem volt ennyire természetes. Einstein ugyanis megpróbálkozott azzal, hogy a gravitációt a speciális relativitáselméleten belül tárgyalja. Meghagyta a gravitációs tér Laplace-féle skaláris potenciálját, s a Poisson-egyenletet olyan idő szerinti differenciálhányadossal egészítette ki, amely kielégítette volna a speciális relativitáselmélet követelményeit. Elképzelése szerint a teljes fizikai erőtér skaláris erőtérből (gravitáció) és vektortérből (elektromágnesség) tevődött volna össze. Az anyagi pont mozgásegyenleteinek fölállításánál azonban nehézségekbe ütközött: az energia tehetetlenségének elve miatt a test tehetetlen tömegének függenie kellett volna a gravitációs potenciáltól. A klasszikus mechanika szerint a test gyorsulása, vertikális gravitációs térben, nem függ sebességének vízszintes komponensétől, mint ahogyan egy mechanikai rendszer gyorsulása sem függ ilyen térben belső kinetikus energiájától. „Az általam kidolgozott elmélet szerint pedig — írja Einstein —, az esés gyorsulása függött volna vízszintes sebességétől. Ez ellentmondott annak a rég ismert kísérleti ténynek, hogy gravitációs térben minden test egyenlő gyorsulással esik." (9) Íme, ez az embriókorában életképtelennek bizonyult elmélet az összekötő kapocs a speciális relativitáselmélet és a gravitációval szükségszerű kapcsolatban álló általánosítása között.

E nehézségek láttán Einstein elállt attól a szándékától, hogy a gravitációt a speciális elméleten belül tárgyalja. Az általánosított elmélet ezen „nulladik" változatáról csupán idézett szavai tanúskodnak, nem publikált róluk semmit. Feltehetően 1907 tavaszától december végéig dolgozhatott ezen az ötleten.

Összefoglalóan megállapíthatjuk, hogy 1905 és 1907 között megfogalmazódtak a relativitáselmélet általánosításának alapelvei.

A két ekvivalenciaelvnek érdekes felhangja is van. Azáltal, hogy Einstein kimondta az energia tehetetlenségének elvét, „a tömeg és az energia egymással egyenértékű mennyiséggé vált, éppúgy, mint pl. a hő és a mechanikai munka. Ily módon egyszerűen arra a következtetésre jutottunk, hogy a tömeget hatalmas mennyiségű energia összpontosulásának tekintsük." (11) 1921-ben pedig így ír: „Kiderült, hogy a tehetetlenség nem alapvető tulajdonsága az anyagnak, és hogy persze nem a legegyszerűbb mennyiség, hanem az energia tulajdonsága." (12) E két idézet jelképesen így írható föl:

tehetetlen tömeg → energia.

Ha ehhez hozzávesszük a tehetetlen és a súlyos tömeg egyenértékűségét (amely, Mach szellemében, a súlyos tömeg visszavezetését jelenti a tehetetlenre):

súlyos tömeg → tehetetlen tömeg,

talán nem mesterkélt, ha a következő „reakcióegyenletet" állítjuk föl :

gravitáló tömeg → tehetetlen tömeg → energia,

vagyis Einstein gondolataiban az energetizmusnak, az energia mindent átfogó, elsőrendű szerepét hangoztató Ostwald-féle fizikai-filozófiai iránynak nyomait födöztük föl. Ez nem is lenne meglepő. Ismeretes ugyanis, mennyire tisztelte Einstein egyetemista korában Ostwaldot, sőt később levélben ajánlkozott is nála, hogy szívesen dolgoznék laboratóriumában. Választ azonban nem kapott.

Útban a matematika felé (1908—1913)

Amint a bevezetőben, Einstein 1916-os cikkében olvastuk, az általános relativitási elv matematikailag úgy fogalmazható meg, hogy a természettörvények olyan alakját kell megkeresnünk, amely

a koordinátatranszformációk szélesebb körével szemben kovariáns, mint a Lorentz-csoport, esetleg a legáltalánosabb transzformációkkal szemben is.

Einstein először posztulálta az általános relativitási elvet, azaz, hogy a természettörvények nemlineáris transzformációkkal szemben is invariánsak a négydimenziós téridőkontinuumban. Azokat a kísérleteit, amelyeket ezen feltevés konkrét következményeinek levonására tett, az általános relativitáselmélet *első* változatának nevezem.

1908 júliusától, 42 hónapon át, főképp a sugárzáselméletről publikált, a relativitáselméletről nem, de sokat töprengett rajta. Következő relativisztikus cikkében (13) arra tesz javaslatot, hogy miképp lehetne a Nap és a közelében látható állócsillagok szögtávolsága látszólagos megnövekedésének megfigyelésével igazolni a fényelhajlást. Seelig szerint Einstein később úgy ítélte meg, hogy az első döntő gondolat — az ekvivalenciaelv (a tehetetlen és a súlyos tömeg egyenértékűsége) 1911-ben született, s hogy ebben a cikkében látott napvilágot (14). Mivel azonban már láttuk, hogy ezt az elvet 1907-ben kimondta, megjegyzését úgy kell értenünk, hogy először ebben a cikkében fogalmazta meg egzaktul. Itt ugyanis azt bizonyítja be, hogy ha feltételezi, hogy a gravitáció nélküli egyenletesen gyorsuló koordinátarendszer egyenértékű a nyugvó és homogén gravitációs térben levő koordinátarendszerrel, akkor ebből következik az energia súlyossága.

1911 március végétől 1912 augusztusáig Einstein a prágai Német Egyetem elméleti fizikai intézetének vezetője volt, első professzori tanszékét töltötte be. Ez a másfél év jótékonyan hatott relativisztikus töprengéseire. Hat ilyen témájú cikket ír, amelyekben utolsó erőfeszítést tesz, hogy az általánosított elméletet viszonylag egyszerű matematikával fogalmazza meg. Ez idő tájt még idegenkedett bonyolultabb módszerektől. A négy dimenziós tárgyalásmóddal 1913-ig nem békélt meg, bár ekkor már egyedül az Annalen der Physikban ezzel a formalizmussal dolgozott Nordström, Frank, Born, Nöther, Levi-Civitá, Sommerfeld, Laue, Saposnyikov, Ishiwara stb. E kutatók cikkeihez viszonyítva Einstein matematikája majd hogy nem primitív.

A matematikától már egyetemi éveiben húzódozott. „Hogy bizonyos fokig elhanyagoltam a matematikát — írja Önéletrajzi jegyzeteiben —, annak nemcsak az volt az oka, hogy természettudományos érdeklődésem nagyobb volt a matematikainál. . . a matematikára vonatkozó intuícióm nem volt elég erős ahhoz, hogy határozottan meg tudtam volna különböztetni az alapvetően fontosat a többi, többé-kevésbé elhanyagolható tudásanyagtól. . .; és előttem, egyetemi hallgató előtt, nem volt még világos, hogy a fizika mélyebb, elvi megismerése a legfinomabb matematikai módszerekhez van kötve." (15)

A Prágában írt utolsó cikkében másik okot is találhatunk arra, miért nem volt teljesen kibékülve a matematikával. „A gravitációt is fölölelő relativitáselmélet egyenleteinek invariánsaknak kell lenniök a gyorsulással és a forgással szemben is. Az ide vezető út azonban nagyon rögös. . . a téridőkoordináták elvesztik egyszerű fizikai jelentésüket." (15) Mivel a nem-lineáris transzformációkkal szembeni kovarianciát Einstein már 1908-ban posztulálta, föl kell tételeznünk, hogy négy évig, 1908-tól 1912-ig, azon dolgozott, miképp tarthatná meg ezt a közvetlen fizikai jelentést. Nyilvánvalóan pozitivizmusa akadályozta meg abban, hogy már korábban el ne álljon ettől a gondolatától. Jellemző azonban Einstein objektivitására, hogy nem ragaszkodott mindenáron filozófiai alapmeggyőződéséhez. Már 1910-ben ugyanis ezt írta: „Nem állíthatjuk, hogy az idő- és térkoordinátákat feltétlen úgy kell definiálnunk, hogy definíciójuk alapul szolgáljon e koordináták kísérleti mérési módszerének. . ." (17). Ennek ellenére szinte a végsőkig próbálgatta a lehetőségeket, mielőtt megtette volna azt a jelentős lépést, amely távolabb vitte a fizikai jelenségek világától.

Egy gondolat megfogamzása és megszületése között éppúgy bizonyos idő telik el, mint az élet fogamzása és születése között. Einstein pl. már 1907-ben foglalkozott a Merkur perihéliummozgásának magyarázatával. Habichtnak december 24-én írt levelében azt írja, hogy „mostanában a gravitációs törvény relativitáselméleti szemszögű kutatásával is foglalkozom, s remélem, ezzel fényt deríthetek a Merkur-pálya eddig magyarázatlan szekuláris perihéliumeltolódására." (18) Publikációban először e témáról mégis csak 7 év múlva, 1915-ben tett említést. Ez a kis példa azért tanulságos, mert amikor Einstein egy-egy lényeges gondolatának születésnapját kutatjuk, nem szabad elfelejtenünk, hogy kevés személyes vagy levélbeli nyilatkozatától eltekintve, a publikált cikkek születésnapját állapíthatjuk csak meg, ám meglehet, hogy a gondolat már évek óta nyugtalanította.

Prágában hallott Einstein először arról a kalkulusról, amely két év múlva a megoldásra vezetett. Hosszú sétáikon Einstein bevallotta matematikus kollegájának, Georg Picknek azokat a matematikai nehézségeket, amelyekkel szemben találta magát a relativitáselmélet dinamikájának általánosítása során. „Pick már akkor javasolta — írja Frank —, hogy Einstein gondolatai továbbfejlesztésének megfelelő eszköze Ricci és Levi-Civitá olasz matematikusok „abszolút differenciálkalkulusa" lenne." (19)

A kalkulus nem-euklidészi és többdimenziós geometriát jelent, és ez, bármilyen újnak tűnik is Einstein életében, mégsem volt az. Már a német természetkutatók 1909. október 14-én, Salzburgban tartott gyűlésén arról vitázott, hogy a forgó merev testek Lorentz-kontrakciója miatt ilyen rendszerben nem lehet alkalmazni az euklidészi geometriát. (20) Cikkben e probléma 1912-ben merül föl, de a nem-euklidészi geometriát nem említi. Teljesen világosan csak 1915-ben fejezte ki ismét ezt a gondolatot, de — előbbi megjegyzésemre utalok most — ez egyáltalán nem jelenti

azt, hogy ekkor világosodott volna meg benne. Egyébként mások, amikor a forgó merev testek Lorentz-kontrakciójáról cikkeztek, nem említették, hogy a nem-euklidészi geometria jelentené a kiutat, így ezt Einstein saját fölismerésének kell tartanunk.

Itt helyén való kitérnem arra, milyen szerepet játszott a merev test az általános (és a speciális) relativitáselmélet megszületésében. E kérdésre először Csudinov hívta föl a figyelmet. (21) Megállapította, hogy a két relativitáselméletben a kongruencia koordinatív meghatározására (azaz a geometriai fogalmak olyan interpretálására, amelynek elemei fizikai tárgyak) általában a fénysugarat és az órákat használják. Einstein mégsem a fénysugarat választja, mivel a fény trajektóriája gravitációs térben elveszti egyértelmű geometriai jelentését (egyenes), hacsak előre nem posztulálunk valamilyen gravitációs elméletet. Emiatt Einstein előnyben részesíti a merev testet. Később, 1921-ben, ún. „gyakorlati geometriát" definiál: a geometria tételei gyakorlatilag szilárd testek viselkedésére vonatkoznak. „A geometria ilyen felfogásának különös jelentőségét tulajdonítok — írja —, mivel nélküle nem tudtam volna létrehozni a relativitáselméletet." Einstein ezzel a forgó koordinátarendszerben föllépő Lorentz-kontrakció és az euklidészi geometria összeegyeztethetetlenségére céloz. A forgó merev test viselkedése tehát egyik kiinduló pontja volt az általánosan kovariáns elmélet megalkotásának.

A geometria, mint a merev testek viselkedésének elvont tana, nem Einstein gondolata. Már Riemann meglátta, hogy a merev test és a fénysugár azon két empirikus fogalom, amelyre a térbeli mértékmeghatározás támaszkodik. (22) (A mérőrúd kiterjedésének invarianciájáról és az egyenes definíciójáról van itt szó.) Éppen ezt a kérdést taglalja részletesen Helmholtznak a geometria tapasztalati alapjaival foglalkozó értekezése. Helmholtzot éppen Riemann értekezésének közzététele serkentette saját írása publikálására; gondolatai már korábban készen voltak. Helmholtz nem ismétli Riemann gondolatait. Ilyen kérdéseket tesz föl: „a geometria milyen állításainak van objektív jelentősége? Melyek, éppen ellenkezőleg, csak definíciók vagy definíciók következményei, vagy egyedül a megfogalmazásuk (Darstellung) módjától függnek?" (23) Helmholtz a kezdet kezdetén föltételezte, hogy a térbeli mérést egybeesések előidézésével lehet elvégezni, s azt a feladatot tűzte maga elé, hogy megkeresse a „többszörösen kiterjedt sokaság" (a többdimenziós tér) azon legáltalánosabb analitikai kifejezését, amely megengedi a merev test kívánt fajtájú mozgását. Ez a program nagy vonalakban megegyezik Einstein 1905-ös cikkének programjával. A speciális elmélet születésének történetében (24) már láttuk, hogy Einstein olvasta Helmholtz egyes dolgozatait, meglehet, hogy ezt a híres értekezését is. Erősíti ezt a sejtést Einstein is, amikor 1925-ben ezt írja: „. . .elfogadhatjuk, hogy a geometriai „test" fizikai merev testben realizálódik. Ez a gyakorlatias fizikus-kísérletező álláspontja. Ekkor a geometriai „szakasznak" a természet meghatározott tárgya felel meg, s ezzel a geometria összes tétele valóságos testekre vonatkozó állítások mezét ölti. Ezt a szempontot különösen világosan Helmholtz fejtette ki, hozzátehetjük, hogy nélküle lehetetlen lett volna gyakorlatilag közeledni a relativitáselmélethez." (25) Amennyiben e kijelentést történeti visszaemlékezésnek tekintjük, akkor ez azt jelenti, hogy éppen Helmholtz értekezése hívta föl Einstein figyelmét a geometria és a fizikai merev test tulajdonságainak kapcsolatára, amelyből viszont, a forgó testek Lorentz-kontrakcióján keresztül, az általános elmélet szükségszerűen nem-euklidészi geometriája következett.

Térjünk vissza történetünk folytatásához. Einsteint már elég kudarc érte ahhoz, hogy komolyan ne vegye Pick javaslatát, s el ne pártoljon az euklidészi geometriától. Útja az úgynevezett abszolút differenciálkalkulus felé fordult.

Az abszolút differenciálkalkulus (1913—1915)

1913. szeptember 9-én Einstein és barátja, Grossmann, előadást tartott Frauenfeldben, a Svájci Természetkutató Társaság évi közgyűlésén. Einstein a relativitáselmélet általánosításának fizikai szempontjait foglalta össze, Grossmann a matematikáját. Az előadás döntő változásról tanúskodik Einstein álláspontjában. A két előadásban és a publikálásra egy cikké átdolgozott változatukban (26) megjelenik a tenzorszámítás, a Riemann-metrika. Habár a nem-lineáris transzformációkkal szemben kovariáns alapegyenletekig még nem jutnak el — ehhez még két évre van szükség — kifejtik azokat a fizikai és filozófiai indítékokat, amelyek alapján a relativitáselméletet általánosítani akarják.

Einstein összeveti Abraham és Nordström elméletét a sajátjával, és megállapítja, hogy Nordström és a saját elmélete között csak tapasztalati úton lehet dönteni: a Naphoz közeli állócsillagok helyzetének fölmérésével. Erre jó alkalom kínálkozik az 1914-es napfogyatkozáskor. (Az első világháború kitörése miatt ezt a megfigyelést nem tudták végrehajtani.)

Az elmélet ilyen általánosítását előkészítők között Einstein Minkowskit és az abszolút differenciálkalkulus megteremtőit, valamint elődeiket említi: Gausst, Riemannt, Christoffelt, Riccit és Levi-Civitát.

Habár Minkowski a fizika két alapfogalmának, a térnek és az időnek kapcsolatát mutatta meg, Einstein a téridőt pusztán matematikai eredménynek tartja, így ez rá nem közvetlenül, mint fizikai gondolat hatott, hanem közvetve, mint példa arra, miként lehet négydimenziós analitikus úton elméletet megfogalmazni.

Az abszolút differenciálkalkulus ekkor már készen állt arra, hogy felhasználják. A kalkulus gondolata Riemannak az Olympia Akadémia által is tanulmányozott „Über die Hypothesen. . ." című

értekezésére vezethető vissza. „. . .először megkülönböztettük a kiterjedési vagy területi viszonyokat a metrikus viszonyoktól — írja Riemann —, s azt találtuk, hogy ugyanazon kiterjedési viszonyoknál különféle metrikus viszonyok képzelhetők el; ez után azon egyszerű metrikus viszonyok rendszerét vizsgáltuk, amelyek teljesen meghatározzák a tér metrikáját. . .” (27)

Riemann alig használ képletet. Összegyűjtött munkáinak szerkesztője, G. Weber megjegyzi, hogy a levezetéseket Riemann másik, eladdig publikálatlan munkájában találhatjuk meg. Emiatt nem tudott Christoffel sem e levezetések létezéséről, s látott neki Riemann gondolatai analitikus kifejtésének, miután Riemann értekezése 1868-ban megjelent. (28)

Riemann, Christoffel, Lipschitz, Levi-Civitá és Ricci munkáit nem Einstein födözte föl elmélete számára, hanem Grossmann. Grossmann „nemcsak megkímélt attól, hogy a matematikai szakirodalmat tanulmányoznom kelljen — írja Einstein 1916-ban —, hanem támogatott a gravitációs erőtér egyenleteinek felkutatásában is.” (29)

Grossmann Budapesten született, s bár ennél többet még nem tudok Magyarországgal való kapcsolatáról, emiatt kissé részletesebben foglalkozom vele.

Grossmann egyike volt Einstein négy osztálytársának a zürichi Polytechnikumon. „Éppen azon tulajdonságoknak volt bővében, amelyekben én szűkölködtem: gyors felfogás és rendszeresség minden tekintetben. Nemcsak, hogy látogatta az összes előadást. . . , hanem olyan kiválóan jegyzetelte is őket, hogy füzeteit, átgépelés után, azonnal ki lehetett volna adni. . . a vizsgákra való felkészülésre kölcsönadta ezeket a füzeteket, amelyek a mentőövet jelentették számomra.” (30)

Így hát Einstein a Polyn nemcsak Fiedler, Geiser és Minkowski előadásában tanulta a matematikát, hanem — talán főképp! — Grossmann „interpretálásában” is.

1900-ban, az egyetem elvégzése után, Grossmann Fiedler professzor tanársegédje lett, és nem-euklidészi geometriával kezdett foglalkozni. 1907-től a Poly VIII. fakultásának docensévé és vezetőjévé lépett elő (ugyanott dolgozott Einstein is, Prágából való visszatérte után).

Grossmann egyik fő feladatának a matematika gyakorlati alkalmazását, ezen belül a mérnökhallgatók jó matematikai kiképzését tekintette. Ez a beállítottsága magyarázhatja, miért vett részt egy nemcsak a mérnökök, de a fizikusok számára is ismeretlen, bonyolult számítási mód fizikai alkalmazásában. Grossmann meggyőzte Einsteint arról, hogy a modern fizikához elengedhetetlen a magasabb matematika. Fölhívta a figyelmét a Polytechnikum fizikai-matematikai fakultása alapítójának és első dékánjának, Christoffelnek munkáira is.

Seelig elmeséli, hogy Einstein gyakran már korán ebéd után beállított Grossmannékhoz, s a délelőtti előadásokban elfáradt barátját éjszakába nyúló beszélgetésbe vonta.

Mikor mehetett végbe ez a megfeszített munka?

Einstein 1912 július végén tért vissza Zürichbe. Decemberre fejezte be az abszolút nullafoknál föllépő molekulagerjesztéssel foglalkozó cikkét. Valószínű tehát, hogy ekörül, 1912 végén láttak munkához, s így az „Entwurfot” szűk esztendő alatt írták.

Einstein további cikkei az általánosított elmélet kiteljesedését hozták. 1914-ben a „Die formale Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie”-ben összefoglalja addigi eredményeit; a „Kovarianzeigenschaften der Feldgleichungen der auf die verallgemeinerte Relativitätstheorie gegründete Gravitationstheorie”-ban pedig bebizonyítja, hogy a gravitációs egyenletek azon feltétel mellett általánosan kovariánsak, hogy a $g_{\mu\nu}$ metrikus alaptenzort ezek az egyenletek teljesen meghatározzák. Az utolsó akadályt — azt, hogy a gravitációs egyenletek fölállításánál eddig ragaszkodott ahhoz, hogy $T^{\mu}_{\mu} = 0$ legyen — 1915-ben küzdötte le. Végre leírhatta: „ezzel, végre, befejeződött az általános relativitáselméletnek, mint logikai rendszernek fölépítése.” (31)

II.

Ebben a fejezetben az általános relativitáselmélet legjelentősebb gondolatainak előzményeit tekintem át, függetlenül attól, hogy Einstein vagy munkatársai tudtak-e róluk vagy sem.

Melyek ezek az összetevők? Sorjában: az elmélet matematikája (a nem-euklidészi geometria és a többdimenziós geometria), a fizikai előzmények (téridő, többdimenziós tárgyalásmód a fizikában), végül a tér metrikájának fizikai fogalmakkal való összekapcsolása (a térgörbület, mint az erő alternatívája).

A nem-euklidészi és a többdimenziós geometria

A nem-euklidészi geometria Lobacsevszkijtől, Gausstól és Bolyaitól indul ki, a többdimenziós pedig Grassmanntól, Hamiltontól, Cayleytől. Riemann a geometria alapföltevéseiről írt értekezésében összekapcsolta a geometria e két ágát, majd később ezt analitikusan is megfogalmazta. Ahhoz azonban, hogy a differenciálgeometria ezen ága Ricci és Levi-Civitá kezében rendszerré, kalkulussá álljon össze, magának a geometriának és általában a matematika más, akkoriban egymástól független ágainak is fejlődnie kellett.

Felix Klein a matematika 19. századi fejlődéséről írott könyvében a bennünket érdeklő geometriai és matematikai tanokat három csoportra osztja: a projektív geometriára (beleértve a nem-euklidészi geometriát is), az invariánsok elméletére és a többdimenziós terek elméletére (beleértve a vektor- és tenzorszámítás kezdeteit is). Kétségtelen, hogy Klein azért osztályoz így, mert éppen ezeket a tanokat foglalta szintézisbe, mégis, céljainkra nekünk is megfelel.

Cayley úgy definiálta a *projektív geometriát*, mint ami szerint „az alakzatok metrikus tulajdonságai nem az önmagában vett alakzatnak tulajdoníthatók. . . , hanem az alakzatoknak más alakzatokkal való kapcsolatában, mégpedig az Abszolútumnak nevezett kúpszelettel való kapcsolatában tekintett tulajdonságai. A metrikus geometria. . . része a projektív geometriának, s a projektív geometria az *egész* geometria." (32) Megkülönbözteti tehát a metrikus és a projektív tulajdonságokat.

A nem-euklidészi geometria felé annak következtében fordult a matematikusok figyelme, hogy 1862-ben megjelent Gauss és Schumacher levelezése. Az ilyen irányú kutatásnak további lendületet adott Riemann és Helmholtz már említett, a geometria alapkérdéseiről, illetve tapasztalatai alapjairól írt értekezése.

Az *invariánsok elméletének* alapkérdése a következő: miképp tükröződnek algebrailag a projektív tulajdonságok; miként kell a számításokat úgy felépíteni, hogy a vizsgált tulajdonságok bármely lineáris transzformációval szembeni függetlensége invarianciája) kifejeződjék. A kutatók által elért részeredmények Klein Erlangeni Programjában kaptak tömör alakot.

A *többdimenziós terek* fogalmának kialakulásával részletesebben kell foglalkoznunk. E gondolat több matematikusban ötlött föl, szinte egyidejűleg (Grassmann, 1844, Hamilton és Cayley, 1847, Riemann, 1854, Helmholtz, kb. 1868).

Grassmann monumentális művének címe („Kiterjedéstan") (33) arra utal, hogy tárgya tágabb, mint a geometria, amely „tértan". Grassmann elmélete nemcsak a geometriának általánosítása (az akkor még ismeretlen Bolyai—Lobacsevszkij-féle geometria speciális esete a kiterjedéstannak), hanem a mennyiség fogalmának is (a vektor- és tenzorszámítás alapjait is tartalmazza). Éppen gondolatainak, szakkifejezései szokatlanságának tulajdonítják, hogy a 80-as évekig, újrafölfödözéséig, Grassmann szinte egyáltalán nem hatott a matematika további fejlődésére. Különös, de nem jelentős az a tény, hogy Einstein, M. Bessoval együtt, olvasta Grassmann Ausdehnungslehrejét (34). (Az általános relativitáselmélet többdimenziós matematikája ugyanis nem innen származtatható.)

W. R. Hamilton a komplex szám általánosításaként hozta létre a kvaternion fogalmát. A kvaternion számnégyes, amely egydimenziós skaláris és háromdimenziós vektorrészből áll. (A skaláris és a vektor elnevezés is Hamiltoné.)

$$Q = \mathrm{Scal}\, Q + \mathrm{Vect}\, Q,$$

vagy egyszerűen

$$Q = SQ + VQ.$$

A skaláris rész valós, a vektor imaginárius; a kvaternion háromdimenziós ortogonális koordinátarendszerben, i, j, k egységvektorokkal, így fejezhető ki:

$$Q = a + bi + cj + dk,$$

(nyilvánvaló az analógia a $C = a + bi$ komplex számmal).

Hamilton azonban nemcsak általánosított számnak tekintette kvaternionjait, hanem filozófiai jelentést is tulajdonított nekik: szerinte a skaláris rész az időt, a vektoriális a teret fejezi ki (35). Így a kvaternion 1. négydimenziós mennyiség (amint Hamilton írja, „meg kell engednünk, hogy bizonyos értelemben a térnek negyedik dimenziója van" (36)), és 2. térszerű és idő-szerű komponensből áll, valamint 3. a kétfajta mennyiség között az a különbség. hogy az egyik valós, a másik képzetes. Nyilvánvaló a hasonlóság Minkowski négyes téridővektorával.

Grassmann és Hamilton elméletének sajátos fogalomrendszere és jelölésmódja, valamint Hamilton óriási hírneve és Grassmann ismeretlensége, sőt, elhagyatottsága, mind azt eredményezte, hogy „hamiltoniánus" és „grassmanniánus" szekták alakultak, amelyek e tanításokat terjesztették és alkalmazták — nem nagy sikerrel.

Riemann értekezésével nem így történt. Érthető, mivel nem találunk benne csupán a beavatottak számára érthető fogalmakat, képletet is alig, így, mihelyt az értekezés 1856 után napvilágot látott, majd később belekerült Riemann összegyűjtött műveibe, a gondolatok szinte azonnal megfogantak a matematikus elmékben.

Az Erlangeni Program

A nem-euklidészi és többdimenziós geometria mellett, vele párhuzamosan és gyakran tőle elválaszthatatlanul, más irányzat is föllépett a geometriában; e két geometriai tudományág egyesítésének irányzata. Ennek a szintézisnek az alapjait fektette le Felix Klein Erlangeni Programjában.

Klein a nem-euklidészi geometriával 1869—1870-ben ismerkedett meg Stolz előadásában. Riemann értekezésével valamivel később találkozott. 1871 őszén látott hozzá, hogy a nem-euklidészi geometria projektív fölépítését, a Möbius-féle baricentrikus számítást és Hamilton kvaternionjait egyesítse. Erlangenben e szintézisről tartott előadását nevezik Erlangeni Programnak (37.) Célját így fogalmazza meg: „Adott a sokaság és benne egy transzformációcsoport. Ki kell dolgozni a csoport invariánsainak elméletét." Klein megmutatta, hogy a projektív geometria magában foglalja a lineáris alakok elméletét, az elemi síkgeometriát, a fordított rádiuszok geometriáját, s hogy a projektív geometria egybeesik a nem-euklidészi geometriákkal, ha a térgörbületet állandónak vesszük.

Az 1870-es évektől az euklidészi és nem-euklidészi geometria magasabb szintű egyesítése kihúzta a talajt azon támadások alól, amelyeket a logika vagy az ontológia nevében vezettek a nem-euklidészi geometria ellen. Az n-dimenziós tér létezéséről folytatott vita lassan elcsitult, mivel világossá vált, hogy a valóságos tér mineműségéről,

sem a végtelen kicsi, sem a végtelenül nagy méretekben, nincs tapasztalatunk (Riemann), s hogy a nem-euklidészi geometriát lehet puszta matematikai segédeszköznek használni mindennapi életünk három dimenziós euklidészi terében. Az Erlangeni Program tartós eredménye tehát az lett, hogy megtisztította az utat a különböző, de lényegében egyenértékű analitikai geometriai módszerek szabad használata előtt.

Az abszolút differenciálkalkulus

Klein ezen kívül közvetve is belejátszott az abszolút differenciálkalkulus kidolgozásába. 1877-1878-ban, Münchenben tartott előadásait egy olasz matematikus is hallgatta: Ricci (38). Később Ricci, Christoffelből kiindulva, 1895-ig kidolgozta a kalkulust, és alkalmazta is különféle fizikai kérdések megoldására. Ekkor Klein ismét belenyúlt az események menetébe: javasolta, hogy Ricci és Levi-Civitá írjon cikket e módszerről a Klein által szerkesztett Annalen der Mathematik számára.

A cikk bevezetője elárulja a forrásokat: Jacobi és Beltrami invariánselméleti eredményeit, Christoffel algoritmusát és Gauss és Riemann n-dimenziós sokaságokra vonatkozó gondolatait. Az abszolút differenciálkalkulus ,,minden olyan kutatás természetes eszköze, amelynek tárgya ilyen változóság (variété-Veränderlichkeit), vagy amelyben jellemző elemként az n változó vagy deriváltja kvadratikus differenciálalakban szerepel''. (39)

A Ricci—Levi-Civitá-féle számítás tökéletesítésével jóformán csak a szerzők foglalkoztak. Nagy változás e téren akkor következett be, amikor Grossmann és Einstein az általános relativitáselméletben használni kezdte.

Einstein és Klein között van még egy kapcsolat, Minkowski közvetítésével. Klein ugyanis azt állapította meg, hogy amikor Minkowski kidolgozta négydimenziós pszeudoeuklidészi geometriáját — amely a Lorentz-csoport invariánsainak elmélete —, akkor valójában Klein Erlangeni Programját követte, de nem úgy, hogy először kifejtette volna Klein általános elméletét, majd leszűkítette volna a transzformációkat a Lorentz-transzformációra (tehát deduktíve), hanem induktíve: úgy, hogy egyenesen erre a transzformációra dolgozta ki az elméletet (40). Egyébként kizárt, hogy Minkowski ne ismerte volna Klein Programját.

A téridő-kontinuum

Térjünk át a relativitáselméletben szerepet játszó négydimenziós téridő-kontinuum fogalmának kialakulására.

Az a gondolat, hogy a teret és az időt négydimenziós térnek fogjuk föl, Poincarétől származik (eltekintve most Hamilton már említett elképzelésétől, hogy a kvaternionok a teret és az időt kapcsolják össze). Poincaré az elektron dinamikájáról írt híres cikkének (41) utolsó fejezetében röviden megemlíti, hogy az imaginárius egységgel szorzott időkoordináta egyenértékű a térkoordinátákkal. Ezt a gondolatot azonban nem aknázza ki, nem bontja ki belőle a mechanika és az elektrodinamika négydimenziós elméletét. Ezt a dicsőséget Minkowskinak engedi át, aki éppen ebből a Poincaré-féle cikkből, valamint Lorentz Versuchjából (42) indul ki.

Minkowski addigi matematikai munkássága tökéletesen előkészítette a talajt a négydimenziós ,,világ'' számára. Pályafutása során a kvadratikus alakok elméletét tetszés szerinti fokú alakokra általánosította, s ezen alakok bizonyos tulajdonságait nemcsak számelméleti, de geometriai módszerekkel is tárgyalta.

Fizikai cikkei már nem fűzhetők olyan szoros logikai láncba, mint a matematikaiak. A szilárd test folyadékban végbemenő mozgásával foglalkozó cikke (1881) azt sejteti, hogy a szerző a testek mozgását más közegben (pl. éterben) is tudná tárgyalni. Az Enzyklopädie der mathematischen Wissenschaften számára a kapillaritásról írt cikke (1906) magányosan áll elődei és utódai között. Harmadik és negyedik fizikai cikkével Lorentz, Poincaré és Einstein munkásságához kapcsolódik. A relativitási elvről tartott előadását matematikusoknak szánta (43), valószínűleg egy akkor már befejezett nagy cikke ismertetésének. Az előadás négy részből áll. Az elsőben a vákuumbeli elektrodinamika Lorentz-invariáns egyenleteit tárgyalja, többek között azon szimmetriájukat, amelyre ,,még Poincaré sem figyelt föl''. Minkowski az x, y, z, it koordinátákat x_1, x_2, x_3, x_4-gyel jelöli; definiálja a négyes áramsűrűséget és a többi ,,négyes'' mennyiséget, és velük fölírja az alapegyenleteket, a kontinuitási egyenletet, a ponderomotoros erő kifejezését. A cikk úgy viszonylik Poincaré elektrodinamikai cikkéhez, mint Ricci munkái Christoffeléihez.

Minkowski nemcsak szép matematikai köntösbe öltöztette a relativitáselméletet, nemcsak utalt az elmélet ismeretelméleti problémáira, hanem ki is mondta a négydimenziós világ létezését. Az 1908-ban tartott ,,Raum und Zeit'' című előadásában így fordult hallgatóihoz: ,,A tér és idő azon szemlélete, amelyet önöknek ki szeretnék fejteni, kísérleti fizikai alapon nyugszik. Ebben van az ereje. Ezután a tér önmagában és az idő önmagában árnyékká halványodik, s csak kettejük valamiféle egyesítésének marad meg az önállósága.'' (44) A ,,téridővonal'' és ,,téridőpont'' a ,,világvonal'' és ,,világpont'' elnevezést, a négydimenziós kontinuum a ,,világ'' elnevezést kapja.

Minkowski érezte, hogy ez az állítása merész. Ellenvetésre számított. Erről mentegetőzése árulkodik: amit a térről és időről ki fog fejteni, kísérleti fizikai alapon nyugszik; majd pedig, hogy először azt szeretné kimutatni, ,,miképp lehet a mostanában elfogadott mechanikából kiindulva, tisztán matematikai megfontolásokkal, a térre és időre vonatkozó új gondolatokra jutni.'' Ha pedig valakit zavarna a tér és idő új felfogása, ,,tisztelet-

tel viseltetem azon dogma iránt — írja engedékenyen —, amely szerint a tér is, az idő is független létezéssel bír." A szigorú tudományosság emlegetése, az óvatos, didaktikus hang nemcsak arról tanúskodik, hogy az előadó merésznek tartja mondanivalóját, hanem arról is, hogy Minkowski föltételezte: fizikus, matematikus, filozófus hallgatói már hallottak ilyen négydimenziós világról, de nem tartják tudományos gondolatnak. Igen, az idő, mint negyedik dimenzió, már 1895-ben megjelent Wells Időgépében, a negyedik dimenzió, mint térdimenzió pedig fontos szerepet játszott a századvég spiritiszta elméleteiben.

Nehéz lenne most azt elemeznünk, milyen hatással lehetett Wells és más akkori népszerűsítő szerzők negyedik dimenziója a kutatókra. Annak idején Zöllner nem az egyetlen természettudós volt, aki hitt a spiritizmusban (az ismertebbek közül csak Crookest és Flammariont említem). Nem volt tehát egészen alaptalan az a kérdés, amelyet Minkowski nagyobbik lányának, Lily Minkowski-Rüdenbergnek tettem föl levélben: nem állt-e Minkowski kapcsolatban spiritisztákkal. Válaszában Lily Rüdenberg (megvallom, sajnálatomra!) hangsúlyozta, hogy Minkowski kiegyensúlyozott egyéniség volt, távol állt tőle minden szélsőségesség.

A kantianizmussal vívott filozófiai harc különös eredményre vezetett a tér és idő kutatásában itt, Magyarországon, a századfordulón. Ismerkedjünk meg Palágyi Menyhérttel, aki németül 1901-ben, magyarul 1904-ben írta le először a „tér-idő" kifejezést. Tudományos hírét napjainkban már kizárólag ennek köszönheti.

Palágyi szerint a tér és idő kanti a priori kategóriaként nem állhatja meg a helyét, hiszen ha e két kategória együttműködését nem szabályozná semmi, akkor két jelenségvilágnak kellene léteznie: egyiknek pusztán a térben, a másiknak pusztán az időben. Ha pedig van olyan, szintén a priori törvény, amely szabályozza e két kategória kapcsolatát, akkor ezeket egyetlen kategóriába foglalná be, egyetlen tér-idő kategóriába, de ezt a jelenségek nem támasztják alá, mivel meg tudjuk különböztetni a teret az időtől. „. . .amit a tér és idő egységének nevezek — írja „Az ismerettan alapvetése" című könyvében (45) —, az nem is egyéb, mint az egész *jelenségvilág egységes voltának elve*. . . a természettudományok minden titka végül abba az egy titokba folyik össze, hogy a tér és idő miként függnek össze egymással."

Vessük össze Palágyi egyik mondatát Minkowski idézett előadásának egyik mondatával:

Palágyi

„Aminek kiterjedést tulajdonítunk,
annak időtartamot is kell tulajdonítanunk, és
aminek időtartamot tulajdonítunk,
annak kiterjedést is kell tulajdonítanunk."

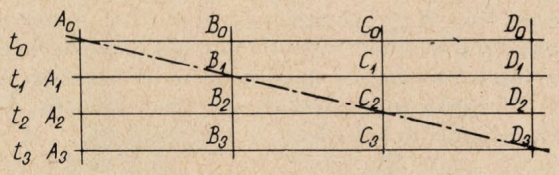
Minkowski

„Soha senki sem figyelt meg helyet másképp,
mint egy bizonyos időben, és
időt másképp,
mint bizonyos helyen."

Palágyi 1901-ben írt könyvében meglepően közel jut Minkowski világvonalához. (46)

„Képzeletben minden térpontot egyazon időpont kiáradásának tekinthetünk. . . az időnek ideális egy mérete folyton folyvást a térnek három méretében mintegy kifejlődve jelentkezik előttünk." Az egymást követő időpontokban a tér folyton megújul, amit úgy fogalmaz, hogy pillanatnyi „most-terek" (Jetzträume) sorozatában élünk, s ez a folyton megújuló, változó tér, a folyó (fliessende) tér a Minkowski-féle négyes világ analogonja.

A térben a mozgást Palágyi a következőképpen ábrázolja:



Az egyes időpontokhoz tartozó egyenesek a „most-terek" egy egyenesét („térsugarát") jelentik, az A, B, C, D pontok e tér pontjai. A nyugvó pontok „mozgását" egymással párhuzamos egyenesek szemléltetik ($\overline{A_0A_1A_2A_3}$, $\overline{B_0B_1B_2B_3}$ stb.). Ezeket az egyeneseket „idősugaraknak" is nevezi, mert a pont időben ezeken mozog. A térben is mozgó pont azonban nem ezek mentén halad, hanem átlósan. Ha a térben az $\overline{A_0B_0C_0D_0}$ pontokon halad át, s közben t_3-t_0 idő telik el, a pont folyó térbeli pályája az $\overline{A_0B_1C_2D_3}$ egyenes lesz. Míg az $\overline{A_0B_0C_0D_0}$ út a *látszólagos* út, az átlós egyenes Palágyi szerint a *valóságos* út. Mivel az idő irányát szerinte az öntudat szabja meg, a mozgó pont valóságos útjának időkomponensét szubjektív komponensnek, térkomponensét objektív komponensnek nevezi. A nyugvó pontok idővonalai jelentik az *általános* időtengelyt, a mozgó pont időtengelye viszont, amely szintén egybeesik valóságos útjával, a *speciális* időtengelyt. Ezek után „a nyugalmat úgy definiálhatjuk, hogy az öntudatunk egybeesése a jelenség időtengelyével, míg a mozgás nem más, mint ezeknek az időtengelyeknek iránybeli eltérése." Palágyi nem beszél arról, milyen kritériumok alapján állapítható meg egy időtengelyről, hogy általános vagy speciális, ezáltal az abszolút mozgást éppúgy tagadja, mint Einstein vagy általában a relativisták. („Aki megszokta, hogy a világteret folyton megújulónak képzelje, az nem esik abba a csalódásba, mintha léteznének abszolút nyugvó vagy álló jelenségek. . . , mivel az állónak látszó jelenség folytonosan megújhodik." — írja „Az ismerettan alapvetése" című művében.) Ezt csak azért érdemes kiemelni, mert később ebbéli véleményét megváltoztatta, s Minkowski „Tér és idő" című előadásának megjelenése után, 1914-ben írt „Die Relativitätstheorie in der modernen Physik" című művében már nemcsak a relativitáselmélet „erkölcsi nihilbe vezető relativizmusát" támadta, hanem a téridő poláris ellentétét is állította, csak hogy gondolatainak Minkowskiéitől való külön-

bözőségét kiemelje. (Minkowskit egyébként ,,mélyértelmű és kissé misztikus tehetségű matematikusnak'' nevezte.) Az időtengelyek többfélesége (a térтengelyekkel bezárt szögük sokfélesége) azonban olyan gondolat, amelyet zseniálisnak kell tartanunk.

Kár, hogy Palágyi nem a fizika útján haladt célja felé. Bár fizika-matematika szakos tanár volt, írásain ezt elég nehéz észrevenni. Szélsőségesen szubjektív, szertelen gondolkozásmódja a tudomány és általában a műveltség sok területére csábította, s vitte bele értelmetlen vitákba. A múlt század vége felé Madáchról, majd Petőfiről írt tanulmányát, a Barabás Miklósról szóló esztétikai cikkét még az iránta rajongó és róla elfogult könyvet író Solt Hugó is túlzónak tartotta; a darwini evolúciós elméletet támadó és saját ,,koevolúciós'' elméletét propagáló dolgozata a szakember Méhelytől kapta meg jogosan szigorú bírálatát. Még a marxizmus kritikájával is foglalkozott. . . A kolozsvári tanonciskolában tanító, ,,meg nem értett'' embert Németországban bizonyos körök nagyra értékelték (különösen Klages), a relativitáselmélet pronáci-antiszemita ellenségei (Lenard, Lipsius, Gehrcke) pedig mindenkit örömmel üdvözöltek, akinek műveit, nyilatkozatait felhasználhatták Einstein ellen. Így került Palágyi is a Lenard-csoport 1922-es, közös Einstein-ellenes nyilatkozatára és a ,,100 Autoren gegen Einstein'' (Leipzig, 1931) föltűnő rosszindulatról és elfogultságról tanúskodó kiadványba.

Hosszú volt ez a kitérő, de nem mehettem el szótlanul amellett az ember mellett, aki, bármilyen mellékzöngésekkel is, de az egyetlen magyar volt a téridő fölismerésének történetében.

Folytassuk Minkowski és Poincaré téridejének történetét.

Az ő fejükből sem előzmények nélkül pattant ki ez a gondolat. Riemann még nem nyilatkozott arról, hogy háromnál több dimenziós-e a fizikai tér, vagy hogy szorosan kapcsolódik-e a tér az időhöz; Hamilton is csak közvetve vetette föl a gondolatot. Jacobi és Osztrogradszkij kutatásait folytatva Darboux n-dimenziós térre általánosította a legkisebb hatás elvét, és kiterjesztette tetszőleges szabadsági fokú mechanikai rendszerekre. Ugyanekkor Hertz geometriai alakot adott a legkisebb kényszer Gauss-féle elvének, s a matematikai pontok trajektóriáját egyetlen pont n-dimenziós euklidészi térben vett trajektoriájaként fogta föl.

Az n-dimenziós tér mechanikai felhasználása mind megszokottabbá vált, de — és ezt alá kell húznom — csupán matematikai fogásként. Az n-dimenziós tér fizikai fölhasználása igazolta a matematikusok addigi, látszólag tisztán matematikai munkásságát, amelyet gyakran az értetlenség és mellőzés légkörében fejtettek ki.

A fizika területein is tettek kísérletet arra, hogy a többdimenziós teret fölhasználják, s bár a fizika további fejlődésére ezek a próbálkozások alig hatottak, a kor légköréhez tartoztak.

Elsőnek Pearson cikkét kell említenem (47), amelyben a kémiai tulajdonságokat, a gravitációt és más fizikai jelenségeket azzal magyarázta, hogy az éter a negyedik dimenzióban az atomokból ki- és az atomokba beáramlik, lüktetésszerűen. Kvalitatív próbálkozás maradt Mach azon ötlete, hogy a gázok vonalas színképét a molekulát összetevő atomok negyedik dimenzióban föltételezett rezgésével hozza összefüggésbe (48). Mach ezt a gondolatot matematikai ötletnek tartotta, és élesen elhatárolta magát a spiritiszták azon hipotézisétől, hogy a negyedik dimenzió valóban létezik.

Találkozhatunk négydimenziós ötletekkel a molekuláris folyamatok leírásában, a távolság köbével fordítottan arányos törvények interpretálásában, Minkowski elméletének megjelenése után azonban a negyedik dimenzió hívei már szinte kizárólag csak a tudományon kívüli körökből rekrutálódtak.

Metrika és anyag

A geometria előföltevéseinek a végtelen kis méretek tartományában való érvényességével kapcsolatban ,,Riemann arra az álláspontra jutott, hogy a testek geometriai viszonyait fizikai okok határozzák meg, azaz erők.'' Einstein ezekkel a szavakkal Riemannak következő kijelentésére utalt: ,,Diszkrét sokaságnál a mértékviszonyokat meghatározó elv már a sokaság fogalmának rejlik, folytonosnál azonban másban kell gyökereznie. A teret megalapozó valóságnak vagy diszkrét sokaságnak kell lennie, vagy e mértékviszonyok alapját rajta kívüli, rá ható kötőerőkben kell keresnünk.'' (49) ,, Így tiszta okoskodással — folytatja Einstein —, (Riemann) arra a fölismerésre jutott, hogy a geometria elválaszthatatlan a fizikától; ez a gondolat ténylegesen 70 évvel később, az általános relativitáselméletben öltött testet.'' (50)

A fizikai erőtér geometrizálására, azaz az erőknek térgörbülettel való helyettesítésére már a 19. század végén tettek kísérletet. Jacobi és a század közepének matematikusai a mechanikai rendszerek erőtérben végbemenő mozgásának integrális törvényszerűségeihez geometriai törvényekkel közeledtek, amelyek megszabták a különféle görbületű felületek geodetikus vonalainak irányát. Hertz a ,,Mechanika elvei''-ben folytatta ezt az irányt. Elvetette az erő fogalmát, s a test erőtérben végbemenő mozgását meghatározott görbületű térben végzett szabad mozgásával azonosította. A mechanikát három alapfogalomra alapozta: az időre, a térre és a tömegre, azon az ismeretelméleti alapon, hogy ezek a fogalmak állnak közvetlen kapcsolatban az érzékekkel. A három fogalom kapcsolata a mechanika alaptörvénye: a legkisebb hatás elve, amelyet így is megfogalmaz: ,,egy független anyagi rendszer minden egyes természetes mozgása abból áll, hogy a rendszer állandó sebességgel egyik legegyenesebb útján halad.'' Az erő csak két mozgás összekapcsolására kieszelt, a valóságban nem létező láncszem.

Hertz e gondolatait Helmholtztól és Machtól származtatta. (51)

A fizikatörténészek gyakran írják, hogy Hertz fölfogása lényeges szerepet játszott abban, hogy

az általános relativitáselmélet a bolygóknak a Nap gravitációs erőterében végbemenő mozgását a Riemann-tér geodetikus vonalai mentén folyó (legrövidebb utat követő) mozgásként írja le. (52) Ez a megállapítás a tudományos társadalom szintjén föltétlen igaz. Ismerte-e azonban Einstein Hertz Mechanikáját? Egyetlen idézet érvel amellett, hogy igen. Egyszer Einstein a következő kérdést tette föl: mi különbözteti meg Mach, Stuart Mill, Kirchhoff, Hertz és Helmholtz ismeretelméleti fölfogását. (53) Milyen alapon említi Einstein együtt éppen ezeket a kutatókat? Feltehetőleg azon, hogy valamennyien ki akarták küszöbölni az erő fogalmát a mechanikából. Ez azonban nem elég erős érv Hertz és Einstein közvetlen és erős kapcsolatára. Unsöld is azon a véleményen van, hogy a Hertz-féle erő nélküli mozgás jelentős részben bennefoglaltatik az Einstein által húsz év múlva — nyilvánvalóan függetlenül (!) — alkalmazott föltevésekben. (54) Igen, az a véleményem, hogy Einstein ebben nem Hertzet, hanem az ősforrást, Machot követte, s bár ő is kiküszöbölte az erőt, aligha tette volna, ha a tehetetlen és a súlyos tömeg egyenértékűségét a hétköznapi tapasztalat nem támasztotta volna alá.

A nem-euklidészi geometria első relativitáselméleti alkalmazása tehát Poincaré, majd Minkowski nevéhez fűződik. A ,,nem-euklidészi geometria'' kifejezés Minkowski ,,A relativitási elv'' című előadásában hangzott el először: ,,A világ térben és időben bizonyos értelemben négydimenziós, nem-euklidészi sokaság.'' — mondta. (43) Ezt a kijelentést azonban csak hallgatói hallhatták, mivel az előadás nyomtatásban csak 1915-ben jelent meg.

E két ismert név mellett azonban ismeretlen nevek is felbukkannak. V. Varičak szerb fizikus a Lobacsevszkij-féle és az euklidészi geometria összevetésével foglalkozott, s hogy feladatát szemléletesebbé tegye, fizikai analógiát keresett: az elektron mechanikájának és a klasszikus mechanikának összehasonlítását. ,,Az elektron összehúzódására vonatkozó Lorentz—FitzGerald-hipotézis azt a gyanút keltette bennem — írja —, hogy ez a kontrakció nem a tér geometriai anizotrópájának következményéről árulkodik-e.'' (55) Nyilvánvaló, hogy ő is a geometria és a szilárd test szoros kapcsolatából indulhatott ki, akárcsak Helmholtz, Poincaré, Einstein. Varičak párhuzamot vont a Lobacsevszkij-geometria és a relativitáselmélet között: az egyikben a fénysebesség az abszolútum, a másikban a térgörbület. $c = \infty$-nél a relativitáselmélet átmegy a newtoni mechanikába; $R = \infty$-nél a Lobacsevszkij-geometria megy át az euklidészibe. (56)

Varičak először 1907. március 16-án tartott előadást a nem-euklidészi geometria relativitáselméleti alkalmazásáról, (57) így ebben 8 hónappal megelőzte Minkowskit, aki ugyanezen év november 5-én tartotta meg ,,A relativitási elv'' című előadását. Munkájuk gyakorlatilag párhuzamosan folyt, akárcsak Einsteiné és Kottleré, akiről érdemes ejteni néhány szót.

Kottler antiszimmetrikus tenzorokkal, integrálalakban fogalmazta meg a speciális relativitáselméletet. Az euklidészi geometriáról úgy tért át a nem-euklidészire, hogy az x, y, z, it koordinátákat hiperbolikus tér általánosított koordinátáinak fogta föl. (58) Grossmann és Einstein akkor szerzett tudomást Kottler cikkéről, amikor az ,,Entwurf'' lényegében már készen állt, így valójában párhuzamosan dolgoztak a speciális relativitáselmélet nem-euklidészi általánosításán. Fontos különbség azonban, hogy Einsteinék elliptikus (Riemann-)geometriát használtak, Kottler pedig hiperbolikust.

Einstein figyelmét annyira megragadta Kottler munkája, hogy amikor 1913-ban Salzburgban előadást tartott, fölkérte hallgatóságát, ha netalán jelen lenne Kottler, álljon föl, meg szeretné ismerni. Kottler föl is állt!

Einstein és a kisérletek

E két részes írás olvasójában bizonyára már fölmerült a kérdés: miért nem foglalkoztam részletesebben azokkal a híres kísérletekkel, amelyek a köztudat szerint a relativitáselmélet alapkövei és kiindulási pontjai: a Michelson—Morley-kísérlettel és az Eötvös-kísérlettel. A kérdésre az az egyik válaszom, hogy ezzel mások már eleget foglalkoztak. De nem ez a fő érvem, hanem az, hogy Einstein maga is bizonytalankodott, amikor e kísérletek jelentősége felől faggatták.

A speciális relativitáselmélet születésénél, Einstein szerint, két tapasztalat játszott fontos szerepet: az aberráció és az áramló vízben végzett, Fizeau-féle fénysebességmérés. Mindkettővel valószínűleg Weber előadásain ismerkedett meg, még az egyetemen, de olvashatta őket Lorentz Versuchjában is. A két kísérlet egymásnak ellentmondó föltevéseket tesz szükségessé az éter és anyag kapcsolatáról, s ez az éterhipotézis gyöngeségét födte föl.

Az elmélet kialakulásának további fontos tényezője a sugárzás atomisztikus szerkezetének föltételezése volt, amely a fotoelektromos jelenségre támaszkodott. Einstein 1900 körül látott neki fotoelektromos cikkeinek, s ez a probléma terjeszkedett ki a relativitáselmélet területére is. ,,1905-ben már biztosan tudtam — írja —, hogy a Maxwell-elmélet a sugárnyomás fluktuációjánál helytelen eredményre vezet, így a Planck-féle üregben fölfüggesztett tükör helytelen Brown-mozgására. Szememben nem lehetett elkerülni azt, hogy a sugárzásnak ne tulajdonítsunk objektív atomi szerkezetet, amely, persze, nem illik bele a Maxwell-elmélet kereteibe.'' (59). Ugyanerről ír Seelignek is.

A negyedik, döntőnek tartott kísérlet a Michelson—Morley-féle. Shankland kérdésére, hogy mikor szerzett tudomást e kísérletről, Einstein 1950. február 4-én úgy válaszolt, hogy csak 1905 után, mivel ellenkező esetben megemlítette volna 1905-ös cikkében. (60) Ez a válasza azonban azon alapul,

hogy 1905-ben mit nem tett, s nem azon, mit tett. 1952. október 2-án Shankland ismét föltette a kérdést, és Einstein ekkor már bizonytalankodott. „Nem voltam tudatában, hogy közvetlen hatott volna rám az alatt a hét év alatt, amely alatt a relativitáselmélet az életem volt. Úgy tetszik, magától értetődőnek tartottam, hogy igaz." Majd emlékezni vélekedett arra, hogy Lorentztől (Versuch) olvashatott a kísérletről. 1952. december 19 előtt néhány nappal is közvetettnek ítélte meg a kísérlet hatását, s nagyobb szerepet tulajdonított annak az elképzelésnek, hogy mágneses erőtérben a testre ható elektromotoros erő nem lehet más, mint elektromos erőtér. (61). 1954. február 8-án e tárgyban tett utolsó nyilatkozatában ismét ingadozott, tudott-e a kísérletről 1905 előtt. (62)

Az előző cikkben (24) láthattuk, hogy Einstein Lorentz Versuchját részletesen ismerte, így a Michelson—Morley-kísérlettel is meg kellett ismerkednie. Poincaré is említette e kísérletet, igaz, név nélkül. Ezek a leírások azonban nem tettek különösebb benyomást Einsteinre, hiszen, mint írja, általános okokból már meg volt győződve az abszolút mozgás megfigyelhetetlenségéről. (Lorentz Versuchját egyébként 1897 után olvashatta, mivel az 1897—98-as tanévben még berendezést akart építeni, hogy a Föld abszolút sebességét meghatározza. (63) Ha tehát 1898-ban olvasta, 1905-ig éppen megkapjuk azt a hét esztendőt, amely alatt „a relativitáselmélet az élete volt.")

Nem kételkedett a tehetetlen és a súlyos tömeg egyenértékűségében sem, bár nem tudott Eötvös eredményeiről. A Brown-mozgásról is úgy írta cikkét, hogy nem tudta: ezt a jelenséget már régen ismerik. (64) Mi ennek az oka?

Michelson és Eötvös valami, már eddig is ismertet igazolt, az addiginál nagyobb pontossággal. Michelson v/c-ben másodrendben igazolta az elektrodinamikai jelenségek relativitását, amelyet mechanikai rendszerre Newton fizikája sem tagadott — csupán Newton filozófiája. Az Eötvös-kísérlet ugyancsak igen pontosan állította a tehetetlen és súlyos tömeg addig sem vitatott egyenértékűségét. Ennyiben tehát van alapja annak, hogy Einsteinben az általános meggyőződés elnyomta a konkrét megbizonyosodás igényét.

Mindkét kísérletnek van sokkal egyszerűbb párja Einstein gondolatvilágában: az Eötvös-kísérletnek a testek egyenlő szabadesése, a Michelson—Morley-kísérletnek a fényhullámon lovagló megfigyelő tapasztalatai. Amikor Einstein a két kísérlet eredményében szinte a priori biztos volt, e két egyszerűbb kísérlet (illetve gondolatkísérlet) eredményében volt biztos. Lorentz és Poincaré az ilyen „kísérleteket" nem fogadta volna el perdöntőnek, ebben állt hiperkriticizmusuk. Szerintük a tudomány pontos és mind pontosabb kísérletről kísérletre halad, lépésről lépésre (gradualizmus), amelyeket egyszerű, mindennapi, vagy éppen gondolatkísérletekre hivatkozva nem lehet átugrani.

Hogy Einstein ennyire „elhanyagolta" a kísérleteket, annak lélektani magyarázata a Mach által elsőnek kifejtett ún. ösztönös tudás lehet. A kutató a többiek eredményeivel neveltetése, képzése, olvasmányai során ismerkedik meg. Később összevegyül benne saját gondolata és másoké, elvész konkrét származásuk emléke, s egyszer, kellő pillanatban, az idegen gondolatok a saját gondolatokkal egységbe ötvözve látnak napvilágot. Így fordulhat elő, hogy mások gondolatmenetét sajátjaként adja elő, vagy így emlékszik rá.

Befejezés

A relativitáselmélet történeti előzményei a klasszikus fizika alapfogalmainak ismeretelméleti elemzése révén alakultak elméletté, azaz azon kérdés föltevése révén, mi létezik tőlünk függetlenül, miként kell úgy megfogalmazni a természet törvényeit, hogy a lehető legtökéletesebben elkülönítsük az esetlegest a föltétlentől, a megismerőtől függőt attól, ami csak a megismerttől függ.

A relativitáselmélet összekapcsolta Mach idealizmusát és a mechanikus materialista fizikát, a tér és idő dialektikus felfogásával. A marxizmus Hegel idealizmusát kapcsolta össze Feuerbach materializmusával. A fizika és a filozófia e fejlődési irányai nemcsak így, formálisan hasonlók, de körülbelül ugyanabban az időben is léptek föl, és ebben a — most még közelebbről nem magyarázott, csupán megállapított — párhuzamukban rejlik annak az oka, miért volt előremutató a maga korában ez a fizikai irány, s hogy miért tekintendő a relativitáselmélet kialakulása nemcsak önmagában is érdekesnek, hanem az egész korszak szellemi változásaira is jellemzőnek. A fizika Einsteinnel induló változását ilyen szélesebb távlatokban vizsgálni azonban meghaladja e cikk kereteit.

IRODALOM

1. A Phys. *49*/1916/769
2. Einiges über die Entstehung der allgemeinen Relativitätstheorie, 1933; Mein Weltbild, Querido, Amsterdam, 1934, 249—250
3. E. Mach: Die Mechanik in ihrer Entwickelung historisch-kritisch dargestellt, Brockhaus, Leipzig, 3. Aufl. 1897, 230
4. Über das Relativitätsprinzip und die aus denselben gezogenen Folgerungen, Jahrb. Radioakt. Elektronik *4*/1907/411
5. Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig? A. Phys. *18*/1905/639
6. Das Prinzip von der Erhaltung der Schwerpunktsbewegung und die Trägheit der Energie, A. Phys. *20*/1906/627
7. Über die vom Relativitätsprinzip geforderte Trägheit der Energie, A. Phys. *23*/1907/371
8. M. Planck: Zur Dynamik bewegter Systeme, 1907; Physikalische Abhandlungen und Vorträge, Vieweg, Braunschweig, 1958, 2. k. 179
9. Einiges, 251
10. Autobiographisches, 1949; Albert Einstein Philosopher-Scientist, ed. P. A. Schilpp, Tudor, New York, 1949—1951, 65
11. Principe de relativité et ses conséquences dans le physique moderne, Arch. Sci. Phys. Natur. Ser. 4 *29*/1910/144
12. A Brief Outline of the Development of the Theory of Relativity, Nature *106*/1911/782
13. Über den Einfluss der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes, A. Phys. *35*/1911/898

14. C. Seelig: Albert Einstein und die Schweiz, Europa, Zürich-Stuttgart-Wien, 1952, 72
15. Autobiographisches, 16
16. Relativität und Gravitation. Erwiderung auf eine Bemerkung von M. Abraham, A.Phys. *38*/1912/1063—1064
17. Principe de rélativité, 25—26
18. Seelig, 78—79
19. Ph. Frank: Einstein, His Life and Times, Cape, London, 1949, 104
20. M. Born: Über die Definition des starren Körpers in der Kinematik des Relativitätsprinzips, Phys. Z. *11*/1910/223
21. Э. М. Чудинов: А. Эйнштейн об отношении геометрии к реальности, Эйнштейновский сборник 1971, Наука, М. 1971, 302.
22. Über die Hypothesen, welche der Geometrie zu Grunde liegen, Hrsg. H. Weyl, 3. Aufl. 1923, 19
23. Über die Thatsachen, die der Geometrie zum Grunde liegen, Wissenschaftliche Abhandlungen von H. Helmholtz, Barth, Leipzig, 1883, 2. k. 618
24. Fiz. Szle *25*/1975/405
25. Nichteuklidische Geometrie und Physik, Die Neue Rundschau *36*/1925/18
26. Entwurf einer verallgemeinerten Relativitätstheorie und einer Theorie der Gravitation, Z. Mathem. Phys. *62*/1914/225
27. Über die Hypothesen, 17
28. C. F. Geiser: Elwin Bruno Christoffel. E. B. Christoffel, Gesammelte mathematische Abhandlungen, Teubner, Leipzig—Berlin, 1910, V
29. Die Grundlagen, 769
30. Autobiographische Skizze. Helle Zeit — dunkle Zeit, In memoriam Albert Einstein, Hrsg. C. Seelig, Europa, Zürich—Stuttgart—Wien, 1956, 11—12
31. Die Feldgleichungen der Gravitation, Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss. *48*/1915/847
32. A. Cayley: A Sixth Memoir on Quantics. idézve az orosz kiadás alapján: А. Кэли: Шестой мембар о формах. Об основаниях геометрии, Гостехиздат, м., 1956, 246.
33. H. Grassmann: Die Ausdehnungslehre von 1844 und die geometrische Analyse, Gesammelte mathematische und physikalische Werke, 1. k. 1. rész, Teubner, Leipzig, 1894
34. A. Einstein — M. Besso: Correspondance 1903—1955, Hermann, Paris, 1972, 20
35. Theory of Conjugate Functions or Algebraic Couples, with Preliminary and Elementary Essay on Algebra as the Science of Pure Time, 1837; The Mathematical Papers, Cambridge University Press, Cambridge, 1967, 3. k. 308
36. Letter to Graves on Quaternions or On a New System of Imaginaries in Algebra, 1844; Mathem. Papers 3. k. 108
37. Vergleichende Betrachtungen über neuere geometrische Forschungen (Das Erlanger Programm) 1872; Gesammelte mathematische Abhandlungen, Springer, Berlin, 1921, 1. k. 460
38. Levi-Civitá Ricci-életrajzából. Lásd C. Ricci-Curbastro: Opere, Cremonese, Roma, 1956—1957, 1. k.
39. Méthodes de calcul différentiel absolu et leurs applications, Mathem. A. *54*/1901/125; Opere, 2. k. 185
40. F. Klein: Über die geometrischen Grundlagen der Lorentzgruppe, 1910; Gesammelte mathem. Abhandl. 1. k. 551
41. Sur la dynamique de l'électron, Rendiconti Circ. Matem. Palermo *28*/1906/129
42. H. A. Lorentz: Versuch einer Theorie der electrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern, Brill, Leiden, 1895.
43. Das Relativitätsprinzip, A. Phys. *47*/1915/927. Az előadást Sommerfeld tette közzé Minkowski halála után
44. Raum und Zeit, Phys. Z. *10*/1909/104
45. Athenaeum, Budapest, 1904, 232—234
46. Neue Theorie des Raumes und der Zeit, Die Grundbegriffe einer Metageometrie, Leipzig, 1901
47. K. Pearson: Ether Squirts, Amer. J. Mathem. *12*/1891/309
48. E. Mach: Über die Spectra chemisch verschiedener Körper, Z. Mathem. Phys. *7*/1862/214
49. Über die Hypothesen, 20
50. Nichteuklidische Geometrie und Physik, 20
51. H. Hertz: Die Prinzipien der Mechanik in neuem Zusammenhänge dargestellt, Gesammelte Werke, 3. k. Barth, Leipzig, 1894. V. ö. H. Heltmholtz: Über die physikalischen Bedeutung des Prinzips der kleinsten Wirkung, J. reine angew. Mathem. *100*/1887/137, 213; Prinzipien der Statik monozyklischer Systeme, u.ott *97*/1884/111, 317; E.Mach: Mechanik.
52. Lásd pl. A. T. Григорьян, А. Н. Вяльцев: Генрих Герц, 1857—1894, Наука, М. 1968, 291.
A. Unsöld: H. Hertz „Prinzipien der Mechanik", Versuch einer historischen Klärung, Phys. Bl. *26*/1970/338
53. A. Einstein: Ernst Mach, Phys. Z. *17*/1916/102
54. Unsöld, i. m. 340, 342. Born sem érvel a személyes hatás mellett, amikor egybeveti a két kutató módszerét (Phys. Z. *17*/1916/5(5)
55. V. Varičak: Die Relativtheorie und die Lobatschefskijsche Geometrie, Phys. Z. *11*/1910/288
56. V. Varičak: Anwendung der Lobatschefskijschen Geometrie in der Relativtheorie, Phys. Z. *11*/1910/93
57. Rad Jugoslovenske Akademie *169*/1907/110
58. F. Kottler: Über die Raumzeitlinien der Minkowski'schen Welt, Sitzungsber. Kais. Akad. Wiss. Wien, *121*/1912/Abt. II. c. 1659
59. Idézi G. Holton: The Metaphor of Space-Time Events in Science, Eranos-Jahrbuch *34*/1965/41
60. S. Shankland: Conversations with Albert Einstein, Amer. J. Phys. *31*/1963/48
61. S. Shankland: Michelson-Morley Experiment, Amer. J. Phys. *32*/1964/16
62. Idézi G. Holton: Einstein and the „Crucial" Experiment, Amer. J. Phys. *37*/1969/969
63. A Reiser: Albert Einstein, A Biographical Portrait, Boni, New York, 1930, 66
64. Autobiographisches, 46; Einiges über die Entstehung der allgemeinen Relativitätstheorie, Mein Weltbild, 251

A FIZIKA TANÍTÁSA

ÉN, TE ÉS A HARMADIK

David Hawkins
Colorado Egyetem, Boulder

Szeretnék arról beszélni, mit és hogyan tanulnak meg a gyermekek helyesen megszervezett oktatás keretében, konkréten egy jó iskolában. Témám ezért a kapcsolat a tanár és a gyermek, valamint egy harmadik tényező között, amelynek jelen kell lennie, hogy teljes legyen a kép; ez indokolja a cikkem címében fellelhető háromszöget.

Erről a kapcsolatról már sokat beszéltek, sajnálatos módon túlságosan gyakran csonkított formában. A tanár-gyermek kapcsolatot több másjellegű kapcsolattal hozták analógiába. Így például régebben azt szokták mondani: „Ennek a gyermeknek jót tenne a kemény munka és a

Dawid Hawkins 1976 május 3-án előadást tartott Budapesten az ELFT Oktatási Szakcsoportjában. Előadása mondanivalójához közelálló írását „The Informed Vision" című tanulmánykötetéből vettük (Agathan Press New-York, 1974). Fordította Haiman Ottó.

fegyelem". Ez, ugyebár, szülő—gyermek kapcsolatnak tűnik. Vagy, újabban, azt mondják: „Ennek a gyermeknek szeretetre van szüksége". Ez is úgy hangzik mint egy szülő—gyermek reláció jellemzése. Biztos vagyok benne, hogy egyik állítás sem teljesen hamis, de nézetem szerint egyik sem nevezhető kielégítőnek. A valóságban a tanár és a gyermek között különleges, más emberi kapcsolattal párhuzamba nem állítható reláció áll fenn, amelyet érdemes lesz mozzanataira bontani.

Egyik tanár ismerősöm — meglehetősen jó tanár — azt szokta mondani, hogy nem szereti a gyermekeket. Biztos vagyok benne, hogy ilyenkor a „szeretni" szót különleges értelmezésben használja. Valójában azt nem szereti, ha a gyermekek tanácstalanok, ha nincsenek irányítva és nem tanulnak, ezért arra törekszik, hogy minél előbb túlsegítse őket ezen az állapoton. Ezt a tanárt azért említettem, mert úgy vélem, hogy a szerető hozzáállás, a szülők jellegzetes hozzáállása nem az igazi tanári hozzáállás. Igazinak én inkább a tiszteletet nevezném. Nem kívánom kétségbevonni, hogy a jó tanár fontos tulajdonságai között bizonyosan megtalálható a szeretet a gyermekek iránt, de a tanár—gyermek kapcsolat lényege nem ez. Igaz, hogy személyi kapcsolatról van szó, de nem ilyen személyi kapcsolatról. Szeretném mindezt egy olyan oktatási rendszer keretében elemezni, amelyet a közelmúltban tanulmányoztunk, érdekesnek találtunk és ezért szeretnénk tovább vizsgálni. A rendszer jellegzetes törekvése az, hogy az iskolás gyermekeknek gyakrabban és nagyobb mértékben tegye lehetővé a konkrét tárgyak használatát és hogy ebben a gazdagabb tárgyi választékban nagyobb legyen döntési szabadságuk. Arról is szeretnék szólni, hogy a háromszög harmadik sarka hogyan befolyásolja a másik kettő közötti relációt, vagyis hogy a tárgynak mi a szerepe és helye a tanár és a gyermek közötti kölcsönös érdeklődési- és csereviszonylatban. Mivel a filozofálgatást kedvelő, javíthatatlan természetem van, hadd kezdjem nagyon széles alapon és hadd beszéljek emberi lényekről általánosságban, hiszen a gyermekek szintén jellegzetesen emberi lények.

Amikor ilyen kérdéseken gondolkozom, mindig vissza kell térnem egy filozófiai hagyományhoz, amely nézetem szerint mélyebb sok egyéb hagyománynál. Lényege azzal a tetszőlegesen átfogalmazható tétellel fejezhető ki, hogy az emberek nem sokat érnek, csak amennyiben és amennyire külső, rajtuk túlmenő dolgokban részesek és érdekeltek.

Minden ember térben körülhatárolt fizikai test, de személyiségnek csak akkor és annyiban tekinthető, amennyiben a környező világgal élő kapcsolatban áll. Minél több ilyen élő kapcsolatot szakítunk meg, annál inkább zárjuk be — képletesen és szószerint is — az illetőt, annál kevesebbre redukálódik. Végülis, amikor bőrének felületéhez érünk — egy képletes elzáró felülettel —, csupán bensőjét meghagyva, de megszüntetve minden kapcsolatát a környező világgal, nem sok marad meg emberi lényéből.

A régi hindu filozófusok az ember lényegének ezen körülírását a tükör hasonlatával fejezték ki. A hindu szentírás, a Baghavad Gita, csodálatos képet fest a lélekről, amikor egy rózsa tükörképének nevezi. A vallásos filozófiák többségéhez hasonlóan ezt a filozófiát is a halál és a vígasztalódás kérdései foglalkoztatják. Ebben a filozófiában a halhatatlanságot az fejezi ki, hogy amikor a halál beáll, a tükröt elvesszük ugyan, de a rózsa ott marad. Ez a hasonlat szerintem igen mélyértelmű. Persze nem felel meg a lélekről alkotott keresztény elképzelésnek, de hangsúlyozza azt, amiről beszélni szeretnék, ez pedig a személyiség elválaszthatatlansága attól a világtól, amelyben él és hatást fejt ki, továbbá az a tétel, hogy a személyiség valamiként a világgal való kölcsönhatásainak mértékével mérhető. A lélek nem a testen belül található, hanem rajta kívül, mégpedig kapcsolatainak színterén.

Ugyane gondolat legpontosabb kifejezése irodalmunkban tudomásom szerint egy híres angol író egyik színművében is megtalálható. Idézem, mert szemléletesen fejezi ki két ember és a nagy HARMADIK, a világ kapcsolatát. Shakespeare Troilus és Cressida című színművéről van szó. Egy híressé vált görög vállalkozás során Achilles problémázik Trója ostromával kapcsolatban. Társai lelket próbálnak önteni belé, ennek során Ulysses akcióba lép. Ez a drámának olyan része, amikor néhány percig semmi nem történik. Ha Shakespeare-nél semmi nem történik, akkor két eset lehetséges: vagy vaskos tréfák következnek a karzat férfiközönségének mulattatására, vagy pedig a darab lényegét érintő filozofálgatás. Ebben a színműben, ezen a helyen a filozofálgatás történetesen nemcsak Ulysses azon törekvésével függ össze, hogy Achillest cselekvésre bírja, hanem általánosabb szempontból is van lényeges mondanivalója.*

ULYSSES: *Azt írja nekem egy*
Furcsa fickó: „Ember — bármily kiváló,
S bármennyije van, kint vagy bent — soha
Nem kérkedhet, hogy kincse az övé,
S csak visszfényében érzi a sajátját;
Így erényed is másokat hevít,
S csak azok vetik vissza ezt a hőt az
Első forrásra"

ACHILLES: *Ne csodáld, Ulysses,*
A szépséget, melyet arcunk visel,
Gazdája nem észleli: más szemének
Hizeleg az; s a szem, legszellemibb
Érzékünk, szintén nem látja magát,
Nem lépvén ki magából; szembe-szem
Viszont egymás képét köszöntheti:
Mert a látás csak úgy fordul magára,
Ha már útra kelt, s így egyesül azzal,
Ami tükrözi. Ez természetes.

ULYSSES: *Engem nem is a tétel lep meg: azt*
Ismerjük; de hogy hova vág az író,
Aki nyomatékosan bizonyítja,
Hogy az ember nem ura semminek
(Bármi van benne vagy ered belőle),
Ha meg nem osztja másokkal a lényét:
Sőt erről még sejtelme sem lehet,
Míg elébe nem tárulkozik a
Tetszésben, mely, mint boltozat a hangot,
Visszaveri; vagy mint egy érckapu
A fényárban, fölfogja s ránk vetíti
A Nap hevét s alakját."

Nincsen az az Ajax, nincsen az az Achilles, aki ura lehetne valaminek, vagy tudatában lehetne saját értékének, ha ehhez mások, vele azonos dolgokban érdekelt személyek, hozzá nem segítik a tények tükrözésével. Ezzel azt akarom mondani, hogy nincs az a gyermek, aki ismeretekre, jártasságra és tudásra tehetne szert vagy tudatában lehetne saját ismereteinek anélkül, hogy másokkal érintkezzék, akik részei vállalkozásainak. A TE nélkül az ÉN nem fejlődhet. HARMADIK tényező nélkül azonban a külvilág tartalmatlan és (Shakespeare idézetünk utolsó soraira utalva) a Nap heve és alakja hiányában marad két egymással szembenéző tükör.

A gyermekek — mint fentebb hangsúlyoztam — jellegzetesen emberi lények, azonban az emberek meglehetősen jól megkülönböztethető csoportját alkotják. Ezt leszögezem, mivel nagyon gondosan szeretnék eljárni atekintetben, hogy a különbségeket se el ne túlozzam, se el ne hanyagoljam. A gyermekek képesek arra, hogy sok bonyolult, nehéz dolgot megtanuljanak — egyesek meg is tanulják. A tanulás maga olyan környezetben megy végbe, amelyben más emberek is fontos szerephez jutnak, a tanulási folyamat részesei. Sokkal előbb, mint ahogyan iskolák létesültek (az iskola meglehetősen újkeletű intézmény emberi fajunk történetében), már voltak tanítók: olyan helybeli felnőttek, akik reagáltak azon jeladásokra, amelyekkel a gyermekek a felnőttek figyelmét magukra vonták (a gyerekek jól tudják, hogyan kell ezt csinálni). Ezek a tanító felnőttek szerepüket teljesen spontán módon, a neveléselmélet ismerete nélkül is be tudták tölteni.

A továbbiakban az elektronikából vett analógiával kell élnem annak vázolására, ami egy tanuló tudatában végbemegy. Egy áramkör-rendszer bizonyos csatornáiban

* Idézet a drámából Szabó Lőrinc fordításában.

jelek terjednek „kifelé", ott valami történik, azután újabb jelek érkeznek vissza más csatornákon keresztül. Ez utóbbi jeleket megfelelő visszacsatolás létesítésére használják fel. Gyermekek azonban nem mindig képesek arra, hogy a helyes visszacsatolás érdekében a jelek kiválogatását önállóan elvégezzék. A felnőtt funkciója a gyermek tanulási folyamatában, hogy ellássa egy külső visszacsatolási hurok szerepét, amely a gyermek saját döntéseitől és cselekedeteitől függően a tanuláshoz szükségesnek vélt szelektív ítélet-visszacsatolásról gondoskodik. A gyermek érdeklődése és cselekvése a felnőtt valamilyen reakcióját váltja ki, amely azután a gyermek számára hozzáférhetővé válik. A gyermek még önmagáról is úgy tanul, hogy nem emberi és emberi környezetére egyaránt hatást gyakorol és ennek eredményeiről tudomást szerez.

A tanár funkciója a fentiek szerint tehát az, hogy diagnózissal és segítséggel reagáljon a gyermek magatartására, mégpedig olyan reakciókkal, amelyeket helyénvalónak és szükségesnek tart annak érdekében, hogy a gyermek adott pillanatban kifejtett tevékenysége, annak folyamata, teljessé váljék. A tanárnak e funkciója nem tartós, valamikor végződnie kell. Mondhatjuk — de nézetem szerint gondoskodnunk is kell erről — hogy a tanulót arra kell megtanítani, hogyan helyettesítse saját belső funkciókkal az eddig felnőttek által ellátott funkciókat. Ilyen értelemben az ember akkor válik műveltté, amikor saját tanítójává lesz. Ha a műveltség azt jelenti, hogy az embernek már nincs szüksége tanárra — a műveltség ezen definícióját melegen tudom ajánlani — ez természetesen csak úgy lehetséges, hogy a most már műveltnek nevezhető egyén valamikor megismerkedett a tanulási folyamat funkcionális modelljeivel, vagy kapcsolatba került olyan emberekkel, akik az előbb külső funkciónak nevezett visszacsatolásról gondoskodni tudtak, megtanulta e funkció ellátásának miértjét és ezt önmaga számára és javára el is látja. Ezen a szinten az illető joggal tekintheti magát oktatástól mint olyantól, vagy oktatóktól függetlennek, vagyis saját oktatójának. Nyilván mindnyájan azt reméljük, hogy amint az oktatás-nevelés formális, intézményes része lezárul, leglátványosabb és legértékesebb eredményként a gyermek azon képességről tesz tanúságot, hogy önmagát nevelje. Ha ez nem következik be, azt sem remélhetjük, hogy az iskolában kezdeményezett egyéb folyamatok hatása tartós lesz.

Talán észrevehető, hogy munkahipotézisem valóban Shakespeare hasonlatán alapul. Az emberek fejlődéséhez és gyarapodásához kétféle információ-együttes feldolgozására, asszimilációjára van szükség: egyik a természeti környezetből származik, a másik olyan dolgok összessége, amelyekről az oktatás keretében kizárólag más emberek tudnak gondoskodni. Néha azt kell gondolnom, hogy a jelenleg közkedvelt didaktikai módszerek alkalmazása közben — ezek a módszerek sajnálatos módon amerikai iskoláinkban sokkal fejletlenebbek, mint az angol elemi iskolákban — elfeledkezünk az ember oktatói szerepének kiemelkedően nagy jelentőségéről. Hajlamosak vagyunk azt állítani, hogy amennyiben a gyermekek részére biztosítjuk a megfelelően sokrétű, manipulálható és kellő intenzitással reagáló környezetet, akkor szinte minden magától megy. Ha egy ilyen elvek alapján vezetett osztályba látogat az ember — különösen, ha olyan tanár vezeti, akinek sok ügyes pedagógiai fogás van a tarsolyában — az a lenyűgöző látszat, hogy a tanárra voltaképpen nincs is szükség, akár el is hagyhatná a termet, senki nem venné észre. Ha a látogató történetesen nem ismeri a szóbanforgó pedagógiai fogásokat, szinte csodálkozik azon, mi minden lehet a tanár tarsolyában. Ha minden jól megy, még olyan látszat is keletkezhetik, hogy az egész oktatási folyamat spontán zajlott le. Ez nyilvánvalóan veszélyes tévhit, amely csak olyan időszakokban megalapozott (jó iskolákban ezek az időszakok elég gyakoriak), amikor a tanulóknak nincs szükségük a külső visszacsatolásra. Amikor viszont szükség lenne rá, azonban senki nincs jelen, aki a felnőttek reakcióiról gondoskodhatna, akkor nem mindig képesek továbbhaladni a vizsgálódás, a kutatás és megismerés, a tanulás útján, mert olyan akadályba ütköznek, amelyen saját erejükből nem tudnak túljutni. Ha nem áll rendelkezésükre segítség, a vizsgálódás intenzitása alábbhagy és a tanulási folyamat szóbanforgó epizódja végetér anélkül, hogy meghozta volna azt az előirányzott és várt eredményt, amelyet különben meghozhatott volna.

Félreértés ne essék, egyetértek a tanulók környezetének minél gazdagabbá és változatosabbá alakításával; hasznosnak tartom az olyan oktatást, amelynek kereteiben a gyermekek nagyobb csoportján belül módot adunk az önálló, differenciált cselekvésére, és híve vagyok az olyan nevelésnek, amely sokkal kisebb mértékben beavatkozó jellegű, mint ahogy általában szükségesnek vélik. Azt hiszem, tárgyilagos megállapítás — nem pedig dicséret vagy elmarasztalás — hogy amennyiben az iskolában úgy tanítanak, mint nálunk Amerikában általában, ahol meglehetősen passzív tanulók, rendezett sorokban és oszlopokban ülve azt a benyomást keltik, hogy figyelnek (pedig mindössze az történik, hogy nem zajonganak, nem rendetlenkednek) úgy a tanár nem sok információt kap róluk. Márpedig információ nélkül a tanár nem tudja megállapítani, mire van éppen szükségük, ennélfogva tanári funkcióját csak rosszul láthatja el. A tanulók szemmel látható és érzékelhető aktivitása viszont, ha eléggé önálló és igénybeveszi a „nagy izmokat", nemcsak a „kis izmokat", rendkívül fontos lehet a tanár számára, amennyiben nagy mennyiségű, különböző jellegű információval látja el. Ez az információ sokkal tartalmasabb, mint a szokásos úton kapott válaszok, amelyeket gyermekek feladatmegoldások során, vagy feltett kérdésekre adni szoktak. Ha egy pedagógusnak osztályozási nehézségei vannak, ez is annak a jele, hogy diagnoszta szerepében csődött mondott.

Mindez eléggé nyilvánvaló. Nem akarom azonban azt állítani, hogy mindenképpen megvalósul, csupán azt szögezem le, hogy elérhető a tanulókról kapott diagnosztikai információ tartalmasabbá tétele, ennek alapján pedig a tanári magatartásforma finomítása, pontosítása, ha a fentiek szerint járunk el és nem kötelezünk minden tanulót meglehetősen uniformizált „teljesítésre". Ettől függetlenül a tanár természetesen nem juthat információ birtokába vagy nem tudja felhasználni azt, ha engedékeny, lagymatag és ha nem gondoskodik a külső visszacsatolásról amikor úgy látja, hogy szükség lenne rá. Jól tudjuk, hogy a gyermekek sohasem viselkednek egyformán, még akkor sem, ha ezt várjuk el tőlük. Ha mégis ez a látszat, akkor annak tulajdonítható, hogy elsajátították annak technikáját, hogyan nyerjék el a pedagógus tetszését — vagy nemtetszését, ha történetesen sztrájkolnak — és ilyen körülmények között a pedagógus képtelen a szükséges diszkriminációra.

A tanár beavatkozásának igazi fontossága olyan esetekben is nyilvánvalóvá válik, amikor egy gyermeket kevés dolog érdekel, vagy semmiféle tanári gondoskodásra, aktivizálódási lehetőségre nem reagál. Ilyen gyermek, aki alig ad önmagáról információt, hallgatag és zárkózott, még ha sokszor „jó" gyermeknek is nevezik, igazi problematikus eset. A tanár azonban ilyenkor is észreveheti az érdeklődés és a figyelem apró jeleit, egyes utalásokat arra, mi érdekelné, mi kötné le ezt a gyermeket. Elegendő számú „nyom" gyűjtésével és kiértékelésével, megfelelő kitartással minden bizonnyal talál valamit, ami le is köti a gyereket. Ha ez sikerül, ezzel megteremtette egy új kapcsolat alapjait a gyermekkel és ez az, ami igazán fontos.

Ami ezekután még hátra van, elég könnyen leírható: Ha a gyermekek különbözőképpen viselkednek és többféle tennivaló közül válogatnak, amikor igazi alternatívák elé állítják őket, akkor — viselkedésük „nyelvét" megfelelően értelmezve — szükségképpen sok információ birtokába jut a pedagógus. Nyilvánvaló, hogy ebben a diagnosztikai és tervezési folyamatban minden gyermekkel állandóan és folyamatosan senki nem lehet eredményes. Minden találatra szükségképpen több félremagyarázás vagy melléfogás jut, a pedagógusnak azonban ilyenkor arra az álláspontra kell helyezkednie, hogy nem az eredménytelen, hanem az eredményes lépések számítanak.

A tanár és a tanuló közötti ÉN—TE reláció más vetületeiben is van a fentieknek fontossága: a gyermek a felnőttel kapcsolatban szert tesz valamire, amit a bizakodás, a bizalom és a tisztelet szavakkal lehetne körül-

írni. A felnőtt tett valamit a gyermek érdekében, amit ez maga nem tehetett volna és a gyermek ezt tudja is. A gyermek kapcsolatba jutott valami új dologgal, amiről tudja, hogy továbbsegítette, tudatában van annak, hogy olyan ismeretekre tett szert, amelyekkel azelőtt nem rendelkezett. Ezzel az ő életében lényeges szerepet kapott a pedagógus. Gondoskodott a külső visszacsatolásról, amire a gyermek önmagában képtelen lett volna. A gyermek ezzel a szolgálattal együtt a szolgálatot tevő személyt is értékelni fogja.

Mit érez a gyermek ezután az iránt, aki ezt tette az ő fejlődése érdekében? Nem szükségképpen szeretetet, de bizonyára valami tiszteletfélét, amivel olyanok iránt viseltetünk, akik kiemelkedően hasznosaknak bizonyultak életünk ügyes-bajos dolgainak előbbrevitelében. A szeretet szó talán szintén megfelelne, ha nem lenne annyiféle értelmezése és ha nem csépelték volna el annyian, nem utolsó sorban a pszichológia teoretikusai.

A pedagógus kapcsolatai az egyes gyermekekkel nyilván különbözők lesznek, éppen a gyermekek különbözősége miatt. Ha egy pedagógus egy gyermeknek választási lehetőséget nyújt, akkor a gyermek választása alapul szolgál azon döntéshez, amellyel a pedagógus a nevelés soronkövetkező mozzanatát meghatározza, kijelöli önmaga számára a tennivalókat. Ez a pedagógus döntésének tárgya (nem a gyereké), a pedagógus nevelési céljaitól függ, az ő felelősségét terheli. Ha a pedagógus döntése történetesen az, hogy a gyermeket magára hagyja, ezért ugyanúgy felelős, mint amikor tennivalóként a beavatkozást írja elő önmagának.

A felnőtt (esetünkben a tanár) beavatkozása a gyermek életébe olyan mozzanat, amely kiegészítheti, de megváltoztatni is képes a gyermekben spontán kialakult érdeklődést. Hogyha — mint lenni szokott — a gyermeket egy szappanbuborékos kísérletsorozatban valami különösképpen érdekli, akkor a tanár „véletlenül" olyan tárgyakat is elhelyezhet a kísérleti berendezés közelében, amelyek első látásra semmilyen kapcsolatban nincsenek a szappanbuborékokkal. Például huzalból alakított kockákat, tetraédereket, spirálokat és esetleg további huzalt és egy forrasztópákát. Az ezzel a felszereléssel előállítható szappanhártyák biztosan lekötik sok ember figyelmét, a gyermekét is. Minek tulajdonítható ez? Nos, bizonyos formai, geometriai eleganciának, esetleg a színeknek; a szappanhártyát megfelelőképpen megvilágítva csodálatos interferencia jelenségek látszanak. A figyelem ezen csapdája kérdésfelvetésekben és lehetőségekben egyaránt gazdag. Egyes gyermekek ezt csak tudomásulveszik és másra térnek át; más gyermeket azonban a téma megfogja és nagyon kezdi érdekelni. Nézetem szerint ez az érdeklődés rendkívül fontos. Az érdeklődés lehet esztétikai, lehet matematikai, vagy természettudományos jellegű. Mindegyik lehetőség fennáll és egyik sem kizárólagos. A gyermek és a tárgy közötti új relációt vagy annak lehetőségét a tanár teremtette meg, még akkor is, ha mindössze arról gondoskodott, hogy a tárgy a helyiségben legyen. A gyermek tudatában ezzel is fontossá vált a tanár személye, mint „TE". A tárgy pedig a gyermek számára nemcsak valami, amivel szórakoztató játékot lehet játszani, érdekes, színes és eddigi tapasztalatának számos egyéb tárgyával van kapcsolatban, hanem ami az alapja a tanárral való kapcsolat új szintjének — az öntudat magasabb fokán.

Amíg a gyermek nem cselekszik önállóan, a tanár nem kezelheti önálló személyiségként, nem töltheti be annak a tükörnek a szerepét, amelyben a gyermek kutatónak vagy ezermesternek látja magát. Mindaddig, amíg a gyermek nem fejlődik autonóm emberi lénnyé, aki saját gondolatait végiggondolja és ezek alapján fejezi ki magát sajátos, egyéni módon, a tanár tiszteletének még nincs tárgya, csak lehetősége. Ezért véleményem szerint az oktatás első, alapvető célja a tanítvány ezen fejlődésének előmozdítása. Azzal, hogy a gyermek megtette ezt a lépést, életre kel a tanár számára, de a tanár is a gyermek számára. Megvitathatnak közös témákat, együtt kapcsolódhatnak a világ valamilyen tárgyához.

Kisgyermekekkel bizonyos helyzetekben mindig nehezen boldogultam. Nem nagyon ismertem a kicsinyek világát és úgylátszik — mint sokan mások — elfelejtettem, hogy valaha magam is ilyen voltam. Imponált nekem, hogy egyes emberek kisgyermekkel való találkozásuk alkalmával szinte automatikusan elismerést élveztek a gyermek részéről, míg más emberek ugyanezen gyermeknél a látszólagosan nagyon barátságosan induló találkozás során folyamatosan a gyermek visszahúzódását, sőt a továbbiakban félelmet, esetleg rettegést váltottak ki. Mai ismereteim szerint ez a sorsa azon jószándékú felnőtteknek, akik a gyermekkel — ÉN és TE alapon — vákuumban akarnak baráti kapcsolatba kerülni. Ilyenkor többnyire sokkot éreznek az érintettek, és azt hiszem mindnyájan tudjuk, milyen ez az érzés. Én magam csak lassan tanultam meg (egy jó tanártól), hogy az ilyen helyzetekben a legfontosabb tényezők egyike valamilyen „harmadik dolog", például egy tárgy, amely a gyermek és a felnőtt együttes érdeklődését váltja ki, amely közös a két személy külső kapcsolataiban. Csak ilyen helyzetben lehetséges szilárd kapcsolat két személyiség között, akár felnőttekről, akár a pedagógusról és a gyermekről van szó.

Legtudatosabban átélt ilyen jellegű élményemben néhány évvel ezelőtt volt részem, amikor egyedül maradtam két nagyon kis gyermekkel. Feleségemmel és e gyermekekkel kórházba mentünk anyjukért, harmadik testvérük születése után. Apjuk éppen beteg volt, emiatt némi nyugtalanságot már érezhettünk náluk. Feleségemmel, Frances-szel nagyon jól megértették egymást; hozzáteszem, hogy Frances tanított meg engem előzőleg a gyermekekkel való bánásmódra. Az együttlét kettőnkkel szemlátomást problémamentes volt, azonban azelőtt soha nem kerültünk olyan helyzetbe, hogy a gyermekek velem maradtak volna egyedül. Valahol a kórházban a nővér hirtelenül, határozott hangon kijelentette, hogy gyermekek ezen a ponton túl már nem mehetnek, így hát feleségem ment be a fiatal mamához és nekünk hármunknak kívül kellett maradnunk. Ez volt egyike azoknak a pillanatoknak, amikor meglehetősen kritikus folytatásra lehetett számítani. Mivel nem volt beidegzett gyakorlatom, teljesen tudatosan a háromszögelvet vettem elő. Eszerint kellett volna valami harmadik dolog, ami nem volt sem ÉN, sem a két gyermek, hogy ne keletkezzék vákuum, de hirtelenében nem akadt ilyen. Körülnéztem a sivár kórházi folyósón. Egyszerre az egyik falon fényképsorozatot fedeztem fel egy bankettről, amelyet nemrég a kórház egyik adományozója tiszteletére rendeztek, így hát kétségbeesésemben fogtam a gyermekeket, átsiettem velük a képsorozathoz és azt mondtam: „Nézzétek csak!"

Mindennek elmesélésével nyilván lelepleztem magam, hiszen olvasóim közül legtöbben nyilván tudták volna, hogyan kell ilyen helyzetben viselkedni; én mégis teljes diadalnak könyveltem el az eredményt és egy tudatosan alkalmazott elv igazolását láttam benne, még ha eléggé mechanikusan alkalmazott elvről is van szó. Az elv a gyakorlatban mindenesetre bevált.

Szerintem ez az epizód — bármennyire triviális és felületes is önmagában — jelképesen sok mindent tartalmaz, ami a tanár—gyermek viszonylat szempontjából fontos, nevezetesen a közös érdeklődést, a tárggyal való közös kapcsolatot. Persze, fontos dologban nem lehet gyermekeket becsapni, így tehát az érdeklődést nem lehet huzamosabb ideig mímelni, mint én az előbb leírtak során. Ha a felnőtt nem talál igazán érdekes tárgyat és olyan érdeklődést színlel, amely valójában nincsen meg, az egész konstrukció nem lehet tartós. Hogyha azonban a közös érdeklődés megvan, nemcsak sokáig tartható fenn, hanem tovább is fejleszthető. Ehhez a tanárnak tudnia kell észrevenni, hogy a gyermek szemei min akadnak meg és értelmeznie kell azokat a szavakat és cselekvéseket, amelyekkel a gyermek próbálja kifejezni közölnivalóit. Ez esetleg nem a felnőttek nyelvén történik, ezért a gyermek jelzéseinek felfogása gyakorlatot és szoros figyelmet igényel.

Képzeljünk el egy hosszú, mindkét végén lezárt átlátszó plasztikcsövet, megtöltve vízzel és tetszés szerinti egyéb tárgyakkal. Sok évvel ezelőtt én ezt a játékszert nagyon triviálisnak, sőt bárgyúnak tartottam volna és azt mondtam volna: „Mit lehet ebből okulni?" Az igazat megvallva, még mindig nem tudom, de most már azért

nem, mert szerintem nagyon is sokat lehet belőle tanulni. Számos szó és fogalom van a fizikában, amely e tárgyhoz kapcsolható; de színről, mozgásról, vagy egyéb esztétikai fogalmakról is lehetne beszélni. Meglehetősen sok gyermeket láttam, akiket ez a fura tárgy intenzíven foglalkoztatott, mindenesetre eléggé ahhoz, hogy arra a meggyőződésre jussak: sok lehetőséget rejt magában. Persze nemcsak erre a konkrét műanyagcsőre lehet gondolni, hanem sok más összebarkácsolt vagy összekészített tárgyra és a természet világának számos objektumára is. Ilyen tárgyak különleges kapcsolatokat tudnak létrehozni. A gyermek intellektusának működése valahogyan arra irányul, hogy bekebelezze a világot, hogy asszimilálja a környezetét, többek között természetesen a szociális környezetet, de az élettelen környezetet is. Beleértendő ebbe a hétköznapi világban rejlő lehetőségek némelyike is; ezeket a gyermekek túlnyomó része frissebb, éberebb szemekkel nézi, mint a felnőttek. Minél többrétű a felnőttek által felkínált érintkezési felület a külvilág tárgyaival, annál szilárdabb a kapcsolat a bennük érdekelt személyek között.

Végül egy különleges érdekű témát szeretnék érinteni, amely a pszichológia elméleteinek területére visz bennünket. Arról a kérdésről van szó, hogy az emberek mi módon jutnak el a tárgyilagossághoz, a valószerűség helyes megítéléséig, vagyis mi módon jutnak el a környező világról alkotott szilárd és megbízható kép kialakításáig. Szó van továbbá arról is, hogyan tudják — anélkül, hogy a fantáziálás képességét elveszítenék — világosan elhatárolni a tudott vagy megtanult dolgokat azoktól, amelyeket csupán hisznek, vagy elképzelnek stb. Arról beszélünk tehát, hogyan teremtenek rendet a hiedelem és elhihetőség fokozatainak és fajtáinak világában, ami pedig az emberi intellektus legfontosabb teljesítményei közé tartozik.

Úgy vélem, vannak olyan gyermekek, akiknek az a képességük, hogy az egyes dolgokat összefüggő egésszé összeillesszék, elsősorban az emberi világgal való kapcsolataikból adódik, míg más gyermekeknél ez a képesség először az élettelen világgal való kapcsolatok kiépítése révén fejlődik ki.

A szintézisre való képesség, vagyis a képesség arra, hogy a gyermek stabilis referenciakeretet teremtsen, amelyen belül sok epizód összefüggően elhelyezhető, nézetem szerint akkor alakul ki, amikor a gyermek az éncentrikus (a szerző terminológiájában: autisztikus, a ford. megj.) viselkedésről a vizsgálódó viselkedésre tér át. A gyermek én-centrikus viselkedése minden bizonnyal veleszületett, és a kisgyermek elemi szükségleteinek kielégítésével függ össze. A másik viselkedés jellegzetessége: nincsen végcél-irányítottsága, legalábbis nem irányul egy előre meghatározott cél elérésére. Az elégtételben, vagy a tevékenységet pozitív értelemben befolyásoló élményben menetközben részesül a gyermek és nem a végén; ez pedig a jártasság élménye, nem a jóllakottságé. A viselkedés mindkét fajtája a gyakorlás során továbbfinomul, azonban a vizsgálódó viselkedést nem köti és nem korlátozza az olyan szükségletek valamely rendszere, amelyeknek feltétlenül elsőbbségük van. A gyermekek első lényegesebb, szintézisben megnyilvánuló eredményei, amelyeket vizsgálódó tanulás során elérnek, sok esetben az emberi világgal kapcsolatosak. Az is lehetséges azonban, hogy ezeket az eredményeket ugyanúgy, esetleg könnyebben elérik annak során, hogy fizikai környezetük tárgyait, azoknak reakcióit tanulmányozzák vizsgálódó és kísérletező tevékenység keretében. Mindkét esetben a vizsgálódás motivációja és a tevékenységet erősítő érzelmek és élmények más jellegűek, mint az alapvető szükségletekkel összefüggő tevékenység esetében, mely utóbbi fő céljai: a bekebelezés ás a birtokba vétel. Minden gyermek fejlődését korlátozni, sőt torzítani fogja, ha környezetében csak a személyi, vagy csak a személytelen vonatkozásokat vizsgálja. Hangsúlyozom, hogy ezen vonatkozások vizsgálatáról, nem pedig ismert célra való kiaknázásáról van szó. Legtöbb pszichológus — ezt olvasmányaim és vitáim alapján egyaránt állíthatom — arra hajlik, hogy az emberi cselekvés motivációinak gyökerét személyek közötti kapcsolatokban lássa. Szerintük a gyermek egész fejlődése során a külvilággal való kapcsolatok alapvető dinamikája visszavezethető az anyjával és más, közelálló személyekkel való kapcsolatára. Közismert módon ezek azok a fogalmak, amelyekre Freud egész rendszerét felépítette; ugyanezek a fogalmak — bár manapság már nem találkozunk túl sok ortodox Freud-követővel — mindmáig pszichológiai elméletek alapjait képezik, melyeknek fő tézise, hogy az életben lényeges alakító tényezők csakis más emberek lehetnek. Hogyha pedig valaki az embereken kívüli világra fordítja figyelmét — például állatokra, növényekre, a fizikai környezetre, esetleg szappanbuborékokat és műanyag csöveket is beleértve — az ilyen elméletek szerint ez annak tulajdonítható, hogy az emberi világban akarnak valamilyen eredményt elérni. Hasonló állítás például az, hogy a gyermek azért cselekszik meghatározott módon, mert úgy gondolja, ezzel elnyeri tetszésedet, vagy éppenséggel nemtetszésedet, vagy pedig mert meg akar tőled szabadulni; a magyarázat sohasem szól úgy, hogy a gyermek teljes szívvel akarja csinálni, amit éppen csinál. Más szavakkal kifejezve: lépten-nyomon érezhető az a tendencia, hogy a gyermekek tárgy-orientált érdeklődését kevésbé alapvetőnek tartsuk, mint személy-orientált érdeklődését, vagyis leszármaztatott érdeklődésnek. Az én állításom pedig az, hogy a tárgyak iránti érdeklődés teljesen valóságos, teljesen független és autonóm érdeklődés, amely kisgyermekekben ugyanúgy megvan, mint a személyek iránti érdeklődés. Egyes gyermekek pedig emberi fejlődésre csupán úgy képesek, hogy először az élettelen világgal lépnek vizsgálódásszerű, érdeklődésen alapuló kapcsolatba.

Természetesen ezzel ellentétes példák is ismeretesek, nevezetesen gyermekek, akik nagyon korán alkalmazzák azokat a fortélyokat, amelyek mintha veleszületett képességek lennének, de eredményesen továbbfejlesztik. Ezek a fortélyok arra szolgálnak, hogy személyektől valamit kapjanak, mégpedig gondosan megtervezett viselkedés alapján. Hogyha a tanár megismerte a gyermekeknek ezt a típusát, jól tudja, hogy nála ügyesebbek, mivel sokkal több munkával fejlesztették tökélyre készségeiket, mint ő, és hogy valóban nagyon furfangosnak kell lennie, ha boldogulni akar ilyen gyermekekkel.

Az ilyen gyermek viszont képtelen arra, hogy egyéb dolgokban elmerüljön, ugyanis folyton azt figyeli, hogy a felnőttek és más gyermekek hogyan reagálnak tevékenységére. Ha azonban a tanár elég ügyesen állítja fel „csapdáit", ha folyamatosan kísértéseknek teszi ki a gyermeket; ha a gyermek más gyermekeket elmerült tevékenységben levőnek lát, amint éppen egyáltalában nem figyelik a tanár reakcióit, akkor az ilyen gyermek magára marad. Ilyen esetben a szappanbuborék, a gyúrható agyag, a homok vagy akármi egyéb anyag kísértését erősíti az a tény, hogy más gyermekek nem vesznek részt az ő fondorlatoskodásában. Ha ez a gyermek csak egyszer megfeledkezik fortélyairól, mert igenis elmélyed valamely élettelen anyag alakításában, ha foglalkoztatja őt valaminek a tanulmányozása, vizsgálata, kipróbálása, vagy a tárggyal való játszadozás, akkor felszabadító élményben lehet része, amelynek révén el tud szakadni begyakorlott furfangjaitól. Végtére ez a gyerek is a Homo faber-nek nevezett faj egyik tagja. Egy gyermek, aki nem tud mást, mint személyeket manipulálni, szomorú életet fog élni, szélsőséges esetben esetleg lelkibeteggé lesz. Az utóbbi kategóriába tartozó gyermekek természetesen külön esetet képviselnek, de rengeteg tanulsággal szolgálnak arra vonatkozólag, amit címem háromszög relációja ki akar fejezni. Az ilyen gyermekek igyekezete arra irányul, hogy kapjanak és megtartsanak, de képtelenek akár a legegyszerűbb adományozó cselekedetre is. Az adni igének ugyanis két tárgya* van és csak az indirekt tárgy (a részeshatározó esetben szerepeltetett adományozott, a ford. megj.) lehet élő személy. A direkt tárgynak értékkel bíró dolognak kell lennie, amely sem az ÉN, sem a TE.

* Az angol nyelvben az átadott tárgy és az adományozásban részesülő személy nyelvtanilag egyaránt az ige tárgyának minősül. (A ford. megj.)

Utolsó megjegyzésem a következő: Állítom, hogy közülünk pedagógusok közül nem egy — akár a természettudományok, akár egyéb tudományok területén működik — önmaga számára is sokat tanult azon didaktikai módszerek alkalmazása során, amelyeknek vizsgálatával e cikk foglalkozik. Megtanultuk, hogyan kell a fizikai és biológiai világ tárgyait a gyermek szemével nézni. Ez számos olyan felfedezésre, szellemi örömre vezetett, amelynek létezéséről korábban nem is tudtunk. A tanított anyag felnőttes módon való felfogása már nem elégít ki; több problémát, több meglepetést látunk bennne és kevesebb, tankönyvbe való kinyilatkoztatni valót.

Erről szól egy kedves történet, hőse egyik nagyon képzett, fiatal fizikus barátom. Éppen túl volt a doktorátuson és természetesen mindent tudott. (A doktori oklevelet nálunk a „mindenttudást igazoló okiratnak" nevezik.) Feleségem arra kérte ezt a fizikust, magyarázza meg neki a csatolt ingákkal kapcsolatos valamelyik jelenséget.

Fiatal barátunk így kezdte: — Hát kérem, látnivaló, hogy a ... (izé) ... megmaradásáról, tulajdonképpen a szögek megmaradásának elvéről van szó.

Feleségem ránézett. Ő meg folytatta: — Hát igen, amikor az energia egyik ingáról a másikra meg át, akkor ... stb.

Erre a feleségem: — Nem, nem ezt kérem! Szeretném, ha ERRŐL a jelenségről megmondaná nekem, hogy valójában mi is történik. — Fizikusunk végre ránézett az ingákra és rájött, hogy mit is kérdez a feleségem. Újból az INGÁRA pillantott, majd a FELESÉGEMRE, kényszeredetten elmosolyodott és azt mondta: — Hát igen, ismerem a varázsszavakat, de ÉN sem értem a JELENSÉGET. — Ezt a beismerést, amelyet egy tanárjelölt volt kénytelen tenni, mindig magasra értékeltem, mint annak bizonyítékát, hogy mindnyájunk közös ügye az a bizonyos „HARMADIK".

JAVASLAT A TERMÉSZETTUDOMÁNY TANÍTÁSÁRA II.

Gimnázium

Magyar Tudományos Akadémia

A természettudományok egyes ágainak (csillagászat, fizika, kémia, biológia, földtudomány) összetalálkozása századunkban valósul meg. Az utolsó évtizedek legszebb kutatási eredményei éppen a határterületeken születtek, miközben felszámolódtak az egyes résztudományokat elszigetelő fehér foltok. A kapcsolódás lehetővé tette, hogy a csupán lexikálisan számon tartható részletek helyett mindegyik tudományban egyre inkább az általános koncepciókra, a lényegi alapokra terelődjék a hangsúly. Ezek az alapok összefüggenek egymással, nagymértékben közösek az egész természettudományban. *A mozaikok egységes természettudományos világképpé állnak össze; a tudás elmélyülésével egyidőben csökken az összefüggéstelenül memorizálandó adatmennyiség. Ez kiváló lehetőséget kínál az iskolai tananyag elmélyítésére, annak modernizálására és egyidejűleg a tanulók terhelésének csökkentésére.*

A természettudományos tantárgyak iskolai tanterve történetileg egymástól függetlenül alakult ki abban az időszakban, amikor az egyes tudományok kapcsolódását még nem ismerték. A tantárgyak neve, az egyes években tanított blokkok témája alig változott az elmúlt száz év során. Ez a múlt századból örökölt elszigetelődés ma már anakronisztikus. Nemcsak többletterhet jelent a tanulók számára, hanem ellentmondásokat is teremt a tananyagon belül, így feltétlenül túlterhelésre vezet. (A fizika úgy akarta csökkenteni a túlterhelést, hogy a mechanikában megszüntette az impulzusnyomaték tárgyalását. Így az atomfizikában megalapozatlanná vált a mellék- és spinkvantumszám, noha ezeket a kémia az elemek periódusos rendszerének logikus tárgyalására alkalmazta, jelentős lexikális ismeretanyag megtanulására kényszerítve a diákokat. A „könnyebb taníthatóság" érdekében a fizika az atom 50 éve megcáfolt Bohr-modelljét tanítja, ami csak a legegyszerűbb atom színképét írja le, egyébként használhatatlan. Hibás kvantumszám hozzárendeléseivel önkényes korrekciókra kényszeríti a kémikust, így kétséget ébreszthet a világ anyagi egységével szemben. A kémia a 7. osztályban használja a hő fogalmát, a fizika ezt a III.-ban értelmezi. A kémia a felső általánosban, ill. a gimnázium elején bevezette az ionok fogalmát, de a fizika csak a IV. gimnáziumban tárgyalta az elektromos töltést. A koordinálatlanság miatt a biológia a legbonyolultabb organizmusok tárgyalása után, a IV.-ben kénytelen az elemi életfolyamatokat szabatosabban tárgyalni.) A szűk és elavult mechanisztikus anyagelmélet szellemében oktatott fizika és kémia nemcsak a biológia egzakt megalapozását tette lehetetlenné, hanem cáfolni látszik mindazt, amit a dialektikus materialista világnézetről, a világ anyagi egységéről tanítani szeretnénk. A gimnáziumi természettudományos tárgyak mechanisztikus-lexikális anyagában sem az anyagi világ egysége, sem a természet dialektikája, sem az evolúciós szempont nem jutott kellő kifejezésre.

A természettudomány XX. századi kiépülése nemcsak lehetővé teszi, hanem meg is követeli, hogy a gimnáziumban feladatul egységes természettudományos világkép bemutatását tűzzük ki. A természettudományos világképnek lényegében teljesnek és következetesnek kell lennie, hogy alkalmas kiindulást nyújtson a sok „miért?" megválaszolásához, még akkor is, ha tanítványaink majd felnőtt korukban az akkor megszületett technikai újdonságok működésével kapcsolatban teszik fel ezt a kérdést. *A modern technikai környezetben élő és dolgozó, újságolvasó és tévénéző ember számára elkerülhetetlen műszaki ismereteket nem mint memorizálandó adathalmazt, hanem mint a természet alaptörvényeit illusztráló példákat kell megismerni. A korszerű természettudományos tájékozódás egyben dialektikus materialista gondolkodásra is tanít, tehát világnézeti nevelést is nyújt.* Ezért a mai egységes természettudományos világkép bemutatása nyújt módot arra, hogy elkerüljük a szakbarbár, technokrata szemlélet csapdáit, hozzájáruljunk a világban önállóan tájékozódni képes emberfők kiműveléséhez. Hogy a gimnáziumi természettudományi oktatás elérje most megfogalmazott célját: az egységes természettudományos világkép készség-értékű elsajátítását, fel kell áldoznunk a tradicionális tantárgyak sok önmagában szép és hasznos részletét, a gyorsan avuló tudományos-műszaki újdonságok, gyártási technológiák bemutatását. Le kell faragnunk minden kitérőt, amely késlelteti a főcél elérését, amely eltereli a figyelmet az alapvető természettörvényekről.

A természettudományos tárgyak órarendi integrációja a gimnáziumban nem vihető keresztül, hiszen az anyag minden komplexitási szintjén el kell mélyedni a szintre jellemző jelenségek leírására alkalmas fogalmak rendszerében. Az egyes tárgyaknak mégis egymás kezére kell játszaniok, hogy a jelenleginél kisebb terheléssel, változatlan vagy csökkent óraszámban mélyebb, következetesebb, modernebb, teljesebb világképet adhassunk.

Az óraszámok kialakításánál elsődleges szempontunk a tárgyak logikus egymásra épülésének biztosítása volt. Törekedtünk a — pedagógiai szempontból joggal kritizált — heti kétórás tárgyak számának csökkentésére. Az egész koncepció szem előtt tartja azt az elvet, hogy ne legyenek olyan tárgyak, amelyek tanítása megszakad, mielőtt a tanítványaink fejében sorrakerülő integrációra — a tudás elmélyülésével, a tanuló intellektuális kifejlődésével — lehetőség nyílik. Fokozott figyelmet fordítottunk arra, hogy világnézetünk természettudományos alapjait a természettudományos tantárgyakba, különösképpen a IV. osztály anyagába beépítsük.

A természettudományos nevelés bevezetőben megfogalmazott célkitűzése értelmében a természettudomány hangsúlyozottan reál tantárgycsoport: megfigyelésekre, főleg pedig tudatos kísérletekre (ideális körülmények között laboratóriumi tevékenységre) kell támaszkodnia. Az általánosan használható elvek és az átfogó természettudományos világkép elsajátíttatását valljuk feladatunknak, ezért arra kell törekednünk, hogy a kísérletek ki-

választásánál ne a tradíció, a látványosság legyenek a vezérlő szempontok, a kísérlet ne utólag igazolja a tábláról-könyvből megtanult képleteket. A tananyag gerincét képező általános elvek *élményszerű felfedezése*, azok sokrétű megnyilvánulásának megismerése legyen a tanulói és tanári kísérletek célja. Így lehet elkerülnünk azt a veszélyt, hogy a tanulók a steril és hűvösen csillogó előadóteremre, laboratóriumra, azaz mindennapi életünktől érzelmileg távolálló jelenségkörre korlátozzák a természettudomány érvényességét.

Tudatosan törekedtünk a gyermekek pszichológiai fejlettségének figyelembe vételére. 14 éves korban tanítványaink többsége még nem éri el a formális gondolkodás szintjét. Ezért az I. gimnázium Anyagszerkezet tárgya a tananyag feldolgozásban a konkrét gondolkodást (a szemléletes modellekben való gondolkodást) igényli. E tárgyban időben közel kerülnek egymáshoz az érzékelhető mechanikai jelenségek és a közvetlen érzékszervi tapasztalat számára hozzá nem férhető gyökerű, de a korábbi mechanikai képzetek alapján kézenfekvő módon modellizálható jelenségek. Így a szemléletes mechanikai modell kézenfekvően kínálkozik a mikroszkópikus jelenségek értelmezésére. Ezt a modellalkotásos szemléletmódot építi tovább a szerveskémia a következő osztályban. A II. gimnáziumban (a matematikával párhuzamosan) a mechanika fenomenológiai alapokról indulva tudatosan nevel a logikai-matematikai gondolkodásra. Az itt elért képességet a III. osztályos fizika, kémia és biológia egzakt analitikus szemlélet-módja már határozottan alkalmazza. Végül a IV. osztályt a világról széles áttekintést adó (csillagászati távolságokig, régmúlt időkig, mai társadalmi vonatkozásukig, és a fejlődés tendenciáinak felvázolásáig eljutó) szintétikus szemlélet zárja le.

A természeti jelenségeknél két összetevőt kell figyelembe vennünk. Az anyag általános mozgástörvényeinek közvetlen megnyilvánulását és a konkrét helyi adottságokat, amelyek történetileg alakultak ki. A fizika és általános kémia tradicionális tanítása az előbbi szempontot, a földrajz, a növénytan, állattan és szervetlen kémia tradicionális tanítása az utóbbi szempontot állította előtérbe. Így a két tantárgycsoport nézőpontja közt feszültség támadt. Ma már nagy területeken sikerült megértenünk, hogy az anyagi világ evolúciója során is az anyag általános mozgástörvényei nyilvánulnak meg. Ha tehát a világ mai asztronómiai-geonómiai-biológiai állapotát egy hosszú időbeli evolúció eredményeként mutatjuk be, nem fellazítjuk a tananyagot, hanem azt érthetőbbé és mélyebbé tesszük. Az egzakt megalapozásnál megismert elvek mindennapos szerepe mellett bemutathatjuk azok evolúciós érvényesülését is, így tájékozódhatunk a világ mai állapotáról, a napjainkban folyó (hasznos vagy káros) átalakulások okairól és következményeiről is. A nagy rendszerek kölcsönhatásainak megismerésére, az időbeliség, a hosszú időtartamot áttekintő evolúciós szemlélet a IV. osztály vezérlő elve.

Anyagszerkezet

4 óra a gimnázium I. osztályában

Egyre sürgetőbb az igény, hogy az egyes természettudományos tantárgyak egyszerű, empirikus, ugyanakkor egzakt alapoktól induljanak, mert ilyenkor a tantárgy magvát képező természettörvények lényege és alkalmazhatósága tisztábban feltárul. A korábbi tantervben az atomfizikai és kémiai oktatás nem találkozott. Ma még irreális vágy, hogy a matematikai analízis — klasszikus fizika — atomfizika — kémia — biokémia — biológia — pszichológia logikus időbeli egymásutánját megvalósítsuk. Viszont feltétlenül szükséges, hogy induláskor megadjuk az alapokat, hogy a kémia és biológia az adatok sokaságának közlése helyett a tudomány lényeges összefüggéseinek bemutatására koncentrálhasson. *Az I. osztályos ANYAGSZERKEZET célja az anyagszerkezet és kémia megalapozása az atomok létéből és azok belső mozgástörvényeiből kiindulva.* Felszámolja azt a meglevő ellentmondást, ami ma az atomok fizika- és kémia-órán bemutatott viselkedése, a fizika és kémia tantárgyak nevelési célja közt fennáll.

A tantárgy a korábbi fizika több fejezetét, pl. a III.-os hőtan és optika, valamint az általános kémia jelentős részét tartalmazza. E tantárgy nem lexikális ismeretek eddigieknél is nagyobb mennyiségben történő közlésével, hanem lendületes konstruktív tárgyalással teszi lehetővé, hogy *a periódusos rendszer megalapozását, a kémiai kötéstípusokat és a halmazok szerkezetét a jelenlegi iskolai tananyagnál lényegesen mélyebben taníthassuk, így rá egy jól megalapozott kémiát építhessünk.* (A tantárgyat mai kísérleti formájában gyakran fizika-kémia-szakos tanárok tanítják, de annak anyaga mind a kémiatanár, mind a fizikatanár tudásának elengedhetetlen része, így megfelelő továbbképzéssel kémiatanárok és fizikatanárok egyaránt eredményesen taníthatják.)

E tantárgynak nagy szerepe van az általános iskolában tanultak összegezésében, valamint a *természettudományok egybehangolásának megkezdésében.* Fontos, hogy a fizikai és kémiai törvényeket a tanítás során ne csak az élettelen, hanem az élő természetre is alkalmazzák.

Az Anyagszerkezet nevelési célja az anyagi világ megismerhetőségének, egységének, kimeríthetetlenségének bemutatása az általános iskola korlátozott érvényű klaszszikus anyagfogalmánál lényegesen mélyebb szinten. Megismertet az anyag szerveződésének egymás alatti szintjeivel (halmaz, molekula, részecske). A tantárgy gerincét adó természettörvények, amelyek köré az egész tananyag felépíthető: Az első félévben az anyag molekuláris-statisztikus szemlélete, nevezetesen: *a kémiai anyag, az elektromosság és a fény atomizmusa. A hőmérséklet kinetikus értelmezése. Halmazállapotváltozások és kémiai reakciók kinetikai modellje. A statisztikus kiegyenlítődési tendencia.* — A második félévben az alak, a minta, a struktura kialakulása az elemi mozgástörvények eredményeképpen, nevezetesen: *Az anyag (rugalmas alakváltozás, hang, fény, elektronnyaláb) hullám természete, a szuperpozíció elve. Broglie-hullámhossz, határozatlansági összefüggés. Az atomi és molekuláris alapállapot stabilitása. A gerjesztett állapotok, mint állóhulámok, a kvantumszámok mint a csomók száma. A Pauli-elv. Kémiai kötéstípusok és halmazok. Az anyag makroszkópikus tulajdonságainak értelmezhetősége a mikroszkópikus elektronszerkezet alapján.* (A tantárgy lényegében tartalmazza az OPI tanterv I. osztályos fizika és kémia anyagát, de azoktól nagymértékben különböző, kezdetben megfogalmazott nevelési céljainkat jobban megvalósító feldolgozásban.)

A fizika szempontjából az atomszerkezet a legelvontabb és legkomplexebb fejezet. Ezért ez az induláshoz szükséges tárgy nem oktatható annak a fizikának egyik fejezeteként, amely a kísérletileg bemutatott empirikus alapoktól logikus deduktív, kvantitatív szigorúsággal halad az elvontabb és bonyolultabb struktúrák felé. Erre majd a IV. osztályban kerül sor. Az Anyagszerkezet saját belső logikával valósítja meg a természettudomány nevelési céljait. A tanulók életkori fejlettségéhez igazodva a tantárgy induktív felépítésű, minden lényeges fejezetet tanulói kísérletekben, felfedezés-szituációkban mutat be. Az I. félévben a közvetlen tapasztalati szinttől (halmazok érzékelhető tulajdonságaitól) kiindulva jut el a molekula, atom, részecske fogalmáig. Majd a részecskék általános mozgástörvényeiben való tájékozódás után a legegyszerűbb példákon mutatja meg, miként nyílik mód az atomi, molekuláris és halmazstruktúrák értelmezésére. A bonyolultabb struktúrák értelmezését a kémiára bízva. *A tantárgy módszertani célkitűzése a modellalkotásnak, mint készségnek az elsajátítása.* A korábbi érzékszervi tapasztalatokra utaló modell soha nem fedi tökéletesen a mélyebb szinten összetettebb vonásokat mutató valóságot. Az anyag szerkezetének kimeríthetetlen gazdagsága egyre jobban megismerhető. A tökéletes tudás olyan cél, amit egyre jobban megközelít a tudomány, de véglegesen soha nem ér el. E tantárgyban *az anyag mechanisztikus (korpuszkuláris) atommodellje és hullámmodellje mint hasznos munka modellek szerepelnek.* Ellentmondásaik kiélezésére és feloldására ebben az osztályban nem törekszünk, az a IV.-ben kerül sorra, a közbeeső években szerzett tudás és absztrakciókészség felhasználásával. Ha célunkat így

körülhatároljuk, akkor kettős feladatunk — anyagszerkezeti megalapozás, valamint a tudományos modellalkotás készségének elsajátítása — megvalósítható.

Tananyag

A modellalkotás motiválása

(Szerkezet és funkció modellezése. „Fekete dobozok" öntevékeny manuális modellezési gyakorlata mechanikai, áramköri és biológiai példákkal. A modellalkotás célja, metodikája, a modell és a valóság kapcsolata. A világ fokozatos, de korlátlan megismerhetősége.)

A három halmazállapot korpuszkuláris modellje

(Kísérletek gázokkal, gáztörvény. Kinetikus gázelmélet. Brown-mozgás. Folyadékok összenyomhatatlanságának elemi értelmezése. Molekulák közt ható erők ténye, felületi feszültség. Molekula-átmérő, Avogadro-szám mérése. Szilárd anyag kristályrács-modellje. Az olvadás és párolgás kinetikus értelmezése.)

A hőtan statisztikus tárgyalása

(A belső energia és hőközlés statisztikus értelmezése, energiatétel. A hőmérséklet, mint a rendezetlen mozgás egy szabadsági fokra jutó átlagos energiája. Ekvipartició tétele. Statisztikus ingadozások. Egyirányú folyamatok, kiegyenlítődési hajlam, a statisztikus rendezetlenség növekedésének elve. Alapállapot, abszolút zéruspont.)

Kémiai folyamatok

(A molekulák disszociációja, energiaközlés, hőmérsékletnövelés hatására. Atomok. Állandó és sokszoros súlyviszonyok. Atomsúly, molekulasúly, sztöchiometriai számítások, oldatok. A kémiai folyamatok időbeli lefolyásának statisztikus szemlélete: reakciósebesség, kémiai egyensúly, a tömeghatás törvénye. Reakcióhő és aktiválási energia molekuláris szemlélete.)

Az elektromosság és fény atomizmusa

(Katódsugár. Sörétzaj megfigyelése. Millikan-kísérlet. Elemi töltés, elektron. Az áram és áramvezetés elektronmodellje. Fényelektromosság bemutatása, foton. A szín és az energiakvantum összefüggése. Coulomb-erő; Rutherford-kísérlet. Izotópok. Rutherford-féle atommodell, annak elégtelensége. Az atom stabilitásának problémája.)

Hullámmozgás leírása

(Húr rezgése. Felületi hullámok: vízhullámok. Hullámok találkozása, összerakódása, interferencia. A hullám. hossz mérése. Térfogati hullámok; hanghullámok. Álló. hullámok, csomók kialakulása. Hangszerek.)

A fény hullámmodellje

(Fényelhajlás, fényinterferencia. A hullámhossz, a rezgésszám és a szín kapcsolata.)

Az elektron hullámmodellje

(Elektronsugarak interferenciája, Broglie-hullámhossz. Határozatlansági összefüggés hullámvonulatra. Véges tartományba zárt hullámok sajátrezgései. Kvantumszámok, mint a csomók száma. A H-atom alapállapota és gerjesztett állapotai. Az atomok stabilitása. Vonalas színkép. Atomi kvantumszámok, atompályák. Pauli-elv. Periódusos rendszer. Az első tíz elem elektronszerkezete; alkálifémek és halogénelemek példája. Ionok. Ionizációs energia, elektronaffinitás, elektronegativitás. A Hund-szabály magyarázata az elektronok kölcsönös taszításával.)

Kémiai kötés

(Molekulapálya kialakulása az atompályákból. Kötő- és lazító pálya. Kovalens kötés. Kísérletek a legegyszerűbb kétatomos molekulájú gázokkal, H_2,O_2, N_2 molekula. A molekulák elektronszerkezetének és alakjának összefüggése. Poláros kötés. Redoxi folyamatok. CO, CO_2, CH_4, NH_3, H_2O, HF alakja, töltéseloszlása, sajátságai.)

Halmazok

(Molekulaközi kapcsolatok: Van der Waals-erők, H-híd. Atomrács, ionrács, fémrács, molekularács; anyagtulajdonság és kötéstípus kapcsolata; halmazállapotváltozás. A víz és jég szerkezete, fizikai tulajdonságainak értelmezése. A víz mint oldószer. Ionos oldódás, elektrolitos disszociáció. Sav és bázis, kémhatás. Apoláros és poláros atomcsoportok szerepe oldódáskor. Felületaktív anyagok, kolloidok.)

Földtudomány

A földtudomány századunk második felében mind egzaktabb természettudománnyá válik. Ez indokolja, hogy a Földre és közvetlen kozmikus környezetére vonatkozó tudásunkat az oknyomozó természeti földrajz lényeges részeivel együtt egy egzakt természettudományos tantárgyban, a földtudományban (geonómiában) foglaljuk össze. Ezen keresztül az anyabolygónkra vonatkozó tudásunk beilleszkedik majd az egységes természettudományos világképbe.

Az utolsó években általánossá vált geonómiai forradalom tette lehetővé, hogy a klasszikus földtudományok (planetáris asztronómia, meteorológia, geodézia, ásvány- és kőzettan, földtan) a Föld egy-egy horizontális fejezetére vonatkozó eredményeit a vertikális kapcsolatokra kiterjedő, egységes oknyomozásba kapcsoljuk össze. Értjük azt is, hogy a bolygók közül miért egyedül a Földön alakult ki élet. A materiális tényezők döntő hatással vannak az élet és társadalom fejlődésére. Az ember viszonya a természethez és társadalomhoz új megvilágításba helyezhető. Az ember felismeri a bolygónkra vonatkozó általánosan érvényes törvényeket, nem függetlenül tőlük, hanem ezek ismeretében alakítja át a környezetet. A természettel harmóniában kell élnie a civilizált társadalomnak is. A dialektikus materialista munkamódszer átvezet a történelmi materialista szemlélet alátámasztásához.

A leíró (morfológiai) jellegű természeti földrajzot az általános iskola tanította. A gimnázium számára kialakított Földtudomány tantárgy áttekintést ad a Földnek az Univerzumban elfoglalt helyéről és az űrkutatás eredményéről; bemutatja a különféle földi szférák anyagát, szerkezetét, és azok kölcsönhatását; kifejleszti a Föld dinamikus szemléletét. A Föld anyagának a geofizika és a geokémia legújabb módszereivel megfigyelhető mozgásai és változásai a Föld múltjának rekonstruálására is módot adnak. Így tárul föl a Föld 4,5 milliárd éves története; így taníthatjuk meg, hogy a Föld és az élet fejlődése egymással kölcsönhatásban történt és történik. A földtudományi megismerések a társadalom számára alapvetőek a hosszútávú társadalmi tervezéseknél („a múlt megismerése kulcs a jelen megértéséhez és a jövő előrejelzéséhez"), ugyanakkor a jelen gyakorlati gazdasági feladatainak megoldásához nélkülözhetetlenek (nyersanyag és energiahordozók kutatása, területfejlesztési, vízgazdálkodási, környezetvédelmi tervek készítése és végrehajtása stb.) .

A földtudományi ismeretet olyan formában nyújtjuk a tanulóknak, hogy gondolkodásmódjukat kettős irányban fejlesszük: a rendszerszemléletű és a „történeti"

gondolkodás irányába. Komplex volta miatt a Földtudomány könnyebben volna tanítható magasabb osztályban. Az I. osztályba helyezve viszont a földtudomány motivációt nyújt az Anyagszerkezet és a Kémia tantárgyaknak, mert bemutatja a természetes anyagok genetikáját. Az utána következő gazdasági földrajzot azzal segíti, hogy adathalmazok megtanulása helyett logikai gondolkodással teszi képessé a tanulókat a nyersanyag-lelőhelyek területi eloszlásának felismerésére stb. Legfőbb előkészítést kínál azonban a Földtudomány a Biológia számára, hiszen az élet keletkezése és a törzsfejlődés magyarázata aligha képzelhető el az őslégkör-fejlődés és a földtörténet ismerete nélkül.

A földtudományi szemlélet legfontosabb elvi konzekvenciái a gimnáziumi Anyagfejlődés közvetítésével eljutnak a IV. osztályos szintézisbe és szerves részévé válhatnak a tervezett egységes természettudományi érettségének. Alábbiakban a gimnáziumi földrajz (I—II. osztály) természettudományi fejezetét mutatjuk be.

Tananyag

A Föld helye a Világmindenségben

(A Naprendszer és annak helye a Galaktikában. A Föld összehasonlítása más bolygókkal. Az űrkutatás célja és eredményei.)

A Föld szerkezete

(A megismerés folyamata. A kutatás módszerei. Belső szilárd mag, külső folyékony mag. Földkéreg. A hidroszféra és atmoszféra. A magnetoszféra és a napszél. A földmag mozgása, a földmágnesség és annak változásai.)

A Föld dinamikus változásai

(Üledékképződés, metamorfózis, magmás kőzetképződés; a legfontosabb ásványok és kőzetek. A Föld felszínének nagyszerkezete; az óceáni és a kontinentális litoszféra különbsége. Lemeztektonika. Óceánok és hegységek képződése és pusztulása. Üledékgyűjtő és hegységképző időszakok. Az agyag szerepe. Hazánk természeti földrajzának, földtanának és földtörténetének vázlatos áttekintése.)

A Föld és az élet kapcsolata

(Prebiotikus időszak. Az élet megjelenése. A Föld-fejlődés és életfejlődés párhuzama. A társadalom kialakulásának és fejlődésének földrajzi feltételei. Nyersanyaglelőhelyek és azok felkutatása.)

Kémia

3 óra a gimnázium II. osztályában

2 óra a gimnázium III. osztályában

A kémiai empirikus-induktív bevezetése az általános iskolában megtörtént. Az I. osztályos Anyagszerkezet tantárgy megvetette a kémia anyagszerkezeti alapjait: megmutatta, hogy az elemek fizikai és kémiai tulajdonságai, a kémiai kötések és molekulaközi kölcsönhatások néhány általános természettörvény alapján megérthetők. Ilyen módon lehetségessé és reálissá vált az a célkitűzés, hogy a gimnáziumi kémia az *atomszerkezeti ismeretekből kiindulva építse fel a különféle molekulák szerkezetét és olvassa le szerkezetükből azok tulajdonságait.*

Az elvileg deduktív tárgyalás természetesen nem vihető teljesen keresztül, ez nem is kívánatos. A természettudományok közül változatlanul a kémia a legalkalmasabb arra, hogy az anyag szerkezetének megismerését és céltudatos megváltoztatását a gimnáziumi tanuló ne csak megértse, hanem azt tapasztalatból is megismerje, sőt tanulókísérletekben önmaga cselekvően irányíthassa. A kísérletek az elvi áttekintéssel párhuzamosan folynak, azt hol megelőzik, hol követik. A kémia tanításának azonban óvakodnia kell az elemek, vegyületek és reakciók teljességre törekvő lexikális felsorlásától. Szem előtt kell tartanunk, hogy a kémiai folyamatok és kémiai struktúrák az anyagra általánosan jellemző természettörvények megnyilvánulásai. A kiválasztó szempont szükségszerűen az, hogy a korszerű természettudományos világkép kémiai fejezetét bemutathassuk. Ennek alá kell rendelni az anyagismeret, a szaktudományi teljesség vagy technológiai fontosság szempontjait.

A kémia egyik feladata, hogy előkészítse, mégpedig időben előkészítse a biológiát. A kémiának lehetővé kell tennie, hogy a biológia az életfolyamatokat az egységes anyag megnyilvánulásaként, az egyetemes természettörvények alapján vizsgálható és megérthető jelenségkörként tárgyalhassa. Ezért a kémiának elő kell készítenie, utána majd a biológiának ki kell bontakoztatnia a biokémiai, reakciókinetikai nézőpontokat. Ha viszont a kémia eredményeit a biológia kiaknázza, ez a kémiai nevelés volumenének időbeli és tematikai kiterjesztését jelenti. A részletes tanterv előkészítésénél figyelembe kell venni, hogy a biológia a gimnázium 5. félévében már óriásmolekulákkal foglalkozik. Ezért szükséges, hogy a szerveskémia (II. osztály) megelőzze a szervetlenkémiát (III. osztály). Az I. osztályos Anyagszerkezet tanulása során szerzett ismeretek lehetővé teszik a szerves kémia tanítását részletes szervetlen kémiai előtanulmányok nélkül. A szerveskémia „nehéz" voltát egyesek nem a kötéstípusok sokfélesége, hanem egyszerűen a vegyületek nagyobb száma miatt hangoztatják. A kötéstípusok száma éppen a szervetlen vegyületeknél nagyobb. Sokkal többjük rendelkezik egyedi szerkezettel, ezért tulajdonságaik értelmezése szerkezetük alapján bonyolultabb feladat, mint a szerves anyagok tulajdonságaié. Utóbbiak homológ sorozatokban, funkciós csoportok szerint történő tárgyalása megkönnyíti azok tanulmányozását. A kísérleti oktatás tapasztalata szerint a szerveskémia oktatása a II. osztályban megvalósítható, sőt kiválóan alkalmas arra, hogy következetesen bemutassa a molekuláris elektronszerkezet és a makroszkópikus tulajdonságok kapcsolatát.

A III. osztályban a szervetlen kémiában előtérbe kerülhet az egzakt kvantitatív nézőpont (energiaközpontú fizikai kémiai szemlélet, a párhuzamosan futó elektromosságtanra alapozott elektrokémiai szemlélet). Így a szervetlen kémia is az eddigieknél igényesebb kémiai nevelési feladatot vállalhat magára.

A kémia az egyik legalapvetőbb, a modern élet és a termelési gyakorlat számára egyik legfontosabb tantárgy. Ennek ellenére az OPI tantervben a kémia tanítása a II. osztályban véget ér, a végső elmélyítést és szintézist adó IV. osztályból teljesen hiányzik. Az érettségi szintézisére való intenzív felkészülés kiszorítja a kémiai ismereteket a tanuló agyából. Ezen a nehézségen segít a tervezetünk, amely szerint az Anyagszerkezet (I), Kémia (II—III), az egzaktabb biokémiai indítású Biológia (III), a struktúraorientált Fizika (IV,) valamint a fakultatív természettudományi laboratórium mind a négy osztályban használja és mélyíti a kémiai szemléletmódot, sőt annak minden lényeges pontja szerepel a javasolt egységes természettudományi érettségi vizsga anyagában is.

Tananyag

II. osztály: Szerveskémia

Bevezetés a szénvegyületek kémiájába

(A szénvegyületek sokfélesége és egyszerű elemi összetétele. A szénatom molekulaképző sajátságainak értelmezése. Konstitúció és izoméria. Játék a képletekkel. Heteroatomok és funkciós csoportok. Szerkezet és sajátságok összefüggése. A konstitúció meghatározása. A szénvegyületek csoportosításának elve.)

Szénvegyületek konstitúciója és elektronszerkezete: Szénhidrogének

(Telített, telítetlen, konjugált és aromás szénhidrogének elektronszerkezete. Részletesebben tárgyalt alaptípusok: metán, etán, etén, butadién, acetilén, benzol. A molekuláris elektronállapotok hierarchiája. A vegyületek halmazsajátságainak — olvadáspont, forráspont, szín — értelmezése a molekulaszerkezet alapján. Reakciókészség összehasonlítása néhány egyszerű átalakítás példáján: hidrogénezés, oxidáció. A szénhidrogének természetes előfordulása és gyakorlati szerepe.)

Szénvegyületek konstitúciója és elektronszerkezete: heteroatomos vegyületek

(Heteroatomot tartalmazó szénvegyületek levezetése szénhidrogénekből a szénatom heteroatommal való helyettesítése útján. Példák: Az egyszerű molekulák, ammónia, víz, hidrogén-fluorid átismétlése után: metilamin, metilalkohol, metil-fluorid, formaldehid, hangyasav, széndioxid, szénsav, salétromsav, piridin, pirrol, imidazol. Az elektronszerkezet megváltozása. E molekulák sajátságainak: pl. sav-bázis-jellegének összefüggése az elektronszerkezettel. Egyes vegyülettípusok szerkezete, elnevezése és funkciós csoportjuktól származó sajátságai: a fontosabb vegyületek gyakorlati és biológiai szerepe: halogénvegyületek, alkoholok, fenolok, éterek, aldehidek, ketonok, kinonok, karbonsavak, észterek, aminok, amidok. Sokfunkciós vegyületek: néhány egyszerű példa a funkciós csoport felismerésére; sajátságok értelmezése).

Szénvegyületek térszerkezete (a térkémia alapjai)

(Térizoméria. Konfiguráció. Kiralitás. Királis tükörképek sajátságai. A természet kiralitása, enzimek térfajlagossága. Konformáció nyíltláncú és gyűrűs molekulákban. Konformációs egyensúly. Geometriai izoméria.)

Természetes makromolekulák szerkezete

(Egyszerű szénhidrátok; térszerkezet, biológia szerep. Poliszaccharidok: keményítő, cellulóz. — Aminosavak: szerkezeti elv, oldalláncok jellege. Polipeptidlánc. Fehérjék szerkezete: aminosavsorrend, térszerkezet. Vázfehérjék és enzimek térszerkezete. — Nukleinsavak alkotórészei: nukleotid szerkezeti elve. A nukleinsavak térszerkezete: kettős csavar. Az információtárolás szerkezeti alapjai.)

Dinamikus szerveskémia

(A kémiai reakciók általános jellemzése a metán fotoklórozásának példáján: energetikai és kinetikai viszonyok, reakciódiagram, elemi lépések mechanizmusa, katalízis. Gyökös gázreakciók: hőbomlás, krakkolás. — Reakciók oldatban. Az oldószer szerepe. Ionos reakciómechanizmus. A nukleofilitás és elektrofilitás fogalma. Nukleofil helyettesítés; szénvegyületek átalakítása egymásba. A szintézis fogalma. Telítetlen vegyületek addiciós reakciói: hidrogén-addició, halogén-addició, hidrogénhaloid-addició; elimináció, mint addició fordított folyamata. Polimerizáció. — Aromás vegyületek helyettesítéses reakciói, irányítás. — Oxovegyületek reakciói: telítetlenség és polaritás szerepe, addició, redukció, oxidáció, kimutatás. Az abiogén kémiai evolúció. Észterek képződése és hidrolízise. A savkatalízis mechanizmusa. Észterek enzimes hidrolízise. Az enzim szerkezetének és katalitikus hatásának összefüggése. A molekuláris biológia alapjai.)

III. osztály: Szervetlen és fizikai kémia

A reakciósebesség és a kémiai egyensúly

(A kémiai reakciók sebessége. A reakciósebességet befolyásoló tényezők. Sebességi egyenlet. Hőmérsékletfüggés. Katalízis. A kémiai egyensúly, mint ellentétes irányú, azonos sebességű folyamatok stacionárius állapota. Homogén és heterogén egyensúlyok. Az egyensúlyi állandó. A tömeghatás törvénye. Az egyensúlyi állandó függése a hőmérséklettől. Párhuzamos reakciók. Egyensúlyi és sebességi állandók szerepe a párhuzamos reakciókban.)

Elemek és szerkezetük

(Kötéstípusok és molekulaközti kölcsönhatások átismétlése, kiegészítése. VIII—V. oszlop elemei. Többcentrumos kötések. Fémes kötés. Szigetelők, félvezetők, vezetők — IV—I. oszlop elemei. Elektromos és hővezetés. Az elemek színe. Mechanikai tulajdonságok.)

Az elemek hidrogénvegyületei

(A haloidsavak átismétlése. A víz mint „protonos félvezető"; sajátionizáció. Protondonorok és akceptorok, savak és bázisok. Elektrolitoldatok keletkezése. Savbázis egyensúlyok, pH; konjugált sav és bázis. Ammónia, savas és bázikus szerves vegyületek mint oldószerek. Fémek hidridjei. Vízzel való reakciójuk — szervetlen bázisok.)

Az elemek halogénvegyületei

(Makroszkópikus tulajdonságok a szerkezet és kötéstípus alapján. Az átmeneti fémek vegyületeinek színes volta. A kristálytér kvalitatív ismertetése. Oldékonysági szorzat. Komplex ionok. Komplexek egyensúlyi viszonyai.)

Az elemek oxigénvegyületei, oxisavak, hidroxidok és sóik

(Makroszkópikus tulajdonságok a szerkezet és kötéstípus alapján. Szigetelő és félvezető oxidok. Az elem és az oxigén közti kötés változása. Az oxidok reakciói vízzel, mint proton-donorral és mint elektronpár-donorral; sav- és bázisanhidridek fogalma, oxisavak és hidroxidok.)

Oxidációs-redukciós folyamatok vizes oldatokban

(Redox-egyensúly kvalitatív és kvantitatív bevezetése. Nernst-egyenlet. Fémek feszültségi sora. Faraday-törvények. Galvánelemek. Szabad energia fogalma és mérése.)

Bioanorganikus kémia

(Biológiai jelentőségű organikus fémkomplexek szerkezete. A hem és klorofill, fémkomplexek szerepe a fotoszintézisben és a biológiai oxidációban. Kémiai vonatkozások.)

Gyakorlati szervetlen kémia

(Fémek előállítása: redukciós és elektrolitikus módszerek. Nátriumklorid elektrolízise. Korrózió és korrózióvédelem. Az üveg. Kerámiai anyagok. Kőzetalkotó szilikátok. Fényképezés. A természetes vizek kémiája. Vízlágyítás, ioncsere. Ezek a fejezetek állandóan változhatnak a tanár belátása és az egyes kérdések aktualitása szerint.)

Fizika

3—3—3 óra a gimnázium II—III—IV. osztályában

Az I. osztálybeli Anyagszerkezet szemléletesen konkrét modellalkotó tárgyalásmódjára építi fel mind komplexebb rendszereit a szerveskémia és a biokémia.

Ahhoz, hogy az érzékszervi tapasztalatok körétől távoleső, de a gyakorlat és a filozófiai általánosítás számára nélkülözhetetlen, fontos anyagállapotokat — gravitációs mező, elektromágneses hullám, atomi részecske, atommag — ellentmondásoktól és előítéletektől mentesen megértsük, már nem elegendőek a szemléletes modellek. Gyakran kell túllépni az érzékszervek korlátai által leszűkített szemléleti és gondolkodási sablonokon.

Nem tartható fenn az az elavult szemlélet, amely a fizika munkaterületének az élettelen természet mélyreható anyagi változással nem járó jelenségeit tekinti. *A fizika feladata az anyag legáltalánosabb egzakt mozgástörvényeinek felkutatása, a természeti jelenségek rájuk történő kvantitatív visszavezetése.* Ezt kell kitűznünk a gimnáziumi fizikatanítás vezérgondolataként is.

A fizikatanítás az elvi célt tökletesen nem érheti el, de sikeresen érzékeltetheti. Éppen ennek érdekében a II. osztályos fizikaórán (a gyermekek formális-logikai gondolkodásának pszichológiai kifejlődésének figyelembevételével) új vonulat jelenik meg: *az empirikusan felismert alaptörvényekre alapozó deduktív természetleírás.* A II. osztályos fizika a mechanikai testeket és mechanikai mozgásformákat, a III. osztályos fizika az absztraktabb elektromágneses mezőt és elektromágneses mozgásformákat, a IV. osztályos fizika az atomi részecskéket és a belőlük felépülő struktúrákat, a statisztikus-termodinamikai, kvantummechanikai mozgásformákat tárja fel. A termodinamikai és kvantummechanikai mozgás egyetemességénél fogva alkalmas az anyagi világ egységének kifejezésére. Így e két vonulat az I. osztályos atommodelleknél biztosabb alapokra épülő IV. osztályos fizika szintézisében egyesül.

Célja érdekében a fizika tanításának szakítania kell a sok és sokféle speciális eset aprólékos tárgyalásával és annak számonkérésével. A tanuló kezébe olyan rendező elveket kell adnia, amelyek *a jelenségek sokfélesége között való tájékozódást* segítik. Ezzel elérhető, hogy kevesebb ismeretet „tanítunk meg", de használhatóbb tudást nyújtunk a korábbiaknál. Megtanítani lényegében csak az alapelveket kell. Illusztrációként, az alkalmazási képesség gyakorlóteréként, a problémamegoldó készség fejlesztése céljából a rendelkezésre álló idő függvényében lehet tárgyalni, ill. feldolgoztatni a speciális fizikai problémákat. Ezeket nem tételszerűen, hanem problémaszituációkon, feladatokon keresztül exponáljuk. Megmutatjuk, hogy a különféle feladatok, problémák megoldására nem kell minden alkalommal rögtönzött módszereket kitalálnunk, hanem csak az általános alapelveket kell tervszerűen alkalmaznunk a problémára, hogy célhoz érjünk. Így pl. a II. osztályban a (nemlétező) merev, túl speciális rugalmas testek nem kerülnek annyira előtérbe, hogy elfedjék az általános alaptörvényeket, azok jelentőségét. A III. osztályban az elektrotechnikai alkalmazások állandóan avuló kiviteli formái, megoldásai helyett a működés általános alapelveit kell előtérbe állítanunk.

A II. osztályos fizika tárgya a mechanika. Ennek során világnézeti szempontból tárgyaljuk az anyagi világ megismerhetőségét, az anyag és mozgás elpusztíthatatlanságát, az okság elvét. A tananyagot a megmaradási törvények köré csoportosítjuk.

A III. osztályos fizika tárgya az elektromágnesség. Itt bevezetjük a töltés és elektromágneses mező fogalmát. A tananyagot a következő természettörvények köré csoportosítjuk: *Elektromágneses mező hatása a töltéshordozó testekre* (Coulomb-erő, Lorentz-erő). *A töltött testek hatása az elektromágneses mezőre* (a töltések képezik az elektromos mező forrásait, az áramok a mágneses mező örvényeit). *Az elekromágneses mező hatása önmagára* (elektromágneses indukció törvénye, eltolódási áram). *Energia és tömeg ekvivalenciája.*

A IV. osztályos fizika első félévének tárgya az atomos szerkezet. Ez csatlakozik az Anyagszerkezethez és kémiához, de egyben általánosítja és elmélyíti azt. Az anyagot a következő témák köré csoportosítjuk: *A sokrészecskerendszerek időbeli statisztikus viselkedése* (II. főtétel). *Az anyag egyetemes kvantummechanikai* mozgástörvényei (szuperpozíció, oszthatatlanság, komplemantaritás, Pauli-elv). *A kvantumos törvények által kialakított struktúrák* (magok, atomok, molekulák, szilárd anyag).

A IV. osztály második felében a fizika és biológia integráltan vagy maximálisan koordináltan tanítandó. Az utolsó félévben a fizika és biológia *Anyagfejlődés* tantárgyban egyesített vagy az anyagfejlődés nézőpontjából összehangolt tanítása hivatott arra, hogy végleg kialakítsa az egységes természettudományos világképet tanítványaink fejében. Ez hivatott összegezni világnézetünk természettudományos alapjait.

Tananyag

II. osztály: Mechanika

Lendület (impulzus) megmaradása

(Hely és sebesség leírása, vonatkoztatási rendszer. Tehetetlenség. Inerciarendszer. Lendület megmaradása, tömeg. Kölcsönhatás, lendületátáramlás, gyorsulás, erő, erőtörvény. Speciális erőtörvények: rugóerő, súly, súrlódás, közegellenállás, kényszererő, elektromos és mágneses erő, Van der Waals erő. Newton-féle mozgástörvény, okság elve. Szabadesés. Hooke-törvény, rezgőmozgás. Vektorok, görbevonalú mozgás, hajítás.)

Energia megmaradása

(Munka, munkatétel, mozgási energia. Helyzeti energia, energia megmaradása. Belső energia értelmezése a mechanikai atomelmélet szerint, energiadisszipáció. Potenciálvölgy, szabad és kötött állapot. Rugalmas közeg energiasűrűsége. Folyadék áramlása, kontinuitási egyenlet, Bernoulli-egyenlet.)

Perdület (impulzusnyomaték) megmaradása

(Newton-féle gravitációs erőtörvény. Körmozgás. Perdület megmaradása. A Naprendszer leírása, perdület- és energiaviszonyok. A pályák elemzése, űrutazás. Időmérés. Forgatónyomaték. Egyszerű gépek rövid áttekintése.)

Tömegközéppont sebességének megmaradása

(Zárt rendszer. Tömegközéppont fogalma, annak mozgása. A mozgás tíz integrálja. Merev test fogalma, merev test mozgását meghatározó törvények.)

III. osztály: Elektromágnesség

Elektrosztatikus mező

(Coulomb-erő, E elektromos térerősség, potenciál, az erőtér általános jellemzése.)

Egyenáram

(Ohm-törvény, ellenállás, áramforrás, feszültségei, Kirchhoff törvényei. Munka, teljesítmény. Az áram mágneses tere, mágneses mező, B mágneses térerősség, köráram mágneses nyomatéka. Gerjesztési törvény, mozgó ponttöltés mágneses tere, Lorentz-erő, áramok kölcsönhatása.)

Változó áram

(Elektromágneses indukció, Faraday és Lenz törvénye, önindukció, váltakozó áram ellenállása és teljesítménye. A generátor, a motor és a transzformátor elve. Rezgések. Rezgéskeltő eszközök, rezgőkörök, elektroncsövek.)

Polározható közegek

(Dielektrikumok, mágneses anyagok, permanens mágnes rövid áttekintése. Vezetők, félvezetők. Tranzisztor, integrált áramkör. Logikai áramkörök elemi áttekintése.)

Elektromágneses sugárzás

(Elektromos és mágneses energia a sztatikában. Energiaterjedés vezeték mentén a fogyasztó felé. Eltolási áram, gyorsuló töltés elektromos és mágneses mezeje, dipólsugárzás, elektromágneses hullámok. A rádió és televízió elve. A fény, az elektromágneses hullámok teljes spektruma. Sugárzás energiája. Sugárnyomás; tömeg és energia ekvivalenciája.)

IV. osztály: Atomos szerkezet

A II. főtétel

(Statisztikus rendszerek. Dinamikus egyensúly. Megfordítható és megfordíthatatlan folyamatok. A statiszti-

kus rendezetlenség növekedése. Statisztikus entrópiafogalom. Boltzmann-eloszlás. Hőmérséklet. Ekvipartíció. Alapállapot, abszolút zéruspont, annak elérhetetlensége. Az energiaminimum-elv indoklása a II. főtétel alapján.)

Az anyag kvantummechanikai mozgástörvényei

(Fény- és elektronhullámok. Hullámtalálkozás, szuperpozíció, interferencia. Hullámcsomag hullámhosszának határozatlansága. — Fénykvantumok, elektronok, oszthatatlanság. A hullámfüggvény valószínűségi értelmezése. Komplementaritás. Broglie-hullámhossz, Bohr-frekvencia. Határozatlansági elv.)

Atomszerkezet

(Kötött rendszer alapállapota, zéruspontnyugtalanság. Gerjesztett állapot. Állóhullámok, csomópontok, kvantumszám. Energiaszintek. Vonalas színkép. Pauli-elv, héjszerkezet, periódusos-rendszer).

Molekulaszerkezet

(Elektrondelokalizáció, kovalens kötés. Poláros kötés. Dipólmomentum. Energiatárolás és információtárolás molekulákban. Van der Waals-kötés. Hidrogénkötés. Folyadékok. Oldódás.)

Szilárd anyag szerkezete

(Fémes kötés. Sávszerkezet. Vezetők, félvezetők, szigetelők. Hibahelyek. Mechanikai és optikai tulajdonságok értelmezése. Félvezető áramköri elemek.)

Atommagok szerkezete

(Atommagok összetétele, magerők. Könnyű atommagok héjszerkezete. Nehéz atommagok kötési energiája, magtérfogat, telítődés. Radioaktív bomlás: mozgás az energetikailag stabilabb állapot felé. Béta-kölcsönhatás. Maghasadás. Nukleáris energia felszabadítása láncreakcióban.)

2. félév: Anyagfejlődés

Csillagok kialakulása

(Kozmikus anyag gravitációs kontrakciója. Galaxisok, csillagok. A Tejútrendszer és a Nap kora. A Nap energiatermelése. Csillagfejlődés, a kémiai elemek kialakulása.)

Bolygók kialakulása

(Az interstelláris anyag összetétele. A Nap bolygórendszerének kialakulása: gravitációs kontrakció és perdületmegmaradás. A Naprendszer generatív leírása. A Merkur, Vénusz, Föld, Hold és Mars összehasonlítása.)

A Föld története

(A szilárd kéreg kialakulása. A folyékony fázis. A légkör története. A troposzféra, sztratoszféra, ionoszféra fizikai folyamatai. Magnetoszféra. Nagy földtörténeti ciklusok. Bolygónk és az élet kölcsönhatása.)

Technika és társadalom

(Ipari forradalom. Tudományos-technikai forradalom. Elektronika, automatizálás, számítógépek. Energiaprobléma.)

Biológia

4 óra a gimnázium III. osztályában

3 óra a gimnázium IV. osztályában

Napjainkban talán a legdinamikusabban fejlődő tudomány a biológia. Az alapok rohamos tisztázódása a biológiát egyre inkább egzakt tudománnyá teszi. Ezzel egyidőben a biológiai ismeretanyag egyszerűsödik és koncentrálódik, gyakorlati hatékonysága pedig növekszik. Indokolt, hogy a biológia tanítása ne a tudománytörténet megismerési sorrendjét, kanyarulatait és tévútjait kövesse. Az általános iskola igazodjék a gyermek megismerő folyamatainak jellegéhez. A gimnáziumban jobban lehet építeni a tanulók egyre fejlődő absztrakciós készségére, így fokozottan előtérbe került a biológiai tudományok belső logikája.

Tervezetünk szakít a több évtizedes hagyománnyal, amely szerint növénytan, állattan, embertan és általános biológia követte egymást. E helyett a fő hangsúlyt deduktív tárgyalásmód keretében az organizációs szintekre helyezzük. Először a biológia alaptörvényeit tárgyaljuk, amelyek a biológiai információra, az anyagcserére, az adaptációra és az evolúcióra vonatkoznak. Így közvetlen kapcsolat valósul meg a biológiát megelőző anyagszerkezet és szerveskémia tárggyal. Az alaptörvények tárgyalása után ezek megvalósulását mutatjuk be a különböző organizációs szinteken. Minden organizációs szinten tárgyalunk törzsfejlődési vonatkozásokat is, abból a koncepcióból kiindulva, hogy *az élővilág működését csak a fizikai, kémiai és biológiai alaptörvényeknek, valamint a biológiai evolúció eddigi történetének együttes ismeretében lehet megérteni.*

Javaslatunk elválasztja az életjelenségeket egymástól. Így fokozottan ügyelnünk kell arra, hogy az életfolyamatokat végül majd egységben kell látniok a tanulóknak. Választanunk kellett, hogy melyik utat járjuk végig: *a szervezettől a sejtig vezető utat* (a tanuló először az élőlénnyel találkozik!) *vagy a sejttől a szervezetig vezető utat* (ez felel meg a tudomány belső logikájának). Az általános iskola az első utat választja. Mig a gimnázium III. osztályában — építve a megelőző egzakt természettudományos tantárgyak eredményeire, az integrált természettudományos világkép programjának megfelelően — az utóbbi utat választottuk. Így számottevő terheléscsökkentés érhető el.

A biológia tanítása ezt a célkitűzést akkor lesz képes megvalósítani, ha a biológiai nevelés nem szünetel teljesen az I. és II. osztályban, ha az anyagszerkezet, fizika és kémia törvényeit mint az anyag általános törvényeit tanítjuk meg, ha a példák között az élettelen természetből, ipari technológiából vett példák mellett egyenrangúan szerepelnek az élővilágból vett példák is. (Pl. az energiamegmaradás és energiaátalakulásokra példa az élőlények anyagcseréje.)

A biológiatudást a természettudományos szintézisbe a IV. osztályos biológia állítja be. Ez tárgyalja az egyedfeletti szintet. Az embert is mint biológiai és társadalmi lényt mutatja be. A IV. osztályos biológia fokozott ökológiai és történelmi szemléletével, világnézeti érdekeltségével csatlakozik a IV. osztályos fizikához, amely a statisztikus fizikát, a folyamatok időirányát, részecskerendszerek hierarchiáját és kialakulásuk történetét tekinti át. Tekintettel arra, hogy a IV. évben a természettudományos ismeretek szintetizálását tűztük ki célul, ideális megoldást a természettörténeti témájú anyagrészek (a második félév) fizika és biológia anyagának integrált oktatása jelent egy Anyagfejlődés tárgy keretében.

Tananyag

III. osztály: főleg egyedalatti szint

Az élőlény általános fogalma

Az anyagcsere

(Tulajdonság — kémiai reakció — fehérjék — nukleinsavak visszavezetési sor értelmezése. Nyílt rendszerek tulajdonságai. Az anyagcserét szabályozó energia törvények. Katalízis. Zárt reakciócíklusok. Kapcsolt reakciók. Oxidáció-redukció. ATP.)

A biológiai információ

(A biológiai információ természete. Információhordozó molekulák. DNS, genetikai kód. Replikáció, mutáció, rekombináció. Szaporodási kapacitás, variabilitás, szelekció.)

Az adaptáció

(Homeösztázis. Ingerlékenység. Az adaptáció szintjei. Információ illeszkedés, mint az adaptáció alapja.)

Az evolúció

(Az élővilág mint egységes nyílt rendszer. „Nem egyensúly" állapot az evolúció hajtóereje. Az evolúció iránya.)

Sejtbiológia

Általános sejtbiológia

(A sejtek életjelenségei. A sejtekben található szerkezetek és ezek funkciója. A sejt anyag és energiaforgalma. Membrán jelenségek. Sejtosztódás. Sejtmozgások.)

Baktériumok. Egysejtűek az evolúciós törzsfán. Vírusok Állati és növényi sejtek, gombák

A szervezetek biológiája

A többsejtűek kialakulása, szerveződése

(A sejtek szabályozó kapcsolatai, specializáció.)

Egyedfejlődés

(Sejtdifferenciálódás, csíralemezek kialakulása, differenciált génaktivitás.)

Szaporodás

(Egysejtűek ivaros szaporodása. Ivarsejtek, megtermékenyítés, zigóta, többsejtűek szaporodása, szaporítószervek.)

A szervezettség különböző fokán álló többsejtűek az evolúciós törzsfán

A szervezet életműködése

A szervek kialakulása és funkciója

(Anyag és energiafelvétel formái, anyagcsere fogalma a szervezet szintjén. A növényi és állati anyagcsere közös és eltérő vonásai.)

Fotoszintetikus rendszerek

A növény szállító rendszerei

Légző rendszerek

Emésztő rendszerek

Kiválasztó rendszerek

Váz és mozgató rendszerek

A szervezet szabályozórendszerei

(Idegrendszer. — Kémiai szabályozás: növényi és állati hormonok, belsőelválasztású mirigyek, neuroendokrin szabályozórendszerek. — A szervezet belső állapotának szabályozása: A légzés és keringés szabályozása, a vízháztartás szabályozása, a glukóz szint szabályozása. — Belső védekező rendszerek: Immunreakció, immunválasz típusai, immunitás.)

A magatartás

(Az etológia alapjai. Zárt és nyitott genetikai programok. Motiváció, tanulás. A magatartás szerveződése. Alkalmazkodás az élettelen környezethez és más fajokhoz. Táplálékszerzés, ragadozók elleni védekezés. Fajon belüli kapcsolatok. Szociális magatartásformák. Territorialitás, agresszió. Ivadékgondozás, kommunikáció.)

Néhány szerv vagy rendszer összehasonlító evolúciós vizsgálata

IV. osztály főleg egyedfeletti

Genetika

(Mendel-szabályok és azok molekuláris genetikai magyarázata. Poligénes öröklődés. Szex öröklődése. Variabilitás, mutáció, rekombináció.)

A földi ökoszisztéma

(Az élővilág mint rendszer szabályozó tényezői. Anyag és energiaáramlás az élővilágban. Tartós egyensúlyok feltételei a bioszférában.)

Populációs biológia

(A populáció genetikai alapjai. Fenotípus, genotípus. Populációdinamika. Hardy—Weinberg-szabály. Szelektív párválasztás, szelekció, izoláció. Beltenyésztés, nemesítés. A fajok keletkezésének genetikai alapjai.)

2. félév: Anyagfejlődés

Az élet keletkezése

(Az élet keletkezése a Földön. A földkérget és élővilágot felépítő kémiai elemek relatív gyakorisága. Kémiai és biológiai evolúció. Az őskori élet hatása a Föld kőzetburkának, vízburkának és légkörének fejlődésére. Az élet lehetőségei az univerzumban.)

Az élet földi evolúciójának története

(A törzsfejlődés a földtörténeti korszakok rendszerében.)

Az ember evolúciója

(Az ember származása idegrendszeri vonatkozások alapján. Emberréválás, emberfajták. A nyelv kialakulása és szerepe. Kulturális evolúció.)

Az ember hatása az élővilágra

(Predikciós biológia, agrárbiológia, zöld forradalom. Bioszféra, nooszféra, környezetvédelem. Az ember mint társadalmi lény, az ebből adódó biológiai problémák. Népesedéspolitika.)

Anyagfejlődés

6 óra a IV. gimnázium második felében

Tervünkben a gimnáziumi tantárgyak mindvégig erősen egybehangolt tartalmúak, így jó hatásfokú tanításukhoz elengedhetetlenül szükséges, hogy tanáraik egymás munkáját ismerve, egybehangoltan tanítsák azokat időbeosztás, fogalomelnevezés és kereszthivatkozások szempontjából egyaránt. A gimnáziumi természettudományi nevelést lezáró félévben mindez fokozottan fontos, hiszen ennek a félévnek — a tanterv belső logikájából, az iskolai képzésben elfoglalt időhelyzetéből és az iskolából kilépésre készülő tanulók érdeklődéséből fakadóan — a végső szintézisalkotás a feladata. Ezért javasoljuk, hogy ebben az utolsó félévben lehetőleg egyetlen tantárgyként szerepeljen a tanulók tudatában a természettudomány, Anyagfejlődés néven, még akkor is, ha egymás után egy fizika- és egy biológia-szakos tanár tanítja a tananyagot. Megjegyezzük, hogy annak anyaga a kémia-, méginkább a földrajztanár képzettségéhez és érdeklődéséhez is közel áll. Az Anyagfejlődésnek az összes természettudományi tantárgy végkövetkeztetéseit magában kell foglalnia.

Szintézisalkotó témaként mai világunk kialakulásának történetét használjuk fel. Ez a tárgy mai világunkat és annak jövő felé mutató változási tendenciáit időbeli fejlődés

eredményeként mutatja be. Feltétlenül szükséges, hogy a figyelem a mai világra, az ember és természet mai viszonyára, a változás jelenlegi tendenciáira irányuljon. A történeti gondolatmenet azt a célt szolgálja, hogy a múltbeli változásokon végighaladva lendületet gyűjtsünk, úgy érkezzünk a mához, hogy képesek legyünk innen kitekinteni a jövő felé, amely tanítványaink számára létező realitás lesz. Ennek során szem előtt kell tartanunk, hogy a világ időbeli változásaiban is az anyag mozgástörvényei nyilvánulnak meg; azok korábbiakban megszerzett ismerete nemcsak a jelen és múlt megértését, de a jövő előrelátását is megkönnyíti. Mindezek miatt az Anyagfejlődés tantárgy kulcsszerepet játszik világnézetünk tudományos megalapozásában.

A gimnázium utolsó félévének hangulata különbözik a többi félévtől. Az Anyagfejlődés tantárgyat sem képzelhetjük el sem történelmi események memorizálásának, sem tanulói kísérletek, sem kvantitatív példák megoldásának sorozataként, de nem csinálhatunk belőle andalító meseórát sem. E helyett az anyag mozgástörvényeinek birtokában, azokra támaszkodva próbáljuk a Világmindenség, a Föld és az Ember mai állapotát megérteni a múltbeli történések eredményeként, mérlegelve az okokat és következményeket, az alternatívákat és a tendenciákat. A tantárgy tehát szemináriumszerű, vitaülésszerű eszmecsereként is feldolgozható; tapasztalataink szerint tanítványaink ebben az életkorban ilyen módszerű tanulásra fogékonyak.

Az Anyagfejlődés anyagát a Fizika és Biológia tananyagának utolsó féléves része képezi, az időrend logikája szerint rendezett formában. Az egész természettudományon végighaladó tanmenettel párhuzamosan folyhat az érettségire való felkészítés.

Tananyag

Csillagok kialakulása

(Kozmikus anyag gravitációs kontrakciója. Galaxisok, csillagok. A Tejútrendszer és a Nap kora. A Nap energiatermelése. Csillagfejlődés, a kémiai elemek kialakulása és gyakorisága.)

Bolygók kialakulása

(Az interstelláris anyag összetétele. Molekulák képződése az interstelláris térben: H_2, H_2O, NH_3, CH_4, grafit. A Nap bolygórendszerének kialakulása: gravitációs kontrakció és perdületmegmaradás. A Naprendszer generatív leírása. Az eredeti légkör, a bolygóléghörök története. A Merkur, Vénusz, Föld, Hold, Mars összehasonlítása. A Naprendszert feltáró űrkutatás.)

A Föld története

(A szilárd kéreg kialakulása. A folyékony fázis. Az eredeti redukáló légkör, a kémiai evolúció, az élet keletkezése. A földi légkör története, a fotoszintézis, az oxigénlégkör kialakulása. A troposzféra, sztratoszféra, ionoszféra fizikai folyamatai. Magnetoszféra és napszél. Nagy földtörténeti ciklusok, üledékképző és hegységképző ciklusok, azok hatása az élővilágra, bolygónk és az élővilág kölcsönhatása. Az élet lehetősége más égitesteken.)

Az élet evolúciójának története

(A molekuláris biológia elemeinek átismétlése, genetikai információk. Egysejtűek. Többsejtűek kialakulása és differenciálódása. A spórások és a rovarok, mint a szárazföld meghódítói. A nemzedékváltakozás alakulása. Élősködők. Nyitvatermő és zárvatermő növények, gerincesek. Mindezek elhelyezése a földtörténet időskáláján a földtörténeti korszakokban.)

Az ember evolúciója

(Az ember származása idegrendszeri vonatkozások alapján. Emberréválás, emberfajták. A nyelv kialakulása és szerepe. Kulturális evolúció.)

Az ember, a természet és technika kölcsönhatása

(Produkciós biológia, agrárbiológia, zöld forradalom. Ipari forradalom, tudományos-technika forradalom. Elektronika, automatizálás, számítógépek. Energiaprobléma. Atomenergia és atombomba. Bioszféra, nooszféra, környezetszennyezés, környezetvédelem. Az ember mint társadalmi lény, az ebből fakadó biológiai problémák, népesedéspolitika.)

Laboratórium

fakultatívan heti 4 óra a gimnázium III. osztályában és heti 6 óra a gimnázium IV. osztályában

A gimnáziumi fakultatív oktatás bevezetésekor javasoljuk, hogy azok a tanulók, akik a II. osztály elvégzése után közvetlenül természettudományi, műszaki, alkalmazott természettudományi pálya felé vagy hasonló területen való továbbtanulás felé orientálódnak, egységesen természettudományi gyakorlati képzést kapjanak. Akik természettudományi-műszaki-alkalmazott természettudományi felsőoktatási intézménybe pályáznak, a kötelező második idegen nyelv tanulása mellett fennmaradó fakultatív órakeretet az alábbi felosztásban használják fel:

a III. osztályban egységesen
1 óra matematikai gyakorlat és
3 óra kémiai laboratóriumi gyakorlat;
a IV. osztályban az egyetemi felvételi tárgyaktól függően vagy
3 óra fizikai laboratóriumi gyakorlat és
3 óra biológiai laboratóriumi gyakorlat vagy
3 óra matematikai gyakorlat (részben számítógépekre és logikai áramkörökre orientálva) és
3 óra fizikai (elektrotechnikai-elektronikai) laboratóriumi gyakorlat.

A pedagógia szempontjából a laboratórium egységes *nevelési célrendszerrel* rendelkezhet, amely az alábbiakat foglalhatja magában:

A) MANUÁLIS TEVÉKENYSÉG

1. A laboratóriumi eszközök ismerete
2. A laboratóriumi eszközök használatának készsége
3. Az alapvető munkafogások elsajátítása
4. Tiszta, rendezett körülmények biztosítása a munkához, a kísérletek, gyakorlatok gondos előkészítése
5. A labortechnikák biztonsággal való felhasználása a munkában

B) ÉSZLELELÉSI TEVÉKENYSÉG

1. Becslés és mérés megkülönböztetése, a pontosság határainak felismerése
2. Objektív megfigyelések és mérések végzése
3. A megfigyelések pontos leírása
4. A mérési adatok pontos vezetése
5. Rendezett, áttekinthető munkanapló vezetése

C) ÉRTÉKELÉSI TEVÉKENYSÉG

1. Az észlelés adatainak rendezése a vizsgált szempontok szerint
2. Az adatok felhasználásával összehasonlítható táblázatok készítése, függvénykapcsolatok feltárása, százalékos arányok megállapítása, összefüggések meglátása
3. A tapasztalt jelenségek okának felderítése, az összefüggések segítségével kauzális magyarázat készítése
4. Következtetések levonása, igazolható általánosítások megfogalmazása
5. A vizsgált jelenségben előforduló fizikai, kémiai, biológiai törvényszerűségek felismerése

D) TÁJÉKOZOTTSÁG

1. Tájékozódás a természettudományok és az alkalmazott tudományok ismeretterjesztő szakirodalmában, ismeretterjesztő és szakfolyóiratokban

2. Alapvető tájékozottság a szakirodalmi táblázatok, általában szakirodalmi adatok felhasználási módszereiben
3. A természettudományok és az alkalmazott tudományok alapvető kapcsolatának felismerése
4. Tájékozottság az új természettudományos elvek gyakorlati alkalmazásáról a termelésben
5. Tájékozottság az ipar, a mezőgazdaság, az egészségügy területén való elhelyezkedési és továbbtanulási lehetőségekről

E) ATTITŰDÖK

1. Érdeklődés a tudományos, technikai ismeretek iránt
2. Érdeklődés felkeltése és megerősítése a gyakorlati munka és a műszaki tervezés-alkotás iránt
3. Pozitív beállítottság a közösségben végzett munka irányában
4. Pozitív beállítottság a kutató, kísérletező módszer, mint a problémák megoldásának módja iránt
5. A kialakult természettudományos műszaki érdeklődésnek megfelelő pályairányulás

A természettudományi laboratóriumi gyakorlatok anyagát *egységes módszertani koncepció* keretében célszerű feldolgozni, amely hozzásegít a különböző természettudományi tárgyak módszertani integrációjához, így azok együttes nevelőhatásának erősítéséhez. Minden egyes feladat a következő felépítést követheti:

BEVEZETÉS:

ez a rész a feladathoz kapcsolódó legfontosabb elméleti tudnivalók néhány mondatos összegezése, egyben tartalmazza a probléma felvetését is.

TERVEZÉS:

a megfogalmazott feladat konkrét elvégzésének megtervezése a rendelkezésre álló eszközök és idő, az igényelt pontosság és egyértelműség szempontjainak figyelembevételével.

SZÜKSÉGES ANYAGOK ÉS ESZKÖZÖK:

a kísérletek elvégzéséhez szükséges anyagok és eszközök felsorolása, esetenként magyarázó rajzzal vagy képpel.

KIVITELEZÉS:

a munka menetének részletes leírása a tanulók számára, de csak szigorúan technikai, manuális munkákhoz való utasításokkal. Kész észlelési vagy értékelési utalások nem fordulhatnak elő. A feladatok megoldásának ebben a részében a manuális tevékenység a dominálót tényező.

ÉSZLELÉS:

az észlelés során a tanulóktól az elvégzett munkából következő objektív megfigyeléseket és méréseket várunk el. Idetartozik az önálló megfigyelések leírása, esetenként lerajzolása, minden mérés részeredményeinek feljegyzése, az adatok összegyűjtése és rendezése áttekinthető formában.

ÉRTÉKELÉS:

a tanulók az észlelés adatainak felhasználásával összehasonlító táblázatokat készítenek, ahol lehet függvényszerű kapcsolatokat tárnak fel, százalékos arányokat állapítanak meg, a tapasztalt jelenségekre magyarázatot keresnek, az okok felderítésével következtetéseket vonnak le, általánosítást fogalmaznak meg és fizikai, kémiai, biológiai törvényszerűséget kutatnak a megvizsgált jelenségekben.

Természetesen egy-egy probléma vizsgálatához többféle kísérleti megközelítést lehet összeállítani. A kísérletek összességét tartalmazó gyűjtemény lényegében egy olyan praktikum lenne, melyből az illető szaktanár — figyelembe véve a tanulók és az iskola adottságait — szabadon választhatna. Bármelyiket is végeztetné el a tanulóval, összességében a tanuló problémamegoldó gondolkodását biztosítaná az ily módon kialakított feladatrendszerek sora. Eddigi kísérleti tanítási munkánk tapasztalatai azt indokolják, hogy ne állítsunk össze merev tematikát a laboratóriumi gyakorlatokhoz, hanem a természettudományi tananyaghoz igazodva keressünk minél több variánst egy-egy probléma kísérleti megközelítésére, melyek alapját képeznék a leendő tanulói praktikumoknak.

Természettudományi érettségi

A biológia, fizika, földrajz, kémia múlt századból örökölt elszigeteltsége miatt nem volt mód arra, hogy az érettségin integrált természettudományos műveltséget kérjünk számon. Önmagában viszont bármelyik természettudományi tantárgy eltörpült a magyar vagy matematikai óraszámához, eme tárgyak által adott tárgyi tudáshoz és nevelőértékhez képest. Így történhetett, hogy éppen a tudományos-technikai forradalom kibontakozásának korában elmaradt a kötelező természettudományi tantárgy az érettségiről.

A használható objektív számonkérés hiánya nehéz helyzetbe hozta a felsőoktatási intézményeket. Mindegyik saját kemény felvételi rendszerét dolgozta ki. Hogy a gimnáziumi centrifugális tendenciákkal szemben a felsőoktatási intézmények igényelnének egy teljes spektrumú természettudományi felmérést, azt a kialakult felvételi gyakorlat bizonyítja. (Vegyészmérnöki karon matematika és fizika a felvételi tárgy. Az orvosegyetem fizika, kémia, biológia felvételit vezet be stb.)

Javasoljuk, hogy a gimnáziumi tanulmányok lezárásánál egységes természettudományi érettségi vizsgát vezessenek be kötelező jelleggel. Ez megfelelő központi szervezés esetén a természettudományi szakokon a felvételi számonkérést is pótolja. (Azt csak pályaalkalmassági felméréssel, beszélgetéssel kellene az egyetemeknek-főiskoláknak kiegészíteniök, de ez utóbbira a pályázóknak nem kell, nem is lehet tanulással készülnie.) A természettudomány tanításának itt bemutatott terve egységes ternészettudományi érettségi vizsgát lehetővé tesz, a terv végrehajtása arra fel is készít.

A természettudományi érettségi két részből állhat. Az „írásbeli" rész laboratóriumi mérést, példamegoldást és egy felvetett probléma kidolgozásának tervét tartalmazó rövid tanulmány megírását igényli. Ennek elemei nagymértékben választhatók lehetnek, hogy egy speciális témakörben való viszonylagos járatlanság ne sújtsa az érettségizőt. A „szóbeli" érettségi egységes tételrendszere a természettudomány átfogó elveinek biztos tudását és ellenőrző-kiegészítő kérdésként azok önálló alkalmazásában való gyakorlottságát kérné számon. Az egységes tételrendszer alapjául azt az összeállítást ajánljuk, amely „A természettudományos műveltség tartalma" címet viseli.

Az objektivitás és az önálló gondolkodás a jelenlegi példamegoldást számonkérő rendszernek vitathatatlan értéke. A példacentrikus érettségi és felvételi egyoldalúságát sok nevelő kritizálja. Nem jut érdemeihez méltón szóhoz az a tanuló, aki konstruktív manuális kísérletezésben, gyakorlati problémák megoldásában vagy az összefüggések felismerésében kiváló. Pedig a felsőoktatási intézményeket ezek a képességek is érdeklik. A gimnáziumon múlik, hogy mit és hogyan kérhet számon a felvételre jelentkező fiatalokon a főiskola, az egyetem a munkahely.

Lezárásként és összefoglalásként közüljük a 12 év természettudományos tantervét nem tanárszempontú szaktárgyi, hanem tanulószempontú életkor szerinti felbontásban, hogy kiemeljük természettudományos nevelési tervünk szuperstruktúráját. A tartalmat jellemző címszók után minden osztálynál kiemelten megadjuk a természettudományos tárgyak közös nevelési céljait. A tantárgyak „függőleges" rendező elve és a közös módszertani nevelési célok „vízszintes" kötései végeredményben a természettudomány „szuperstruktúráját" valósítják meg. Ezen túlmenően a zárójelben jelzett horizontális kötések

kínálják a legjobb csatlakozást az időben együtt futó többi tantárgycsoporthoz, elsősorban az új szemléletű matematikai és nyelvtudomány képzéshez.

1. *Természetismeret:* Az anyag megfigyelhető tulajdonságai
   MEGFIGYELÉS
2. *Természetismeret:* Az anyag mennyiségi tulajdonságai
   MÉRÉS
3. *Természetismeret:* Anyagi rendszerek kölcsönhatása
   KÍSÉRLET
4. *Természetismeret:* Helyzet, mozgás, tájékozódás
   VONATKOZTATÁS
5. *Természetismeret:* Hazai tájak és azok élővilága
   KÖRNYEZET
6. *Fizika:* Energia (hőmérséklet, hő, munka, tűz, fény)
   Biológia: Anyagcsere. Tápláléklánc. Ökológia
   MEGMARADÁS ÉS ÁTALAKULÁS
7. *Fizika:* Elektromos töltés és áram
   Kémia: Vegyületek, molekulák, atomok, ionok, elektronok
   Biológia: Sejttől a szervezetig
   TRANSZPORT-ÉPÍTŐELEM-ELV
8. *Fizika:* Tehetetlenség, lendület, lendületátadás
   Kémia: Egyszerű szervetlen és szerves vegyületek
   Biológia: Evolúciós rendszertan. Ember. Populáció
   ORGANIZÁCIÓ
   I. *Anyagszerkezet:* Az anyag korpuszkuláris modellje és hullámmodellje
   MODELLALKOTÁS: ALAK, MINTA, SZIMMETRIA
   II. *Fizika:* Dinamika
   Kémia: Szénvegyületek. Vegyülettulajdonság a szerkezet következménye
   KAUZALITÁS, ELŐRELÁTÁS, TERVEZÉS
   III. *Fizika:* Elektromágneses mező
   Kémia: Fizikai kémia, elektrokémia, fémek vegyületei
   Biológia: Sejt, szerv, szervezet, idegrendszer
   VISSZACSATOLÁS, SZABÁLYOZÁS.
   NAGY SZABADSÁGI FOKÚ RENDSZEREK
   IV. *Fizika:* Statisztikus termodinamika. Elektrontól galaxisig.
   Biológia: Öröklődés, populációbiológia
   Anyagfejlődés: Kozmikus, földi és biológiai evolúció. Emberréválás
   SOKASÁG. HIERARCHIKUS SZERVEZŐDÉS.
   IDŐIRÁNY ÉS EVOLÚCIÓ

ESEMÉNYEK

europhysics

Az EPS tanácsülése

Az Európai Fizikai Társulat 1976. április 7 és 8-án tartotta ezévi tanácsülését Lipcsében.

A tanácsülésnek kétségkívül a legfontosabb programpontja az EPS vezetőségének megválasztása volt. Ennek alapján a következőképpen alakult az új vezetőség:

Elnök: I. Ursu; Alelnök: W. Martienssen; Titkár: M. Guenin; Másodtitkár: T. Riste; Pénztáros: O. S. Heavens; Segédpénztáros: J. J. Went; Vezetőségi tagok: H. B. G. Casimir, S. P. Kapitza, A. Lösche, P. Radványi, Z. Wilhelmi.

A másik fontos programpont volt az EPS 1978-ban Yorkban (Nagy-Britannia) tartandó 4. Általános Konferencia tematikájának megvitatása. A jelenlegi elképzelés szerint a fizika aktuális kérdéseiről szóló plenáris előadásokon kívül a konferencia lényegében öt parallel szimpózium szinbiózisából állna, éspedig modern optika, felületi fizika-fázis átmenetek, nukleáris asztrofizika — forró plazmák, nehéz ion fizika, szinkroton sugárzás — kvarkok, mindegyikben hangsúlyozva a fizikai kutatások interdiszciplináris jellegét.

Ezenkívül több más kérdés is megvitatásra került, mint pl. az EPS folyóiratok helyzete, a fiatalok ösztöndíj kérdése stb. Itt kell megjegyezni, hogy mennyire sajnálatos a magyar fizika számára, hogy az Acta Phys. Hung. nem EPS folyóirat. Ez ugyanis bizonyos szabályokhoz való alkalmazkodást jelent, ami a fizikus közösség, de elsősorban a magyar fizika számára volna hasznos.

A tanácsülés keretében hangzott el A. Lösche professzor előadása is az NMR módszer alkalmazásáról kondenzált anyagokban.

A tanácsülést megelőzően került sor az EFT tanácsadó bizottságainak ülésére is, így pl. a „Fizika és társadalom" és az „Alkalmazott fizika" és „fizika az iparban" bizottságokéra.

B. D.

VÉLEMÉNYEK

LEVÉL BUDAPESTRE

David Hawkins
Boulder, Colorado

Kedves G,

Feleségemmel sok jó és erős benyomást őrzünk májusi budapesti látogatásunkról, bármilyen rövid volt is az. Hasznos volt számunkra, talán még Nektek is. Most rendszerezni próbáljuk a benyomásainkat; kötetlen formában nem annyira a látottakat írjuk le, hanem a reflexióinkat. Először is ki kell fejeznünk hálánkat az Eötvös Társulatnak, amiért alkalmat adott, hogy néhány napot ilyen jó foglalatossággal, ilyen jó társaságban tölthessünk el. Kérlek, továbbítsd köszönetünket V. T., T. E., K. S. és mások részére, akik olyan szívesen és számunkra emlékezetesen fogadtak.

Manapság, amikor Amerikában pénzhiány korlátozza az új nevelési törekvéseket, a ti erőfeszítéseiteknek eredményeit látva újulnak meg az általános előrehaladásra vonatkozóan táplált reményeink. Kicsiny gócokat próbálunk létrehozni mindnyájan,



amelyekből új hosszútávú rend fejlődhet ki. Minél több ilyen góc jön létre a világon, annál jobbak lesznek az esélyek. És a kristályosodási gócoktól vagy a kedvező sejtmutációktól eltérően az emberi erőfeszítések támogathatják is egymást!

A ránk gyakorolt optimista hatástok különösen erős azért, mert ti elég óvatosak vagyok, eléggé látjátok mind azt a sok komplikációt, ami még rátok vár. Jó tanárokat és tanítókat találtatok, igazán kiemelkedő tanárokat, akik talán kiválóbbak, mint gondoljátok. Felizgatta őket az a lehetőség, hogy felderítsék a friss tananyag és a friss tanítási módszer lehetőségeit; készek saját tudásanyaguk és készségeik fejlesztésére; ezzel felelnek arra a kihívásra, hogy a ti hivatásos munkatársaitok lehetnek. Minden meglátogatott osztályban tapasztaltunk valami kiemelkedőt: az óratervezés gondosságában, a gyermekekkel való kommunikáció könnyedségében, olyan légkör megteremtésében, ahol a tanulás lehetőségének izgalma volt jelen. Kevés olyan gyereket láttunk, aki unatkozott, vagy nem figyelt. Ezek olyan tények, amelyeket úgy is észrevehettünk (talán még jobban), hogy nem értettük a nyelvet; arra támaszkodtunk, ami univerzális. A Budapesten látott erőteljes órák minden egyes esetben arra utaltak, hogy megvan a további növekedés lehetősége, ha a tanítóknak-tanároknak biztosítjátok a hozzáértő támogatás feltételeit.

Túl gyakran tapasztaltuk a tantervek gyors beszűkülését, bármilyen jók is voltak azok kezdetben az akadémikus tananyag szempontjából. Ez a beszűkülés abból fakadt, hogy nem fogták fel: az eredményes nevelés elsődlegesen nem a „jóltervezett tanításból" fakad, hanem a jóltervezett aktivitásból, valamint a gyerekek és tanár osztályteremben és környező világban élt életének a kapcsolódásából.

A jó tanítók és tanárok tudják az ilyen kapcsolat fontosságát, legalábbis intuitíven érzik azt. Mi, akik segíteni próbálunk nekik, vagy támogatjuk, vagy gyöngítjük ezt a felismerést, attól függően, hogy mi magunk is mennyire fogjuk fel annak fontosságát. Még veszély forrásává is válhat a gyermekek jóltervezett tananyag és óravezetés iránt érzett lelkesedése (hiszen mindez ellentétben áll a számunkra sok helyen megszokott iskolai gyakorlattal!), ha ez a lelkesedés eltereli figyelmünket arról a lényegbevágóbb kérdésről, amellyel pedig folyton törődnünk kell. Ez pedig arra a — technikailag redundanciának minősülő — gazdagságra vonatkozó kérdés, ami fennáll a leckék tartalma közt és a közt a potenciális haszon közt, amit a gyermek a leckékből profitálhat saját tudásának alakításában (sokszor olyan módon hasznosítva a leckék anyagát, amire mi nem is gondoltunk).

Hadd idézzek fel egy példát az általános iskola első osztályából: az olvasni tanulást. Ebben nagyon rossz hatásfokúak a formális olvasási leckék, amelyek a „dekódolás" száraz metodikáját gyakoroltatják, és nagyon jó hatásfokú az, hogy a tanár az írott szót mindannak gazdagítására használja fel, amit a gyerekek az iskolában tesznek és tanulnak. Nagy benyomást gyakorolt ránk az a tény, hogy Magyarországon a hétéves gyerekek értelmesen olvasnak természetismeret órán, amikor a figyelmüket a megfigyelés és annak megvitatása köti le. Nyilvánvaló semmiféle tantervi utasítás nem érheti el ezt az eredményt, ha azt egy képzetlen tanító mechanikusan hajtaná végre. Eredményetek valóban impresszív.

A természettudományi és matematikai órák eredményessége végső soron szintén azon múlik, hogy a tanítók és tanárok a tananyagot mennyire képesek a gyerekek változatos tudásprofiljaihoz, készségeik eltérő szintjeihez, érdeklődésük különböző fókuszaihoz illeszteni. Arra kell törekedni, hogy a lecke anyagát a gyerekek — a maguk egyéni módján — megragadják, és hogy a máshol szerzett tapasztalatokat a leckeanyaggal összeillesszék.

Különös érzékenységgel szólunk a tanítás mesterségének és művészetének eme vonatkozásáról, hiszen a mi országunkban erős a hajlam a tanítás mechanisztikus felfogására. A mechanisztikus megközelítés sok bajnak a forrása — az olvasásoktatás csődje, a matematika csődje stb. — amelyet most próbálunk orvosolni.

Meg kell még jegyeznünk, hogy a legtöbb országban — és ezalól talán Magyarország sem kivétel — a tanárok számára nehéz megfelelő segítséget biztosítani a saját szükséges hivatásbeli gyarapodásukhoz. A tanterv-fejlesztésben való részvétel — amiben egyezünk Veled — olyan perspektívát ad, amiből, kiindulva meg tudom fogalmazni az igényt. A potenciálisan jó tanárokat keményen serkenteni kell, hogy fejlesszék ki a „redundancia művészetét", a tananyagnak gyermeki élethez való illesztését.

Ezt nehezen lesznek képesek elvégezni, ha maguk nem tudják az anyagot, és nem éreznek örömet annak elsajátítása során. Az állam összes oktatásügyi kötelezettsége közül legtöbbször a tanárok és tanítók folytonos szakmai fejlesztését hanyagolják el, — sokkal inkább, mint pl. az orvosok és más hivatások esetében.

Hogy ezeket az igényeket szélesebb körben elismerjék, annak eléréséhez megítélésem szerint a legjobb stratégia a következő: inkább csak néhány tanárnak adjunk intenzív támogatást, ha nincs módunk széleskörű hatékony támogatás biztosítására. Meggyőződésem, hogy ebben az esetben a jó nevelési törekvések kibontakozásának növekedési potenciálja nagyobb, mint a korlátozott idő- és pénz-források túl nagy területre való szétterítése, ebből következően a segítség túlságos elvékonyítása esetén. Amikor belekezdünk a munkába, a tanács megfogadása még nem esik nehezünkre. De a korai siker után erős lesz a csábítás, hogy a programot túl gyorsan engedjük terjedni, gyorsabban, mint ahogy annak adaptálására a tanárok képesek.

E tekintetben hadd utaljak a tanárokkal való individuális munkára, amelyre — tudjuk — Te is vállalkozol. Szükséges, hogy bátorítsuk és támogassuk a tanárok olyan törekvéseit, amelyek célja a gyermeki aktivitási módok sokféleségének növelése a matematikai és természettudományi órákon, és amelynek célja a matematika, természettudományok és más tárgyak közelhozása. Amióta elhagytuk Budapestet, sokat foglalkoztunk ezzel a kérdéssel, és szeretnék néhány megjegyzést lejegyezni, már csak azért is, hogy tisztábban lássam saját gondolataimat. Az általunk látott órák erősen tanárorientáltak, biztosan nem estek a „laissez faire" hibájába, amikoris túl sokat engedtek meg a gyerekeknek anélkül, hogy a munkára való kihívás megfelelő feltételeit megteremtették volna. De ezek az órák még egy fontos szempontból voltak kiválóak: a gyerekek érdekeltek voltak, boldogan vizsgáltak első kézből azokat az anyagokat, amelyeket felkínáltak nekik. Ilyen körülmények között, ilyen képzett tanárokra támaszkodva mi is haboznánk arra ösztökélni a tanárokat, hogy induljanak el egy előre meghatározott, feltehetően haladottabb tanítási stílus irányába. (El is vetnénk ezt a lehetőséget.) Sokkal hasznosabb, ha a tanárokat jelenlegi munkastílusukban támogatjuk, és bátorítjuk őket ezen munkastílus lehetőségeinek teljes kiaknázására. Nem létezik a tanítás egyetlen legjobb módszere; túl sokféle a tananyag felépítése, a határfeltétel stb. Az egyik lehetőség, amely most rendelkezésre áll, és amelynek a fontosságát hangsúlyoztam, hogy jobb „impedancia-illesztést" valósítsunk meg az iskola által kínált tananyag és a gyermek önálló tudásfejlesztése, megértésfolyamata között. Amint fejlődik a tanítók és tanárok diganosztikai képessége — pozitív diagnózisként, a tanulók egyéniségében az erős oldal keresése — képesek lesznek az órák átszabására annak fényében, amit megtanultak tanítványaik egyéniségéről; az eredményes tanulás „hatáskeresztmetszetét" így lesznek képesek megnövelni. Azok a tanárok, akik ápolják ezt a megközelítést, ki fogják találni annak módjait, hogyan éljenek a gyermeki képességek sokszínűségével. Lehet, hogy már előre is látod ennek a fejlődésnek néhány részletét! Talán átveszik majd a jó megoldásokat, amelyeket máshol látnak, esetleg az irodalomban leírt esetekben is utánanéznek (bár ez ritka jelenség). Leginkább azonban önmaguk találnak ki új utakat. Ez a terület még nincs jól felderítve. A folyamat dinamikáját külső személyek aligha befolyásolhatják!

Ilyen fejlődésről szólva a tanácsadó főszerepét abban látom, hogy a tanítókat-tanárokat segítse azon következtetések elméleti és gyakorlati levonásában, amelyekre őket a gyermekek iskolai órán k i v ü l i gondolkodásmódjának, problémamegoldásának megfigyelése vezetheti. Ha hivatalosan csak az óratervhez ragaszkodó szűkszempontú értékelést kívánják is meg, ez nem fogja korlátozni azokat a tanárokat, akikkel megismerkedtem. Feltétlenül szükséges, hogy a tanárok és segítőik a gyereket minél szélesebb látószögből értékeljék ki, mert az innen eredő visszacsatolás segíthet a haladás irányának kijelölésében. Mindezt egyszer részletesebben is diszkutálhatnánk. Az imént láttam (Angliában) egy kutatási pályázatot: egy „résztvevő megfigyelő" töltsön el egy évet egy osztályban, ott osszon meg a tanárral minden munkát. Mit kellene a megfigyelőnek tennie? Van-e K. S.-nak erre ötlete? Mit jó igazán kutatni ezen a téren?

Talán megjegyzéseimet valahogy még használni tudjátok. Ha mást nem, annyit bizonyíthatnak, hogy a budapesti látogatás töprengésre ösztönzött. A legőszintébb üdvözlettel

David Hawkins

A Fizikai Szemle szerkesztőbizottsága az 1972. januárban meghirdetett Vélemények sorozatát az olvasók kérésére folytatja ez évben is, az akkor kialakított szerkesztőbizottsági állásfoglalás alapján. E szerint a „Fizikai Szemle feladatául vállalja el, hogy teret nyit a fizikai kutatás és a fizika oktatásra vonatkozó egyéni véleményeknek, ha azok értékes gondolatokat tartalmaznak és építő szándékúak: függetlenül attól, hogy egyeznek-e a lap szerkesztőinek nézetével, vagy sem". Ennek szellemében várjuk továbbra is olvasóinknak, várjuk a magyar fizikusoknak leveleit.

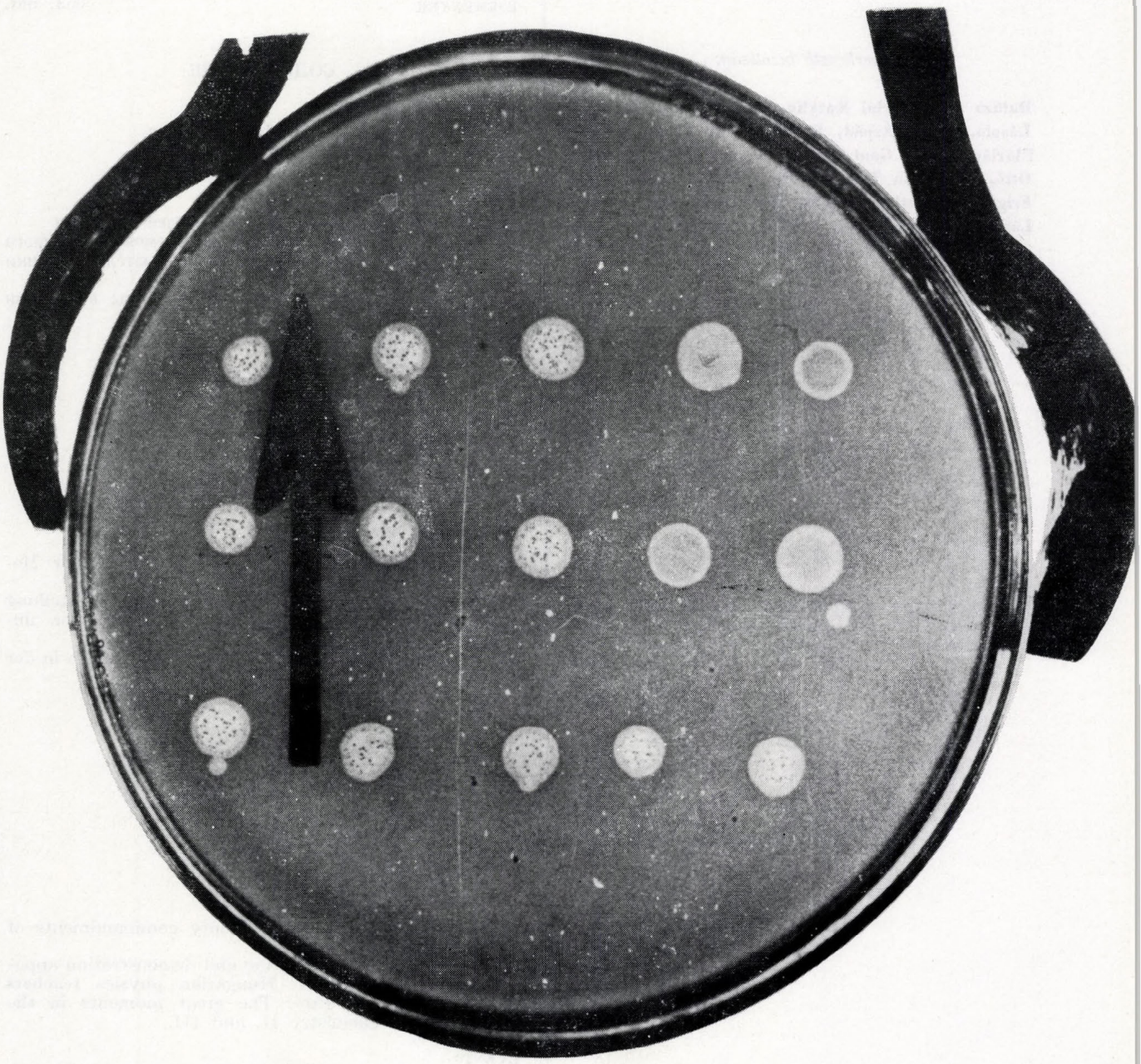
A szerkesztőbizottság

A szerkesztésért felel: Turiné Frank Zsuzsa
Szerkesztőség: Budapest V., Anker köz 1. Eötvös Loránd Fizikai Társulat. Távbeszélő: 227-040
A kiadásért felelős: Siklósi Norbert igazgató
Kiadja a Lapkiadó Vállalat, Budapest VII., Lenin körút 9—11. Levélcím: 1906. postafiók 223 Távbeszélő: 221-293
Terjeszti a Magyar Posta. Előfizethető bármely postahivatalnál, a kézbesítőknél, a Posta hírlapüzleteiben és a Posta Központi Hírlap Irodánál (KHI, 1900 Budapest V., József nádor tér 1.) közvetlenül vagy postautalványon, valamint átutalással a KHI 215-96162 pénzforgalmi jelzőszámlára
Előfizetés egy évre 72,—Ft; egyes szám ára 6,—Ft. Megjelenik havonta
76.3328 Akadémiai Nyomda Budapest V., Gerlóczy utca 2. — Felelős vezető: Bernát György

Index: 25.289

fizikai szemle

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat lapja



1976/9

A szerkesztő bizottság elnöke:

Marx György

A szerkesztésért felelős:

Turiné Frank Zsuzsa

A szerkesztő bizottság titkára:

Berényi Dénes

Szerkesztő bizottság:

Balázs Béla, Barlai Katalin, Barta György, Bozóky László, Csekő Árpád, Dede Miklós, Fehér István, Flórián Endre, Gaal István, Groma Géza, Haiman Ottó, Hoffmann Tibor, Holics László, Károlyházy Frigyes, Keszthelyi Lajos, Kovács István, Mihály László, Schanda János, Soós Károly, Szigeti György, Tóth Eszter, Valkó I. Péter, Vermes Miklós

Címképünk:

Vírusok okozta pusztítás az E. coli baktérium tenyészetén (JATE Genetikai Tanszéki Csoportban készült felvétel, részletes magyarázat a 328. oldal alján.)

TARTALOMJEGYZÉK

Orosz László: A gén és cisztron 321. old.
Forgács Gábor: Katasztrófa-elmélet 329. old.
B. Pullmann: Kvantum-biofizika 314. old.

A FIZIKA TANÍTÁSA

Dede Miklós—Demény András: A mechanika húszparancsolata 325. old.
Csekő Árpád: A fizikatanárok XIX. országos ankétja és fizikai eszköz kiállítása Zalaegerszegen 338. old.
Szabadváry Ferenc—Pető Gábor: A kémia nagy pillanatai II—III. 350. old.

ESEMÉNYEK 353. old.

СОДЕРЖАНИЕ

Л. Орос: Ген и цистрон
Г. Форгач: Теория катастроф
Б. Пульман: Квантовая биофизика

ПРЕПОДАВАНИЕ ФИЗИКИ

М. Деде—А. Демень: Двадцать заповедей механики
А. Чеке: XIX. Съезд и выставка демонстрационного оборудования венгерских преподавателей физики средних школ
Ф. Сабадвари—Г. Петё: Великие моменты в истории химии II и III

СОБЫТИЯ

INHALT

L. Orosz: Gen und Cistron
G. Forgács: Katastrophentheorie
B. Pullmann: Die Quantenbiophysik

UNTERRICHT DER PHYSIK

M. Dede—A. Demény: Die zwanzig Gebote der Mechanik
A. Csekő: Die XIX. Landestagung und Ausstellung physikalischer Demonstrationsapparatur der ungarischen Physiklehrer
F. Szabadváry—G. Pető: Die grossen Augenblicke in der Geschichte der Chemie II. und III.

EREIGNISSE

CONTENTS

L. Orosz: Gene and cistron
G. Forgács: Catastrophe theory
B. Pullmann: Quantum biophysics

THE TEACHING OF PHYSICS

M. Dede—A. Demény: The twenty commandments of mechanics
A. Csekő: The XIXth Meeting and demonstration apparatus exhibition of Hungarian physics teachers
F. Szabadváry—G. Pető: The great moments in the history of chemistry II. and III.

EVENTS

fizikai szemle

AZ EÖTVÖS LORÁND FIZIKAI TÁRSULAT LAPJA

Alapította Eötvös Loránd 1891-ben Mathematikai és Physikai Lapok néven

XXVI. évfolyam 9. szám 1976. szeptember

A GÉN ÉS A CISZTRON

Orosz László

JATE Genetikai Tanszéki Csoport, Szeged

Vegyünk kezünkbe egy alapvető genetikai ismereteket nyújtó könyvet. Legyen ez a gimnáziumi tankönyv. A következő fogalmakat ezekután rövidesen belátjuk:

1. Az „absztrakt" gén az öröklődés elemi egysége, anyaga nagyon is konkrét: a DNS, ritkán RNS.

2. A gén a kromoszóma meghatározott pontján (szakaszán) helyezkedik el — ez a *lókusz*.

3. A lókuszon a génnek számos alternatív változata helyezkedhet el — az *allélek*.

4. A természetben leggyakrabban előforduló, legadaptívabb („legjobb") allélt nevezzük *vadtípusú* allélnek. A vadtípusú allélt + jellel vagy ami ezzel egyenértékű, a gént jelképező kisbetűvel és felső indexben + jellel ábrázoljuk: a^+. Nem vadtípusú allél szinonim jelölése ennek megfelelően: a vagy a^-.

5. A magasabbrendű szervezet (borsó, muslica, ember) *diploid* — azaz minden kromoszómából kettővel rendelkezik, egyiket apjától, másikat anyjától örökölte. A diploid szervezet tehát minden gén két alléljét hordozza sejtjeiben. Ha a két allél azonos — *homozigóta* az egyed: $a^+/a^+, +/+$. Ha különböző — *heterozigóta*: a^+/a^-, $+/a$.

6. Az allélösszetételt *genotípus*nak nevezzük.

7. A két allél együttese kialakítja a láthatót, az érzékelhetőt, a mérhetőt, a *fenotípus*t.

A fenotípust jelölhetjük nagybetűvel: A^+, A^-.

8. A két allél hozzájárulása a fenotípushoz nem mindig egyforma. Azt az allélt, amely egyszeres dózisban is létrehozza a reá jellemző fenotípust, *domináns*nak nevezzük. A heterozigóta domináns egyed fenotípusa tehát domináns: a^+/a^+ vagy $a^+/a^- \rightarrow A^+$. Megfordítva: az az allél, amely csakis homozigóta állapotban képes a reá jellemző fenotípust kialakítani, *recesszív*: $a^-/a^- \rightarrow A^-$.

A vadtípusú allél általában domináns a többi alléllel szemben: $a^+ > a^-$.

Ha két allél egyenlő mértékben járul hozzá a fenotípushoz, *intermedier*nek nevezzük őket, ha külön-külön egymás mellett létrehozzák jellemző fenotípusukat, egyazon egyeden, *kodomináns*ok.

9. A diploid kromoszómaszám és a genotípus állandóságát a szervezet sejtjeiben — *testi sejtek*ben — a *mitózis* vagy számtartó osztódás biztosítja.

10. Az ivarsejtek vagy *gaméták* csak egyetlen kromoszómaszerelvényt tartalmaznak, — *haploid*ok. A gaméták haploid kromoszómaszámát a számfelező osztódás vagy *meiózis* biztosítja.

11. Nevezetes borsókísérletei alapján Mendel 1865-ben három törvénybe foglalta a diploid szervezetek domináns-recesszív öröklődési szabályait. Ha a allélek kialakítják A fenotípust, és $a^+ > a^-$:

I. homozigóta $A^+ \times A^-$ szülők (P) keresztezésének eredménye egységes a^+/a^- heterozigóta domináns (A^+) első vagy F_1 nemzedék,

II. az egységes F_1 nemzedék populáción belüli termékenyítése (*inter se*) a következő vagy F_2 nemzedékben „hasadást" eredményez — megjelennek az eredeti szülői (P) genotípusok. A genotípus hasadási arányai: $1a^+/a^+ : 2a^+/a^- : 1a^-/a^-$, a fenotípusé: $3A^+ : 1A^-$.

III. Két különböző gén alléljei $-a^+ > a^-$; $b^+ > b^-$ — szabadon kombinálódnak, s ez a fenti sémát követve F_2 nemzedékben $9A^+B^+ : 3A^+B^- : 3A^-B^+ : 1A^-B^-$ fenotípus hasadási arányt eredményez. Ami nem más mint két független 3 : 1 hasadás szuperponálódása.

12. A XX. század elején bizonyították, hogy nem az allélek, hanem az őket hordozó apai és anyai eredetű kromoszómák kombinálódnak szabadon, így a III. törvény csak olyan allélpárokra teljesül, amelyek más-más kromoszómapáron helyezkednek el. Egyazon kromoszómán fekvő allélek „kapcsoltan öröklődnek. A törvényt régebben a genetika IV. főtételének nevezték — felfedezése és általános igazolása. Morgan és iskolája nevéhez fűződik.

13. Vannak élőlények — baktériumok, fágok, vírusok, egyszerű gombák —, amelyek normális életük során *haploidok*. Fenotípusuk tehát tükrözi a genotípust, mivel génenként csak egyetlen allélt hordoznak, amely így szabadon kifejtheti fenotípusát. Ezen lények életük során bizonyos ideig diploid állapotban is létezhetnek, így — csakugy mint a borsónövény, a fonálféreg vagy a muslica — tárgyai lehetnek a genetikai kutatásnak.

Előadás az ELFT „Genetika fizikusoknak" iskolájában, Szeged, 1975. január

A cisztron definiálása

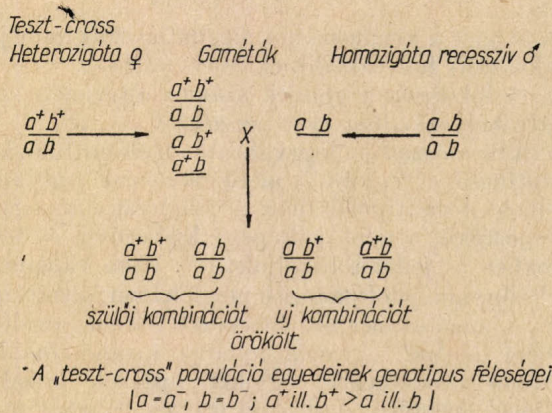
A pontos definíció az 1950-es évek közepe óta változatlanul így szól: a cisztron a kromoszómát alkotó DNS-lánc azon szakasza, amely egy adott polipeptid lánc szintézisét meghatározza. Mivel az enzimeket felépítő polipeptid láncok a tapasztalatok szerint átlagosan 300—500 aminósav-maradékból épülnek fel, az átlagos méretű cisztron 900—1500 nukleotid-bázis hosszú, azaz 300—500 nm. A gén tehát általánosabb kategória, mint a cisztron, tartalma lazábban meghatározott, nem mond semmit például a biokémiai szerepről — ezt általánosan a fenotípus szóval helyettesíti. A genetikai világképbe ez a „laza tartalom" tökéletesen beleillett addig a pontig, amíg a gén mint az öröklődés elemi egysége a működés, a mutáció és a kombinálódás egységeként egyaránt használható absztrakció volt.

A klasszikus génfogalom szerint a gén meghatároz egy tulajdonságot; a gén mutációja új allélhez, a tulajdonság változásához vezet. Az allélek kombinálódnak a gamétákban, s így az utódnemzedékben is. Mendeli példával élve: két gén meghatározza a borsószem színét és alakját, mindkét génnek legalább két allélje ismeretes — sárga/zöld; gömbölyű/szögletes. A gamétákban a szín és az alak alléljei egymástól függetlenül kombinálódnak, egyforma valószínűséggel létrehozva a négy lehetséges szín és alak kombinációt. Említettük, hogy egyazon kromoszómán fekvő allélek együtt öröklődnek, az allélkombináció tehát kapcsolt. A kombinációt összetartja a kromoszómát alkotó egyetlen óriás DNS molekula. A kapcsoltság nem abszolút, az apai és az anyai eredetű kromoszóma közötti *„crossing-over"* folyamat lehetővé teszi az új allélkombináció létrejöttét. Magát a folyamatot *rekombinációnak*, eredményét *rekombinánsnak* nevezzük. Jó közelítéssel igaz, hogy a crossing-over esemény fellépésének valószínűsége két allélpár között egyenesen arányos azok távolságával. Megfordítva: minél közelebb van két allél egymáshoz, annál ritkábban keletkezhet rekombináns kromoszóma, végső soron rekombináns egyed. Egy heterozigóta egyedben keletkező rekombináns kromoszómák — továbbiakban rekombinánsok — gyakorisága alapján felrajzolható a kromoszómán fekvő gének (illetve az őket reprezentáló allélpárok) sorrendje és relatív távolsága: a *géntérkép*.

Elfogadva a fentieket, a genetikai analízis területén tett kitérő után térjünk vissza a klasszikus génre, amely funkcionális, mutációs és rekombinációs egység. A géntérképen a klasszikus gén egyetlen ponttal jellemezhető, amely pontot a gén valamelyik allélje foglal el. Rekombináció eszerint csakis különböző gének alléljei között lehetséges. Megfordítva pedig igaz lenne: ugyanazon gén alléljei között a rekombináció kizárt, mivel az allél kisebb részekre tovább nem osztható egység.

A gén oszthatósága kérdést tehát az allélek közötti rekombináció bizonyításával / cáfolatával lehet megválaszolni: ha a gén nem is pontszerű, de kicsiny területet foglal el, belátható, hogy még legtávolabbi pontjai között is kicsi a crossing-over fellépésének valószínűsége — a rekombinánsok gyakorisága. A ritkán előforduló rekombináns kromoszómát csak rengeteg utódkromoszóma átvizsgálásával lehet kimutatni, az oszthatósági kérdés eldöntéséhez tehát olyan nagyfelbontású rendszerre van szükség, amelyben sok utódkromoszóma gyorsan vizsgálható. Az már kísérleti technikai kérdés, hogy a rekombináns és nem-rekombináns kromoszómákat egyenként „átmentsük" egy-egy élő utódba, amelyben azután vizsgálhatóvá válnak. Egyik ilyen kromoszóma tesztelési lehetőség az ún. „teszt-cross" — pl. heterozigóta nőstény (♀) keresztezése* homozigóta recesszív hímmel (♂). A heterozigóta ♀ meiózisakor keletkező petesejt megtermékenyülve a homozigóta recesszív ♂ spermiumával, olyan egyedet hoz létre, amelynek fenotípusa tükrözi a heterozigóta szülőtől származó kromoszóma vagy gaméta allélösszetételét (1. ábra).

A rekombinációs oszthatóság bizonyítása azonban csak a kérdés egyik oldala. Nyitva marad a működési oszthatóság kérdése.



* A „teszt-cross" populáció egyedeinek genotípus féleségei
$|a^+-a^-;\ b^+-b^-;\ a^+ill.\ b^+ > a\ ill.\ b|$

1. ábra

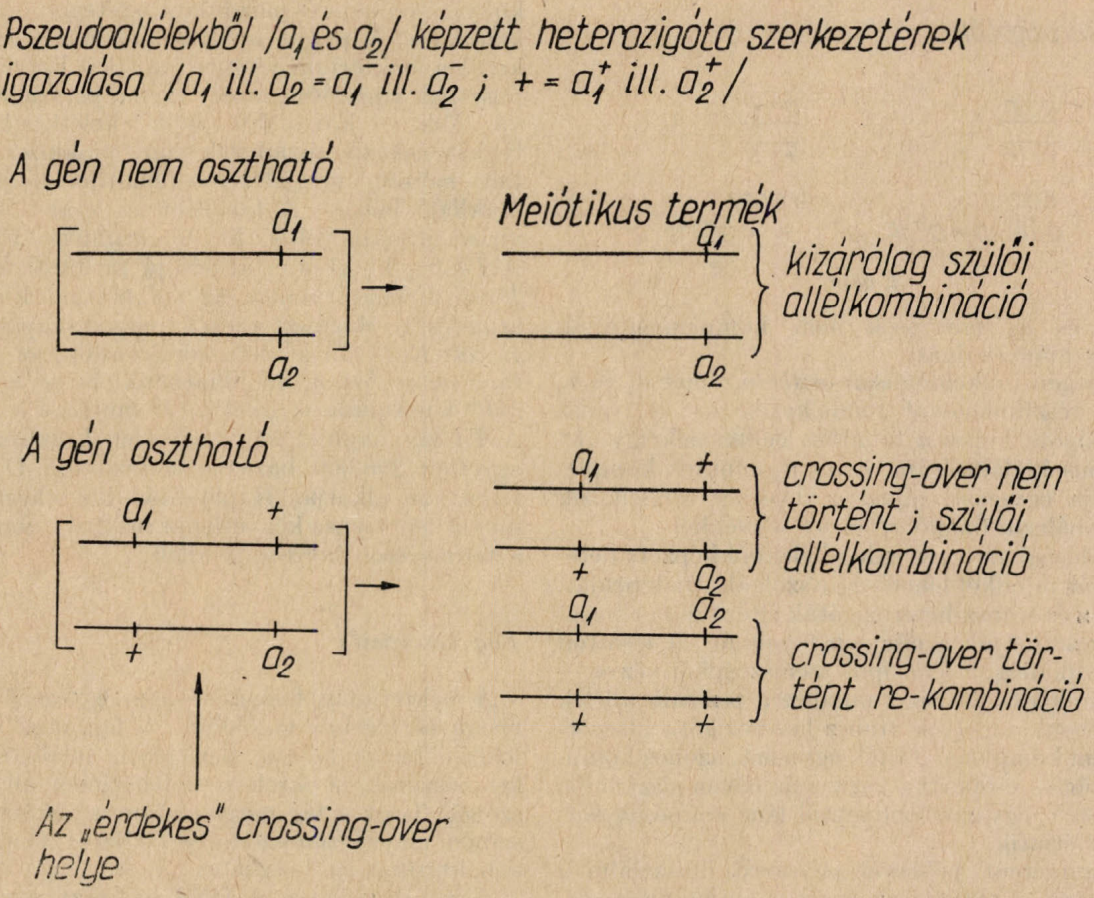
Pszeudo allélek — rekombinációs oszthatóság

Legyen egy gén, amelynek a^+ vadtípusú allélje mellett számos a^- mutáns allélje is megkülönböztethető: a_1^- és $a_2^- \cdot a^+$ allél A^+; a^- allélek A^- funkciók, fenotípusok kialakításához járulnak hozzá. Állítsuk elő a_1^-/a_2^- heterozigóta egyedet és ellenőrizzük a meiózis eredményét. Osztható a gén, ha $a_1^+a_2^+$ (röviden a^+ vagy $++$) ill. $a_1^-a_2^-$ duplán mutáns (röviden a_1a_2) kromoszómákat találunk — ezek ui. rekombinánsok. A heterozigóta egyed kérdéses kromoszómapárját és a meiózis eredményét tehát így írhatjuk fel (2. ábra).

Kiválasztott génünknek tehát kiterjedése van, amely legalább akkora, mint $a_1^- - a_2^-$ távolsága. A pszeudo allélek pontosan úgy viselkednek a valóságban mint a_1^- és a_2^- Ma egyszerűen mutáns alléleknek nevezzük őket, a hordozó egyedeket pedig, ha homozigóták vagy haploidok, mutánsnak.

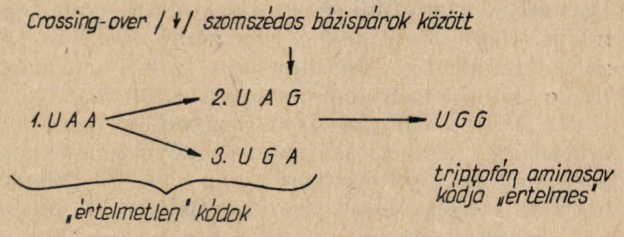
A pszeudo allélia a gén rekombinációs oszthatóságát igazolta, egy további kérdés azonban az

* A keresztezés genetikai jelölése: $+/a$ ♀ × a/a ♂.



2. ábra

oszthatóság alsó határának definiálása. Bizonyítani lehetett, hogy az alsó határ a lehető legkisebb, azaz a DNS molekula két szomszédos nukleotid bázispárja között is előfordulhat crossing-over. Előállítottak egy olyan mutáns allélt, amelyikben az egyik DNS információ ismert módon változott meg. Ez a változás a hírvivő RNS-en (mRNS) az UAA nformációnak felel meg. Az UAA triplet stopjeli, aminosavat nem határoz meg, ezért a fehérjelánc megszakadását, a funkció elvesztését okozza. UAA mutánsból specifikus A → G cserével egy lépésben (mutációval) UGA és UAG mutáns állítható elő. Az egyszerűség kedvéért jellemezzük az ilyen mutánsokat az mRNS-ben lévő jellel, nem feledve, hogy a valóságban mindezt kettőscsavar DNS szerkezetben kellene elképzelni. UGA és UAG tripletek szintén stopjelek, szintén a funkció elvesztését okozzák. Az UGA / AUG heterozigóta utódjai között azonban funkcióképes allélt hordozó rekombináns egyedek is megjelentek, kb. 10^{-6} gyakorisággal. Ezek a rekombináns egyedek csak is UGG jellel jellemezhetők, mivel ez az egyetlen „értelmes", aminósavat jelentő jel, amely előállítható rekombináció útján a két „értelmetlen" kódot hordozó heterozigótából. UGG bizonyítja tehát a crossingover fellépésének legalsó határát: az apai és anyai kromoszómákat alkotó DNS kettőscsavar szomszédos bázispárjai között is előfordulhat (3. ábra).



3. ábra

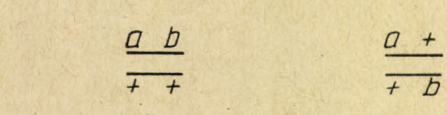
Komplementáció és funkcionális oszthatóság

Két pszeudo allélből két heterozigótát is képezhetünk: cisz- és transz-heterozigótát (4. ábra).

A cisz heterozigótában — $a_1^- a_2^- / a_1^+ a_2^+$ — a két mutáció (pszeudo allél) egyazon kromoszómán fekszik, míg a másik kromoszóma mindkét pontra vadtípusú. Látható, hogy ez az együttes rendelkezik egy hibátlan (a^+) alléllel, így a heterozigóta egyed fenotípusa normális (A^+) lesz, feltéve ha $a^+ > a_1^- a_2^-$. Az egyetlen a^+ allél tehát ellátja a sejtet a megfelelő géntermékkel.

A transz heterozigótában — $a_1^- a_2^+ / a_1^+ a_2^-$ — két mutációt hordozó kromoszóma áll egymással párban. Ha a gén funkcionálisan *nem osztható*, akkor ez a transz heterozigóta nem képes A^+ fenotípus kialakítására, mivel erre sem $a_1^- a_2^+$ sem $a_1^+ a_2^-$ (röviden a_1 és a_2) allél önmagában nem képes. —

Heterozigóták



a ill. $b = a^-$ ill. b^-; $+ = a^+$ ill. b^+

4. ábra

— a_1 és a_2 mutánsok nem komplementálják egymás hiányosságát.

Ha a gén funkcionálisan *osztható*, tehát a_1 és a_2 önálló részfunkcióval rendelkezik, — a transz heterozigóta képes a hibátlan géntermék így A^+ fenotípus kialakítására. a_1 és a_2 mutáns komplementálja egymást, mivel a rendszer rendelkezik funkcionálisan önálló a_1^+ és a_2^+ allélekkel.

A valóságban a pszeudo allélekből képzett heterozigóták mindkét lehetőségre szolgáltatnak példát.

A cisz és transz-heterozigóták eltérő feno-típusából levezethetjük a cisztron fogalmát. A cisztron — genetikailag, a fenotípus szemszögéből nézve — a génműködés egysége: mindazon pszeudo allélek (mutánsok), amelyek transz-heterozigóta állapotban nem komplementálják egymást, azonos komplementációs csoportba vagy más néven cisztronba sorolhatók, egyazon polipeptid lánc aminósav sorrendjét érintik.

Anyagcsereút példával egyszerű illusztrálni a cisz-transz effektust: az arginin aminósav glutaminsavból szintetizálódik nyolc lépésben nyolc enzim közreműködésével (*Arg*$^+$ fenotípus). Ha bármelyik enzimfunkció kiesik, arginin nem képződik (*Arg*$^-$ fenotípus). Nagyszámú mutáció vezethet tehát *Arg*$^-$ fenotípushoz, ezek a mutációk nyolc komplementációs csoportba oszthatók — *A,B,C,D,E,F,G,H*. Az *ArgC* cisztronban például a mutáció a 3. átalakítási lépést végző enzimet károsítja, míg az *ArgE* cisztronban az 5.-et. Belátható, hogy az a transz-heterozigóta, amelyik a 3. lépést nem képes elvégezni, mindkét kromoszómáján az *ArgC* cisztronba sorolható mutációt hordoz: C_1^-/C_2^-. Ezzel szemben *ArgC* és *ArgE* csoportba sorolható mutánsok heterozigóta állapotban a 3. és 5. átalakítási lépést egyaránt képesek ellátni: *ArgC*$^-$ *ArgE*$^+$/*ArgC*$^+$*ArgE*$^-$ — a fenotípus *Arg*$^+$.

Az rII gén

Az *rII* gén volt az a rendszer, amelyhez a pszeudo allélek titkának megfejtése kapcsolódott. Egy fizikusból genetikussá lett név is állandó jelzője ennek a történetnek: Seymour Benzer.

A *T4* fág az *Escherichia coli** közönséges bélbaktérium egyik vírusa, kb. 100 génjét ismerjük, ezek egyike az *rII*. A *T4* kimutatása, mint a vírusoké általában, az ún. plakkolási vagy tarfolt technikával történik. Ennek lényege: a baktériumból vékony, egyenletes és mozdulatlan réteget, „pázsitot" képeznek. A pázsit opálosan áttetsző. Ha vírus kerül a baktérium rétegre, egy kis körzetben elpusztítja a pázsitot, amely ezen a ponton átlátszóvá válik, — kör alakú „lyuk" keletkezik. Ezt a lyukat nevezik tarfoltnak vagy plakknak. A tarfolt mérete, megjelenése (fenotípusa) jellemző, öröklődő bélyeg. A tarfoltot az eredeti egyetlen vírus utódjai töltik ki — számuk$\sim 10^7$/plakk. A *T4* fág kb. 1 mm átmérőjű tarfoltot képez az *E.coli B* baktériumon, az *rII* mutáns kb. 3 mm átmérőjűt. Másrészt az *rII*$^+$ egyed szaporodik az *E.-coli K 12* (λ) jelzésű baktériumon, az *rII* mutáns nem. Azt is mondhatnánk, hogy *K 12*(λ)-n *rII*$^+$ fenotípusa az „élet", *rII* mutánsé a „halál". A *T4* fág haploid lény, egyetlen kromoszómáját egyetlen 200 000 bázispár hosszúságú DNS kettőscsavar alkotja. Haploiditás következtében a tarfolt fenotípusa közvetlenül tükrözi a genotípust, a ténylegesen hordozott allélt.

Fág keresztezés

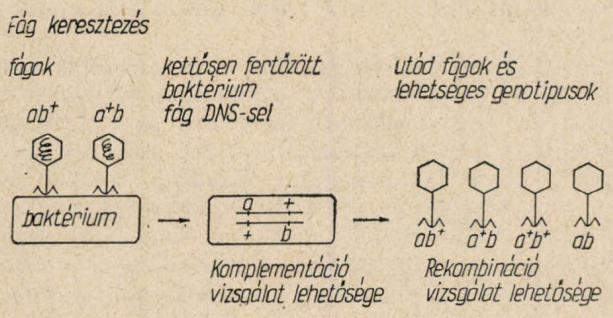
A bakteriofág felépítése igen egyszerű — feji részre és farokra tagolódik. A feji részt kívülről fehérje burok képezi, belsejében található a fág kromoszóma. A farok rész fehérjéből áll és arra szolgál, hogy a fág megtapadjon a baktérium felszínén, majd kromoszómáját (DNS-ét) beinjektálja a baktériumsejt belsejébe.

A citoplazmában a DNS egyrészt megsokszorozódik (replikáció), másrészt irányítja mindazon fehérjék termelését, amelyek az új fágok kialakulásához szükségesek. Az életciklus utolsó lépése a baktérium sejtfalának feloldása, s így az utódfágok (50-néhány száz) ismét a közegbe jutnak. Az *rII* gén az életciklus sejten belüli legelső fázisában fejti ki hatását. A megszokott diploid, heterozigóta, cisz-transz állapotok, stb. kezelése, a bakteriofág rendszerben általánosító genetikai szemléletet követelt meg. Mindezt az 1940-es években működő „Fág-csoport" alkotta meg, amelynek vezetője a neves fizikus, Max Delbrück volt.

Egyetlen baktériumsejt megfelelő kísérleti körülmények között fertőzhető egyszerre kétféle (mutáns) bakteriofággal — ez a fág keresztezés. A citoplazmában a genetikailag eltérő fág DNS-ek között történhet crossing-over, így rekombináns utódfág keletkezése lehetséges. A géntermékek is egyazon citoplazmában termelődnek, ami a komplementáció lehetőségét biztosítja. A fág keresztezés során a genetikailag különböző fágokkal egyszerre fertőzött baktériumsejt ugyanúgy, kezelendő, mint a heterozigóta egyed — komplementáció és rekombináció vizsgálatra alkalmas (5. ábra).

Benzer azonnal észrevette az *rII* rendszer óriási előnyét: kettős ellenőrzés lehetséges. Egyrészt a *B* baktériumon jól látható, nagyméretű tarfoltja alapján (fenotípus) rengeteg vadtípusú egyed (*rII*$^+$) között is felismerhető egyetlen *rII* mutáns. Megfordítva, a *K 12* (λ) baktériumon akár egy millió *rII* mutáns egyed között is kimutatható

* Rövidítve: E. coli.



5. ábra

egyetlen rII^+ egyed kizárólagos tarfolt képzése alapján.

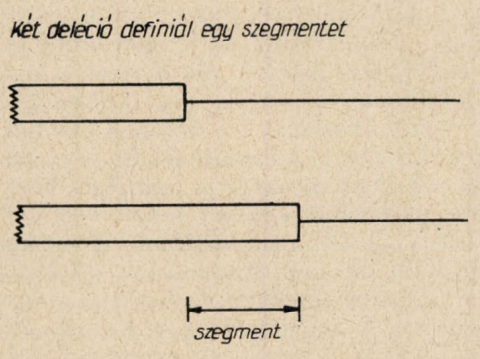
A rendszer tehát ideális pszeudo allélek keresésére és pszeudo allélek közötti rekombináció kimutatására, — a nagy tarfolt illetve rII^+ kimutatása alapján.

A komplementáció is vizsgálható, ha a mutáns fágokat egyszerre juttatjuk *K 12* (λ) baktériumba. Ha a fágok együttesen szaporodnak, a mutánsok komplementálják egymást, ha nem szaporodnak, nincs komplementáció.

Pont és deléciós mutánsok

Benzer kétféle mutáns alaptípust talált: deléciós és pontmutánst. A pontmutáns elnevezés jelöli, hogy egyetlen bázispár változásáról van szó, a deléció a DNS egy hosszabb szakaszának kiesését, hiányát jelenti. A pontmutánsok utódjai között mindig fellép vadtípusú egyed, amelyet *revertáns*nak vagy *back-mutáns*nak nevezünk ($a^- \rightarrow a^+$; $A^- \rightarrow A^+$).

A revertánsok gyakorisága általában 10^{-5}—10^{-9} között váltakozik. A deléciós mutánsok utódjai között sohasem fordul elő revertáns. A pontmutánsok bármely másik, nem azonos pontmutánssal képesek rekombináns utódot produkálni. A deléciós mutánsok nem mindegyik mutánssal adnak vadtípusú rekombináns utódot fág keresztezés során. A deléciós mutánssal nem rekombináló pontmutánsok jellemzője volt, hogy a genetikai térképen egymás szomszédságában helyezkedtek el — jelezve ezzel azt, hogy a deléciós mutánsban a DNS egy hosszabb szakaszát érinti a változás.



/ a deléciót vastagítva ábrázoltuk /

6. ábra

Benzer a deléciós mutánsokkal kizárásos „igen-nem" alapon működő abszolút felbontású rekombinációs rendszert és elvet dolgozott ki. A „Genetikai analízis" című cikkben majd mélyebben megismerhetjük a deléciós térképezés elveit, most inkább a végeredményre, és a megoldásra térnék ki.

Az rII finomtérkép

Benzer első célja annak megállapítása volt, hogy hány különböző pszeudo allél tartozhat egyetlen génhez. Ezt a célt az *rII* gén lehető legrészletesebb, tovább nem részletezhető, abszolút felbontású genetikai térképének elkészítésével gondolta elérni. Először néhány pontmutánssal egyszerű térképet szerkesztett. Elfogadva, hogy a genetikai térkép helyesen tükrözi a mutációk valódi helyzetét (az ún. kolinearitási tétel), az ismert pontmutánsokkal ismeretlen deléciós mutánsokat jellemzett. A deléciós mutánsokkal ezután szegmentekre osztotta a géntérképet. A szegmentet mindig két, egymással részlegesen homológ (átfedő) deléciós mutáns definiálja: egyformán orientált kromoszómák esetén az a DNS szakasz, illetve ennek megfelelője a géntérképen, amely a két deléció egyik végét mint különbség jellemzi (6. ábra).

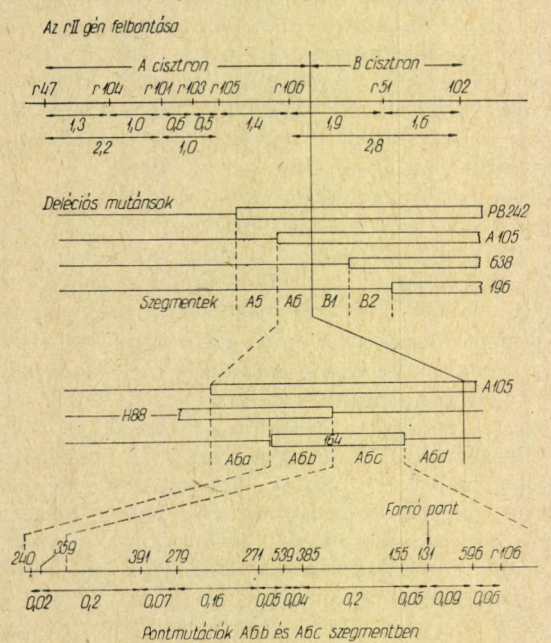
Az ismert deléciókkal 1609 függetlenül izolált pontmutánst térképeztek első lépésben úgy, hogy besorolták őket 47 szegmens valamelyikébe. A legutolsó lépés ismét a rekombinációs gyakoriság alapján működő, relatív távolságot meghatározó, két pontos keresztezés volt. Erre azonban csak a közös szegmensbe sorolt mutációk térképhelyzetének megállapításakor volt szükség, mivel a szegmensek sorrendjét a deléciós mutánsok pontosan meghatározták.* Belátható, hogy a távolságot meghatározó két pontos keresztezési módszer 1609 mutánssal kivihetetlen lett volna, hiszen a pontmutánsok páronkénti térképezése minimálisan 1 300 000 keresztezéssel oldható meg. A részletes géntérkép azt mutatta, hogy az *rII* génben legalább 250 olyan hely van, amelynek változása látható mutációt okoz, azaz *rII* fenotípust. Vannak pontok, amelyek különösen érzékenyek a változásra, ezeket Benzer „forró helynek" nevezte. Némely forró helyen százszor olyan gyakran fordul elő mutáció, mint egy másik mutábilis ponton. Valószínűsíteni lehetett, később bizonyítani, hogy a legközelebb fekvő mutációk szomszédos bázispárokat érintenek. A bizonyítások egyikét a pszeudo allélekkel kapcsolatban már ismertettük, amikor a triptofán információ csakis szomszédos bázispárok között fellépő crossing-overrel keletkezhetett, (l. 3. ábra). Benzer közelítő számítása a következőkön alapult: a *T4* fág kromoszómája 2×10^5 bázispár, a géntérkép hossza 1500 térképegység, a legtávolabb fekvő mutációk távolsága *rII* géntérképén 10 térképegység.* Ebből következik, hogy az *rII* gén hossza kb. 1300 bázispár, ami

* A genetikai analízis c. megjelenendő cikk áttanulmányozása után.

** 1 térképegység = azon két mutáció távolsága, amelyek között 1% gyakorisággal keletkezik rekonbináns.

annyit jelent, hogy a rekombináció gyakorisága szomszédos bázispárok között 8×10^{-5}. A legkülönbözőbb szegmensekben megfigyelt minimális rekombinációs gyakoriság 2×10^{-4} volt, annak ellenére, hogy a rendszer akár ezerszer alacsonyabb gyakoriság kimutatására alkalmas. Ez az érték DNS bázispárra számolva: <3. Meg kell jegyezni, hogy a számítás azon a feltételezésen alapul, hogy a genetikai térkép méretarányosan tükrözi a tényleges gént, a rekombináció valószínűsége a gén bármely pontján azonos, s így a rekombinációs gyakoriság szigorúan egyenesen arányos a távolsággal.

A gén funkcionális oszthatóságát is ezen a rendszeren sikerült bizonyítani a cisztron felfedezésével. A géntérképet a szegmensektől és a rekombinációs gyakoriságtól függetlenül, a mutánsok közötti komplementáció alapján két nem átfedő félre lehetett vágni: *A* és *B* cisztron. Bármely mutáció, amely kizárólag *A* cisztront érinti, komplementál bármely kizárólagos *B* cisztronbeli mutánssal és viszont. Ugyanakkor *A* vagy *B* cisztronon belül fekvő két mutáns nem komplementál. Benzer mindezt rendkívül gyors és egyszerű kísérletekkel tudta eldönteni: a mutánsokból páronként keveréket készített és *K 12* (λ) baktérium pázsitra cseppentette. Ha a keverék elpusztította a pázsitot, átlátszó foltot tapasztalt (lizis folt), amely fág szaporodásra utalt, a két mutáns komplementálta egymást. Bizonyította ezt, hogy lizis foltból sohasem vadtípusú rekombinánst, hanem az eredetileg felcseppentett két mutánst nyerte vissza. A lizis folt elmaradása jelzi, hogy nincs komplementáció a keveréket alkotó két mutáns között.



7. ábra 131 mutáns helyén 20—100-szor gyakrabban fordul elő mutáció mint a többi ponton
240 és 359 mutáns között az ismétlődő minimális rekombinációs gyakoriság figyelhető meg — feltehetően szomszédos nukleotidok között.
A számok a rekombinációs gyakoriságot (R) fejezik ki százalékban R = 1% = 1 térképegység
A rekombinációs gyakoriságok alapján történő géntérképezés biztonságát másutt tárgyaljuk.

Az *rII* gén részletes térképének és a komplementációs adatok birtokában kimondhatjuk, hogy a cisztron a gén meghatározott, kontinuus területét jelenti, amely funckionális egység: egyetlen polipeptid lánc kód-sorrendje. Konkrét esetben ez *A* és *B* polipeptidet jelentett. A gén és a géntérkép közötti megfelelésből következik, hogy a cisztron kontinuitása és integritása a géntérképen is érvényesül, azaz a géntérkép megadott pontja sohasem tartozhat egyszerre két cisztronhoz, cisztronok közötti átfedés elképzelhetetlen.

A cisztront kicsiny rekombinációs gyakoriságok jellemzik, amely a teljes kromoszómához viszonyított kis méretéből következik.

Az egér T génje

Az egerek több olyan mutánsát ismerjük, amelyek az egyedfejlődésben károsodnak. Egyik csoportjukra jellemző, hogy a középső csíralemez, valamint a gerincoszlop differenciálódása tökéletlen, mégpedig az egyes mutánsokra jellemző módon, az egyedfejlődés meghatározott pontján. A mutációk, amelyek jelenlétére a farok fejlettségéből lehet következtetni a IX. kromoszóma géntérképén a *T* helyet (lókusz) foglalják el, magát a gént is *T* génnek nevezik. Mivel az egér nem *T4* fág, az *rII*-höz hasonló finom felbontású térkép elkészítése a gyakorlatban megoldhatatlan. A *T* lókuszt ezért egyetlen ponttal jelöljük a géntérképen, nem feledve, hogy mindezt kísérleti rendszerünk „csiszolatlanságából" ered. A *T* lókusz, *T* gén után a rendszer egyik gyakorlatilag is fontos mutációját *T*-vel jelölik. *T*/*T* homozigóta egyed az embrionális fejlődés 11. napján elpusztul, T/T^+ heterozigóta életképes, de farka rövid — *T* mutáció tehát domináns pleiotróp hatással rendelkezik. t^0, t^9, t^{12}, t^{14}, és még sok más „*t* mutáció" homozigóta formában halálos, ugyanakkor t/t^+ heterozigóta életképes és farka sem rövid. *t* jelenlétét a *T*/*t* dupla heterozigóták közvetlenül mutatják: farkatlanok.

Valamennyi *t* mutánsból képzett kettős heterozigóta (pl.* t^0/t^{12}) életképes. Nem feledve *rIIA* és *B* cisztront, a *T* gén esete pontosan beleillik a kialakult „világképbe". A gén normális feladata a gerinchúr, gerincoszlop szöveti differenciálása, amely nagyszámú lépésből áll. Ezeket a lépéseket több cisztron irányítja, s ezen cisztronokat t^0, t^{14}, *T*, stb. mutációk jeleznek. A cisztronok egymás mellett helyezkednek el a kromoszómán, s együttesen alkotják a *T* gént. Bizonyítja fentieket, hogy bármely két mutánsból képzett heterozigóta életképes: a mutációk komplementálnak. Az ellentmondások feloldhatók: nem olvashatunk két olyan független mutánsról, amelyek azonos cisztront jelöznek, tehát nem komplementálnak. Ennek oka lehet véletlen, például az, hogy a *T* gén néhányszor több

* $t^0/t^{12} = t^0t^{12+}/t^{0+}t^{12}$

cisztronból áll, mint ahány mutánst ismerünk. Másrészt két nem komplementáló mutáns különbözőségét igazolni lehetetlen, hiszen a heterozigóta embrió elpusztul, utódjait, így a rekombinánsokat, megfigyelni nincs mód.

Az ellensúlyozott letalitás

A címben említett jelenség szintén a cisztron, illetve komplementáció megnyilvánulása. Két különböző cisztront érintő halálos mutáció transz helyzetben a nemzedékek végtelen során át tisztán fenntartható. Előző példánkra hivatkozva a T/t^0 heterozigóta egerek egymás között keresztezve (beltenyésztve) mindig ugyanilyen genotípusú utód populációt hoznak létre, mivel a homozigóta kombinációk életképtelenek. Nem kerültünk tehát szembe Mendel II. törvényével, mégis tisztán tenyésző heterozigóta populációval van dolgunk.

Az ellensúlyozott letális rendszerben fontos követelmény a rekombináció kizárása, jelen példában T^+t^{0+} gaméta képződése, mivel a vadtípusú gaméta bármely mutánssal kombinálva életképes zigótát hoz létre. A rekombináció a T génben elhanyagolhatóan kicsi, mivel az egyes cisztronok rendkívül közel fekszenek egymáshoz. Ha a cisztronok távol esnek egymástól, a rekombinációt más módon kell kizárni, — az ún. balancer kromoszómával.

Az ellensúlyozott letalitás lényege minden esetben azonos: a két halálos mutációt transz helyzetben hordozó kromoszóma pár a rekombináció kizárásával változatlanul megőrizhető végtelen számú generáció után is, mivel a komplementáció biztosítja a heterozigóták életképességét.

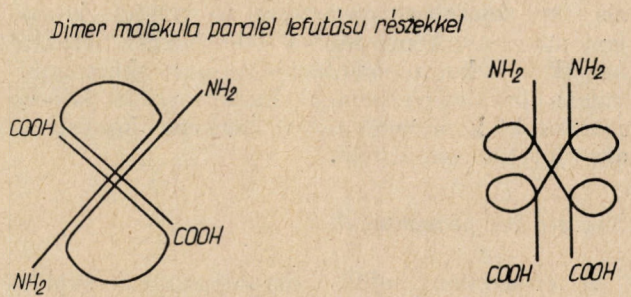
A cisztron és a pozícióeffektus

A pozícióeffektus gyűjtőfogalom, annyit jelent, hogy az allél fenotípus hatása függ az allél helyzetétől. A „Benzer előtti időben" éppen a cisztron definiálatlansága miatt magyarázhatatlan volt az az eset, amikor a cisz- és a transz heterozigóták fenotípusa különbözött. Számos példa közül emeljük ki a muslica* rombusz alakú szemének esetét: lz^+ allél homozigóta és heterozigóta állapotban kerek szemalakot biztosít. lz^{46}, lz^8 allélek homozigóta állapotban rombusz alakú szemet határoznak meg. lz^{46} — lz^8 távolsága a genetikai térképen 0,06 térképegység, azaz 0,06% közöttük a rekombináció gyakorisága. A cisz heterozigóta kerek szemű normális, a transz heterozigóta rombusz szemű mutáns. lz^{46} és lz^8 tehát nem komplementálnak — egyazon cisztronban fekszenek.

Inter-allélikus komplementáció

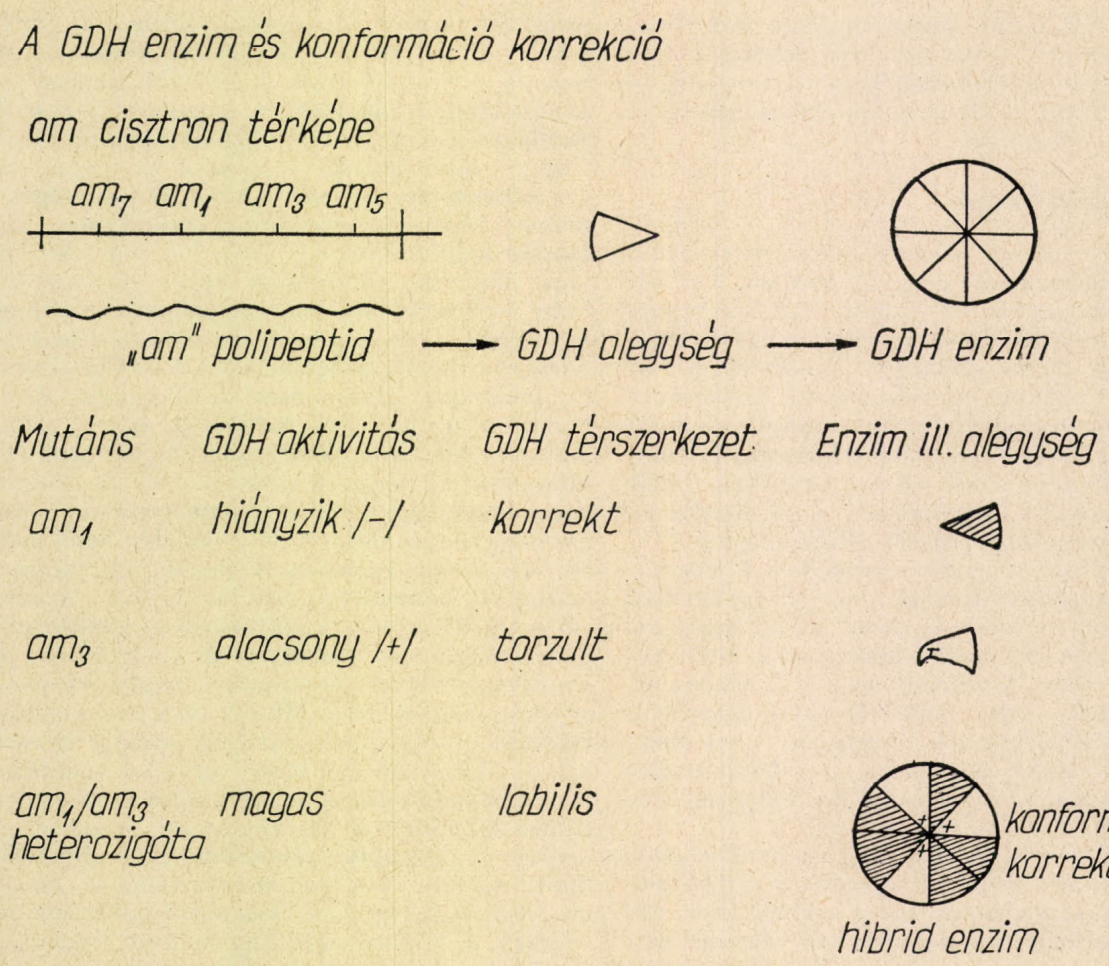
Az elnevezés jelzi, hogy egyazon cisztront érintő mutánsok komplementációjáról van szó. Az ellentmondás látszólagos, a cisztranssz szabály megsértéséről szó sincs. A kategórikus kijelentést jórészt J.R.S. Fincham munkásságának köszönhetjük. Számos enzimről tudjuk, hogy több, azonos polipeptid láncból, alegységből, monomerből épül fel. Az alegység önmagában biológiailag inaktív. A cisztron — mint láttuk — egyetlen polipeptid láncot határoz meg — jelen esetben az alegységet. A mutáció is az alegységet érinti elsődlegesen. „Szerencsés kombinációban" előfordul, hogy két mutáns alegység biológiailag aktív enzimet hoz létre — transz heterozigóta állapotban komplementálnak, noha egyazon cisztronban fekszenek. Klasszikus példát szolgáltatnak a *Neurospora crassa* (tömlősgomba) glutaminsav dehidrogenáz (*GDH*) mutánsai. Az am_1 jelű mutáns és az am_3 jelzésű mutáns például komplementál és a *GDH* enzim aktivitása eléri a vadtípusú aktivitás 10%-át. A hibrid enzim éppen úgy nyolc alegységből épül fel, mint a normális, de az alegységek molekulán belül kétfélék, am_1 és am_3 típusúak. A jelenség magyarázatát a fehérjék térszerkezetében kell keresni. A mutáció a DNS-ben kódolt információt megváltoztatja, de a kettőscsavar térszerkezetét sohasem. Egyetlen bázispárt érintő pontmutáció a géntérképen is egyetlen ponttal vetül. Mindez nem igaz a mutáns fehérjére — egyetlen aminósav cseréje gyakran kihat a környező „hibátlan" aminósavmaradékok térbeli elrendezésére. A mutáció hatása nem ponttal, hanem kiterjedéssel, pl. szakasszal, jellemezhető, amikor a polipeptid térszerkezetében gondolkodunk. Az inter-allélikus komplementáció mögött az alegységek egymást kiegészítő kölcsönhatása rejtőzik. A kölcsönhatás leggyakoribb formája az ún. *konformáció korrekció*. Nagyon általánosan ez annyit jelent, hogy az egyik alegység korrekt térszerkezetű része helyes térszerkezetet „kényszerít" a szomszédos alegység torz részére. Belátható, hogy a korrekció akkor kölcsönös, ha a két alegység torzult részei között átfedés nincs. Nyilvánvaló az is, hogy szigorú térszerkezeti korlátai vannak a korrekciónak, így az inter-allélikus komplementációnak is: csakis az alegységek paralel helyzetű részei között képzelhető el (8. ábra).

GDH példánkban például az am_1 mutáns jó térszerkezetű, de hibás aktív centrumot hordozó alegységet határoz meg. Az am_3 mutáns alegység térszerkezete torz, ennek következtében az aktív centrum működése is gátolt. Az am_1/am_3 hibrid enzimben a helyes térszerkezetű alegység helyes



8. ábra

* muslica: Drosophila melanogaster a genetikusok „Szent" állata.



9; ábra

alakzatra „préseli" a hibátlan aktív centrummal rendelkező alegységet. A várakozásnak megfelelően a hibrid enzim aktivitása akkor nagyobb, ha am_1 alegység részaránya nagyobb (9. ábra).

Az inter-allélikus komplementáció azonban mindig a mutánsok egy csoportjára és azon belül is csak bizonyos párokra teljesül.

A komplementációs csoport fogalmát eszerint így definiálhatjuk: mindazon mutánsok csoportja, amelyek közül bármelyiket kiemelve, a maradékban mindig találunk a kiemelttel nem komplementálókat, mindez a maradék mutánsok mindenkori csoportjára folyamatosan igaz. A genetikai analízis című fejezetben részletesen ismertetett komplementációs térképre utalva a fentiekhez hozzátehetjük — a komplementációs csoport akkor equivalens egyetlen cisztronnal, ha a csoportot képező mutánsok komplementációs térképe kontinuus, azaz folytonosan átfedő.

Negatív komplementáció

A cisztronon belüli komplementáció sajátos esete e jelenség. A mutáns és a vadtípusú allélből képzett heterozigóta fenotípusa köztes. Különösen akkor szembeötlő a jelenség, amikor a mutánsok döntő többsége recesszív a vadtípusú alléllel szemben. Elsősorban akkor figyelhető meg a negatív komplementáció, amikor a mutáns allél termékéből (alegység) valamilyen oknál fogva több termelődik, mint a vadtípusú alegységből. A jelenséget úgy magyarázhatjuk, hogy a „rossz" alegység túlsúlya miatt döntően hibrid fehérje keletkezik, amely viszont a hibátlanhoz képest csökkent működésre képes csupán. Érdemes azon elgondolkozni, hogy van-e korreláció az enzimet alkotó alegységek száma és a negatív komplementáció mértéke között.

A címoldal magyarázata:

Petricsészében, szilárd, átlátszó táptalaj felületén E. coli baktérium pázsit képződött. A pázsitra az E. coli egyik specifikus vírusát, λ fágot tartalmazó szuszpenziót cseppentettek.

A látható kép 42 °C-on 8 óra elteltével alakult ki. A λ fág „C" cisztronjai 3 polipeptid láncot határoznak meg (CI, CII, CIII). A három fehérje együttes működése biztosítja, hogy a fág nem minden baktériumot pusztít el közvetlenül a fertőzés után, hanem a megtámadott sejtek ~30%-ában átlagosan 15—20 baktérium generáción keresztül önmagát „féken tartva", lappang. Az „önszabályozást" CI cisztron fehérje terméke, a represszor molekula tartja fenn. CI cisztron működését azonban CII és CIII cisztronok fehérje terméke indítja be.

A λ fág vad típusa (C^+) közepén zavaros lízis foltot képez a „pázsiton" éppen az életben maradt baktériumok miatt. A C mutáns lízis foltja átlátszó, mivel „önszabályozásra" képtelen mindent elpusztít.

A képen CI és CII típusok komplementációja látható. Balról jobbra haladva — a címképen a nyil irányát követve — a lízis folt a következő fágokat tartalmazza:

„a" szülő	„a+b" keverék	„b" szülő
1. sor CI HA1	CI HA1 + CI HA1	CI HA1
2. sor CI HA1	CI HA1 + CI HA8	CI HA8
3. sor CI HA1	CI HA1 + CI HA13	CI HA13
4. sor CI HA1	CI HA1 + CII HA6	CII HA6
5. sor CI HA1	CI HA1 + C^+	C^+

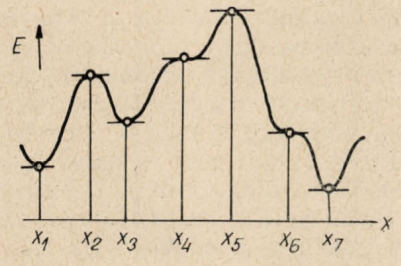
A bekeretezett keverék a vadtípusra jellemző zavaros foltot képzett (l. 5. sor 3. folt), ami azt mutatja, hogy CI és CII mutánsok komplementálnak, azaz CI és CII mutáció más cisztront így más fehérjeláncot érint. Az is nyilvánvaló, hogy CI mutánsok (HA1, HA8 HA13 pszeudo allélek) egyazon cisztronba sorolhatók — a keverék „fenotípusa" átlásszó, mutáns. Mivel C^+ dominál CI mutáns alléllel szemben ($C^+ > CI$), keverékük fenotípusa (5. sor 2. folt) a C^+-hoz hasonlóan zavaros. A CI típusú lízis folt közepén látható apró pettyek a fágrezisztens baktériumok apró telepei. A fágrezisztens baktérium fellépésének gyakorisága 10^{-5}—10^{-7} per generáció. A felvétel Orosz László diplomadolgozatából való. (ELTE TTK 1966.)

KATASZTRÓFAELMÉLET

Forgács Gábor
Központi Fizikai Kutató Intézet, Budapest

A természetben két általános folyamattípust különböztetünk meg: a folytonos (kontinuus) vagy „sima" folyamatokat, mint például a bolygók mozgása vagy elektromos áram folyása vezetékben; és a nem folytonos (diszkontinuus) vagy „hirtelen" folyamatokat, mint például a sejtek öngerjesztett osztódása növekvő biológiai szövetben. A folytonos folyamatokat könnyen megérthetjük a Newton és Leibniz által mintegy háromszáz évvel ezelőtt kifejlesztett matematikai módszerek segítségével. Olyan elméletet, amely a nem folytonos folyamatok megjelenését megjósolni képes mindezideig nem sikerült felállítani. Most azonban úgy tűnik, hogy egy ilyen elmélet születőben van René Thom francia matematikus legutóbbi munkásságának eredményeképpen. Thom művét azért nevezik katasztrófaelméletnek, mert olyan jelenségeket képes leírni, melyeknél valamely viselkedés hirtelen teljesen más viselkedésbe „ugrik át". Az elméletet, melyet sokan „intellektuális forradalomnak" tekintenek a matematikában, mind a társadalomtudományok, mind a természettudományok területén alkalmazni lehet.

A katasztrófaelmélet a matematikának azon ágához tartozik, melyet topológiának nevezünk. A topológia segítségével a jelenségek nemcsak numerikusan, hanem „vizuálisan" is vizsgálhatók. A katasztrófaelmélet szerint a nem folytonos eseményeket bizonyos geometriai formákkal lehet reprezentálni. A vizsgált rendszer viselkedését az E „energiafüggvény" határozza meg (ez nem okvetlenül a rendszer aktuális fizikai energiáját jelenti, de jelentheti természetesen azt is). A rendszer stabil egyensúlyi állapotba igyekszik jutni.



1. ábra

Ha az egyszerűség kedvéért feltételezzük, hogy a rendszert egy változóval írhatjuk le, és ez a változó x, akkor ábrázolhatjuk az $E(x)$ függvényt. Egy tipikus esetben valami olyat kapunk, ami az 1. ábrán látható.

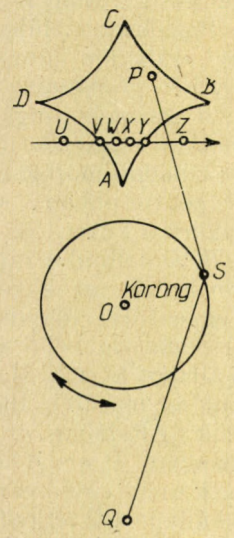
Az egyensúlyi állapotok az E „stacionárius" értékeinek felelnek meg, vagyis azon x értékeknek, melyeknél $E(x)$ párhuzamos az x tengellyel (azaz az $E(x)$ x szerinti differenciálhányadosa zérus). Az 1. ábrán hét egyensúlyi állapotot láthatunk: x_1, x_3, x_7 minimumnak, x_2, x_5 maximumnak, x_4 és x_6 pedig inflexiós pontnak felel meg. A minimumok stabil egyensúlyi állapotokat jelentenek. Ha egy ilyen állapotból kicsit kitérítjük a rendszert, akkor az bizonyos idő múlva vissza fog abba térni. A maximumok és az inflexiós pontok különböző nem stabil állapotoknak felelnek meg. Fizikai rendszer esetén a stabil egyensúlyi állapotok — az energiaminimumok — a legfontosabbak.

Katasztrófagép

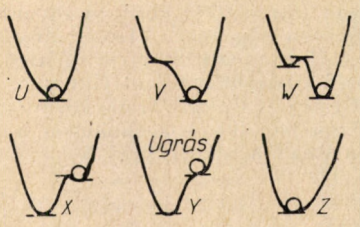
Az elmondottak és a továbbiak egyszerűbb megértése érdekében vizsgáljuk meg az úgynevezett Zeeman-féle katasztrófagépet (1). Ez nem más, mint egy függőleges felületre felerősített, középpontja körül szabadon elforgatható korong, melynek széléhez két gumiszalag van ragasztva (2. ábra). Az egyik szalag koronghoz nem ragasztott végét a Q pontban rögzítjük, míg a másik szalag P végpontja szabadon mozoghat a korong síkjában. Ha a P végpontot ebben a síkban folytonosan mozgatjuk, akkor a következő tulajdonságokkal rendelkező $ABCD$ deltoidot rajzolhatjuk meg: ha P az $ABCD$-n kívül van, akkor a korongnak csak egy stabil egyensúlyi állapota van, míg ha P az $ABCD$ tartományon belül van, akkor két stabil egyensúlyi állapot létezik. Ha P folytonosan változik, a korong egyensúlyi állapta is előbb-utóbb megváltozik. Általában ez a változás is folytonos. Ha azonban P az $ABCD$ tartomány határát metszi, a korong egyes esetekben egy bizonyos egyensúlyi állapotból teljesen másik egyensúlyi állapotba ugrik. Például ha P az $UVWXYZ$

vonal mentén változik (2. ábra), a hirtelen ugrás akkor következik be, amikor P eléri az Y pontot és ott elhagyja az $ABCD$ tartományt (de semmiféle hirtelen változás nem következik be a V pontnál, ahol P belép az $ABCD$ tartományba). Még érdekesebb jelenség következik be, ha P a fordított irányba mozog: a korong ismét „ugrik" amikor P elhagyja a deltoidot, de ez most a V pontnál következik be, vagyis ha P trajektoriájának irányát ellenkezőjére változtatjuk, a korong viselkedése is az előzőekhez képest ellenkezőjére változik. Hogy megértsük ezt a viselkedést, tekintsük az E energiafüggvényt. E most a gumiszalagok rugalmas energiáját jelenti. Az E függvény a 3. ábrán látható. A deltoidon kívül az U és Z pontokban egy-egy minimum van. Belül, a W és X pontokban két-két minimum van, melyek egy maximumot zárnak közre. A V és Y pontokban az egyik minimum egybeesik a maximummal és így inflexiós pont alakul ki. A deltoidon kívül azonban ez az inflexiós pont azonnal eltűnik. Ahogy P az U pontból a Z pont felé halad, a korong a kezdeti minimumhelyzetben marad (a „súrlódás" miatt) mindaddig, amíg P el nem éri az Y pontot. Az Y pontban a kezdeti minimum eltűnik, és a korong kénytelen az egyetlen megmaradt minimumhelyzetbe ugrani, amely azonban bizonyos távolságra van az inflexiós ponttól. A fent elmondottakat geometriailag is ábrázolhatjuk, mégpedig úgy, hogy az x egyensúlyi állapotokat a P pont függvényében vesszük fel. A matematikai analízis a 4. ábrán látható felületre vezet. Az ábrán látható gyűrt felület pontjai tehát az egyensúlyi állapotokat jelentik.

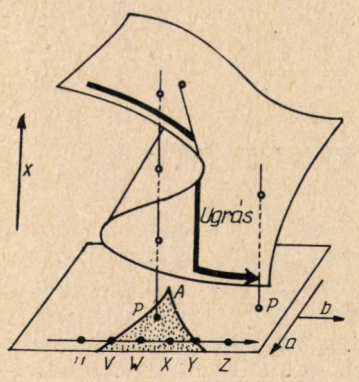
A P pont $(a \cdot b)$ koordinátákkal megadott helyzetében húzzunk merőleges vonalat a P értelmezési síkjára. Ez a felületet több pontban metszi, melyeknek függőleges koordinátája (magassága) az x egyensúlyi állapotoknak felel meg. Ha P a pontozott tartományon kívül esik, akkor x-nek csak egy lehetséges értéke van. Ha P a tartomány belsejében van, akkor a felület gyűrtsége miatt



2. ábra



3. ábra



4. ábra

három érték lehetséges: egy a felső lapon, egy a középsőn, egy pedig az alsón. A pontozott tartomány a 2. ábrán látható $ABCD$ deltoid A pont körüli részét mutatja (megfordítva). Ha P az $UVWXYZ$ vonal mentén mozog, akkor áthaladva a V ponton nem történik semmi egészen az Y pontig. Az Y pontban a felső lap legyűrődik, és a korong hirtelen a felső lapról az alsó lapra „ugrik". Az, hogy a fenti jelenség geometriailag éppen a 4. ábrán látható felülettel reprezentálható, és hogy ez a felület valóban az összes lehetséges ugrást tartalmazza, Thom tételének következménye.

Thom tétele

Thom a fentieknél általánosabb szituációt vizsgált. Azokat a rendszereket tekintette, melyek viselkedése az $x, y, z, \ldots$ változók véges halmazával írhatók le. Ezek a változók ugyanakkor függvényei az $a, b, c, \ldots$ úgynevezett kontrollváltozóknak (ezek halmaza is véges; azért nevezzük őket kontrollváltozóknak, mert mintegy „kontrollálják", szabályozzák a rendszer viselkedését). A rendszer E energiafüggvénye mind az $x, y, z, \ldots$, mind pedig az $a, b, c, \ldots$ változóknak függvénye (a tétel pontos megfogalmazásában az E függvényre még egyéb, az általánosságot nem nagyon sértő tulajdonságokat is fel szoktak tételezni (3), mivel azonban mi a bizonyítás részleteivel úgysem kívánunk foglalkozni, ezen tulajdonságok ismertetését mellőzzük). Fix $a, b, c, \ldots$-re a rendszer az $x, y, z, \ldots$ változók különböző egyensúlyi értékeit veheti fel, melyek viszont az E energiafüggvény stacionárius értékeinek felelnek meg. A kérdés az, hogy ha $a, b, c, \ldots$-t változtatjuk a rendszer egyensúlyi

helyzetei között miféle átmenetek, „ugrások" következhetnek be. A tétel pontos megfogalmazása és állításai, valamint bizonyítása (ez mindegy ötven oldalt tesz ki) megtalálhatók a (2) hivatkozásban.

Az előzőekben bemutatott katasztrófagép esetében x a korong helyzetét meghatározó változó (például a *QOS* szög nagysága), (a, b) a P szabad vég helyzetének koordinátái. Az ugrások geometriáját a 4. ábra szemlélteti. Ha az E energiafüggvényt másképpen választjuk (de a fentiekben megadott kritériumok alapján), akkor hasonló geometriát kapunk. Thom megmutatta, hogy az egyensúlyi helyzetek közötti ugrások meghatározása a 4. ábrán látható geometria (pontosabban topológia) tanulmányozására vezethető vissza.

A továbbiakban tételezzük fel, hogy a kontrollváltozók csak kicsit változnak, mégpedig reverzibilis módon. Ez szokásos egyszerűsítő feltételezés a matematikában, és annak felel meg, hogy ugyanazon fizikai állapothoz különböző fizikai változókat választhatunk. Mivel minden tér-időben történik, válasszunk legfeljebb négy kontrollváltozót. Legyenek ezek a, b, c, d. A viselkedést leíró $x, y, \ldots$ változók számát nem korlátozzuk. Thom tétele szerint, bizonyos kivételektől eltekintve (melyek azonban rendkívül ritkák, és így nulla mértékű halmazt képeznek) a kontrollváltozók sima, reverzibilis megváltozása mindig megválasztható úgy, hogy adott pont környezetében a rendszer hét lehetséges viselkedés egyikét mutassa. Ez a hét viselkedés a hét elemi katasztrófa, melyeknek az angol nyelvű irodalomban elterjedt megnevezése, és a hozzájuk tartozó energiafüggvények az alábbi táblázatban vannak feltüntetve.

Katasztrófa	Energia függvény						
Fold	$\frac{1}{3}x^3$	$+ a\,x$					
Cusp	$\frac{1}{4}x^4$	$+ \frac{1}{2}ax^2$	$+ bx$				$(\pm)$
Swallowtail	$\frac{1}{5}x^5$	$+ \frac{1}{3}av^3$	$+ \frac{1}{2}bx^2$	$+ cx$			
Butterfly	$\frac{1}{6}x^6$	$+ \frac{1}{4}bx^3$	$+ \frac{1}{3}cx^3$	$+ \frac{1}{2}cx^2$		$+ dx$	$(\pm)$
Hyperbolic umbilic	x^3	$+ y^3$	$+ ax$	$+ by$		$+ cxy$	
Elliptic umbilic	x^3	$- 3xy^2$	$+ ax$	$+ by$		$+ c(x^2+y^2)$	
Parabolic umbilic	$x^2\,y$	$+ y^4$	$+ ax$	$+ by$	$+cx^2 + dy^2$		$(\pm)$

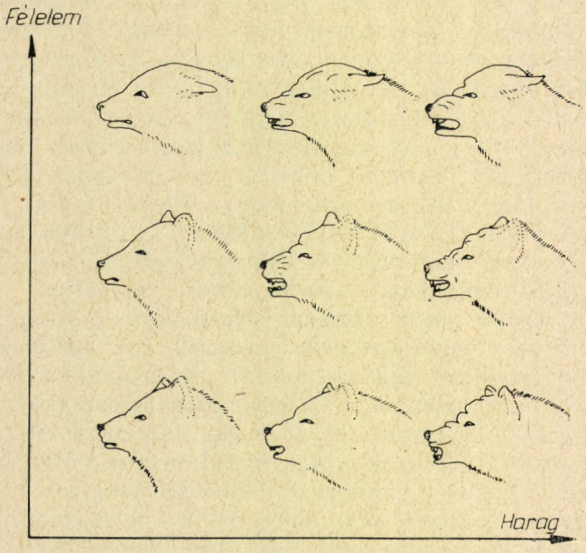
Természetesen, ha a kontrollváltozók számát növeljük, az elemi katasztrófák száma nő. Ha kezdetben négy kontrollváltozót használunk, akkor minden egyes újabb kontrollváltozó bevezetésével az elemi katasztrófák száma eggyel nő (3). Az elemi katasztrófák egyik fontos tulajdonsága az úgynevezett strukturális stabilitás. Ez durván azt jelenti (egyébként semmi köze sincs az egyensúlyi állapot stabilitásához), hogy az energiafüggvény kis perturbációinak hatására a katasztrófaelmélet által jósolt geometria nem változik. Ez a különböző fizikai rendszerek leírása szempontjából azért fontos, mert minden olyan jelenség, mely elegendő szabályossággal lép fel ahhoz, hogy felismerhető legyen, kell, hogy kis, mindig jelenlevő perturbációkkal szemben bizonyos stabilitást mutasson. Jelen pillanatban éppen a strukturális stabilitás az, ami a katasztrófaelmélettel kapcsolatban leginkább adhat okot optimizmusra.

Talán az eddig elmondottakból is kiderül, hogy a katasztrófaelmélet adott formájában a jelenségek inkább kvalitatív, mindsem kvantitatív leírására alkalmas. Segítségével a jelenségeket bizonyos geometriai (topológiai) struktúrák alapján osztályozhatjuk. Ezen geometriai struktúrák lehetőséget adnak arra, hogy vizuálisan érzékelhessük hogyan vezethetnek folytonos erők (a katasztrófagép esetében az A pont körül a Hook törvénynek eleget-tevő rugalmas erők) „katasztrófákhoz", melyek a geometriai (topológiai) ábrázolásban az energiafüggvény szingularitásainak felelnek meg. Hogy mit jelent az, hogy az elmélet csak kvalitatív leírást ad, azt ismét egy, a fizikából vett jólismert példával világíthatjuk meg. Ismeretes, hogy bizonyos mennyiségek változtatásával elsőrendű fázisátalakulások másodrendűbe mehetnek át. A másodrendű fázisátalakulásokat másképpen kritikus jelenségeknek nevezzük. Így például a hőmérséklet változtatásával (és következésképpen a nyomás és a térfogat megváltozásával) az eleinte elsőrendű folyadék-gőz fázisátmenet, bizonyos kritikus pontban másodrendűvé válik. Hasonló példa a para-ferromágneses átmenet bizonyos fémekben, mely akkor válhat másodrendűvé, ha a külső mágneses teret nullának választjuk. A kritikus pontban bizonyos mennyiségek (fajhő,

szuszceptiblitás) divergálnak. A divergencia mértékét az úgynevezett kritikus indexek adják meg, melyek tehát végsősoron arra jellemzők, hogy az adott mennyiség hogyan tart végtelenhez. A katasztrófaelmélet a kritikus pontban bekövetkező „katasztrófát" a fentiekhez hasonló geometriai képpel interpretálja. A kritikus pontnak például a 4. ábrán az *Y* pont felel meg. A kritikus index a felület *Y* ponthoz tartozó görbületével lenne kapcsolatos. A katasztrófaelmélet jelen állapotában azonban nem képes megadni a görbület értékét. Ehhez, a matematikusok eléggé egybehangzó véleménye szerint a rendszerek szimmetriatulajdonságainak leírására szolgáló csoportelméletnek és a katasztrófaelméletnek az összekapcsolására lenne szükség. Ezt a problémát mindezideig azonban nem sikerült megoldani.

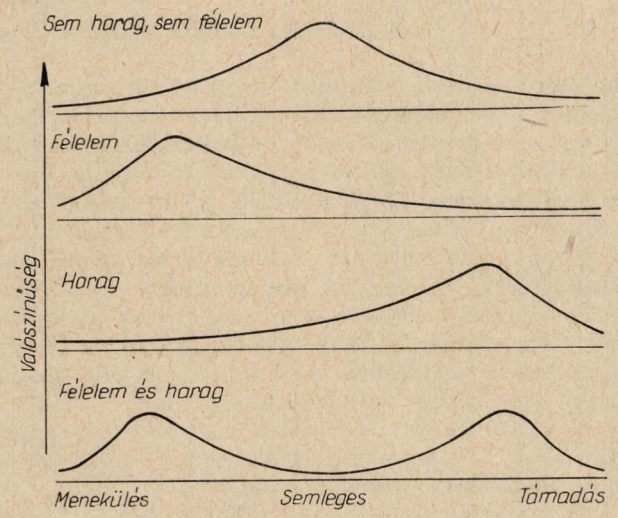
A katasztrófaelmélet alkalmazása

Thom tétele segítségével, melyet gyakran klasszifikációs tételnek is neveznek, számos jelenség „katasztrófagrafikonja" meghatározható, illetve a hirtelen bekövetkező változások könnyen megérthetők (legalábbis vizuálisan). Ezek a jelenségek tartozhatnak a biológia, fizika, statika, stb., tárgykörébe, de ugyanúgy számos társadalomtudományi probléma is értelmezhető. Az irodalomban számos kidolgozott példa található (4,3). Itt csak az egyik legegyszerűbb, de leggyakrabban megjelenő katasztrófatípust vizsgáljuk meg. Ez a cusp-katasztrófa. A fenti táblázatból kitűnik, hogy cusp-katasztrófa akkor léphet fel, amikor a rendszer viselkedése egy paraméterrel írható le, a kontrollváltozók száma pedig kettő. Vizsgáljuk meg, hogyan modellezhető a cusp-katasztrófa segítségével olyan tipikusan pszichológiai jelenség, mint az agresszió. Egyes pszichológusok szerint az agresszív viselkedést (természetesen meglehetősen leegyszerűsítve) két ellentétesen ható tényező



5. ábra

befolyásolja. Ezek a tényezők a félelem és a düh, melyek például kutya esetében bizonyos értelemben kvantifikálhatók is. Így a kutya dühének mértékét az határozhatja meg, hogy mennyire nyitott a szája, és mennyire vicsorít fogaival, míg félelmének mértékét abból olvashatjuk le, hogy menynyire állnak hátrafelé fülei (lásd az 5. ábrát). Ha elfogadjuk ezeket a tényezőket, vagyis a kutya arckifejezését emocionális állapotának jellemzőjeként, akkor vizsgálhatjuk hogyan változik a kutya viselkedése kedélyállapotának, hangulatának függvényében. Mindaddig, amíg a két tényező közül csak az egyik van jelen, viszonylag könnyű megjósolni a kutya viselkedését. Így például ha a kutyát felbőszítjük anélkül, hogy félelemérzetét növelnénk, előbb-utóbb várható, hogy valamilyen agresszív cselekmény, mint például harapás fog bekövetkezni. Ellenkező esetben, vagyis ha a kutyát úgy félelmitjük meg, hogy közben nem dühítjük, akkor a reakció előbb-utóbb elmenekülésben fog megnyilvánulni. De mi van akkor, ha a kutya dühös is, és ugyanakkor fél is? Bizonyos modellek, melyek képesek diszkontinuitásokat leírni, esetleg azt jósolhatják, hogy a két tényező közömbösíti egymást, és a kutya nyugalmi állapotban marad. Valójában ilyenkor éppen ez a legkevésbé valószínű. Ha a kutya dühös is és rémült is, akkor mindkét extrém viselkedési módusnak (harapás vagy támadás és menekülés) nagy a valószínűsége. A katasztrófaelmélet alapján felállított modell értelmezni tudja a 6. ábrán látható bimodális valószínűségeloszlást. Ezen túlmenően a modell, bizonyos feltételek mellett képes megjósolni a kutya várható viselkedését. Modellünkben most a két kontrollváltozó a düh és a félelem mértéke. Az ezek által kifeszített „tér" (most sík) a kontrolltér. Az *x* állapotváltozó (állapothatározó) most a kutya viselkedéséről ad számot. Az *x* tengelyt vegyük fel merőlegesen a kontrolltérre. Feltételezhetjük, hogy a lehetséges viselkedési módusok folytonos kontinuumot alkotnak. A legagresszívebb viselkedéshez tartozzanak a nagyobb *x* értékek, míg a kevésbé agresszív viselkedés feleljen meg a kisebb *x* értékeknek. A kontrolltér minden egyes pontjához tartozik legalább egy *x* érték. (Természetesen *x* az adott düh és félelem értékekhez tartozó legvalószínűbb viselkedési módusnak felel meg.) A kontrolltér legnagyobb részében *x* egyértékű függvénye lesz a kontrollváltozóknak. Thom tétele alapján azonban ez az egyértékűség nem állhat fenn a tér minden pontjában, mivel az „energiafüggvény" (ami most *x* valószínűségeloszlása) bimodális (2). Az állapotábra a már jólismert felülettel reprezentálható, amit a jobb szemléltetés kedvéért az utolsó ábrán bemutatunk. Az ábráról leolvasható, hogy a felület középső részénél, ahol a düh és félelem mértéke közelítőleg azonos, a kontrolltér egyes pontjaihoz három *x* érték tartozik. Egy a felső lapon, ami az agresszív reakciónak, egy az alsó lapon, ami az engedelmes viselkedésnek, és egy a középső lapon, ami a neutrális viselkedésnek felel meg. Vagyis a katasztrófaelmélet azt jósolja, hogy bimodális energia-



6. ábra

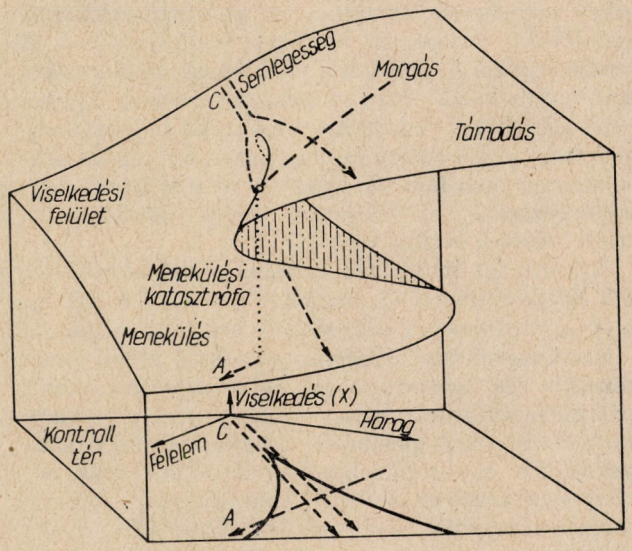
függvény esetén a stacionárius állapotok által kifeszített felület kétszeresen begyűrődött, mégpedig úgy, hogy a begyűrődés, a felület megfelelő irányában haladva szűkül, majd teljesen eltűnik.

Nézzük meg, hogyan jósolja meg a modell a kutya viselkedését, midőn a kutyát érő ingerek változnak. Tételezzük fel, hogy kezdetben a kutya emocionális állapota semleges, ami a kotrolltérben az origónak felel meg. Ha valamilyen inger következtében a kutya egyre dühösebb lesz, a félelemérzet erősödése nélkül, akkor az állapottérben a változás sima és az egyre agresszivabb állapotok irányába mutat. Ha a kutya megfelelően dühös, akkor támadni, és következésképpen minden bizonnyal harapni fog. Ha megfelelően agresszív állapot elérése után elkezdjük növelni a kutya félelemérzetét is, akkor az emocionális állapotot jellemző pont a kontrolltér középső részébe jut. Az x állapottérben a változás követi a kontrolltérbeli pont mozgását, de mivel a felület megfelelő részének meredeksége még kicsi, a kutya állapotában (viselkedésében) csak kis változás következik be (kevésbé ugat, hátrál, stb.) vagyis a kutya agresszív módusban marad. Ha azonban a félelemérzetet tovább erősítjük az x térben elérkezünk a begyűrődés által kialakított plató széléhez. Itt az állapotfelület azon része, melyen eddig haladtunk begyűrődik, a felső lap megszűnik, és így a kutya viselkedésében „ugrás" következik be. Az ugrás után a kutya egészen más viselkedést mutat. Tehát a model azt jósolja, hogy ha a megfelelően feldühített kutyát fokozatosan megfélelmítjük, akkor az előbb-utóbb abbahagyja a támadást és elmenekül. A viselkedésben bekövetkezett fenti változást nevezhetjük menekülési katasztrófának. Ha fordított irányban követjük végig a kutya viselkedését, illetve annak változását, akkor juthatunk el a támadási katasztrófához.

Végezetül nézzük meg mi történik, ha a kezdeti állapotban olyan ingerek érik a kutyát, melyek azonos mértékben növelik düh- és félelemérzetét. Amikor az x térben elérkezünk a begyűrődés kezdetéhez, a viselkedést megadó pont vagy a felső, vagy az alsó lapra kell hogy kerüljön. Az, hogy végül is milyen viselkedés következik be a kutya agyának közvetlenül a szinguláris pont előtti állapotától függ. A begyűrődés kezdete olyan értelemben szinguláris pont, hogy a kontrolltérben bekövetkező igen kicsiny változás hatására ekkor a végállapotban rendkívül nagy változás következhet be.

Természetesen a fenti modell nem ad választ arra, miért viselkedik így vagy úgy a kutya. A modell nem a viselkedés dinamikáját, hanem geometriáját (topológiáját) adja meg. A fenti kérdés megválaszolásához nyilván ismerni kéne a viselkedés dinamikáját, ami viszont a kutya agyállapotainak tanulmányozását igényelné. Ezzel kapcsolatos további részleteket az érdeklődő olvasó a (3)-as számú hivatkozásban talál.

A cusp-katasztrófa további alkalmazásaként a háború modelljét (3) (kontrollváltozók: veszély,



7. ábra

fenyegetés), a börze modelljét (4) (kontrollváltozók: ár, kínálat) és a szerelem modelljét (4) (kontrollváltozók: közeledés, távolodás) említhetjük meg.

Összefoglalásképpen azt mondhatjuk, hogy a katasztrófaelmélet nagyon fiatal ága a tudománynak, éppen ezért teljes gyakorlati hasznát (az eddigi nagyszámú alkalmazás ellenére is) csak az elkövetkező évek kutatásai tárhatják fel.

IRODALOM

1. T. Poston and T. Woodcock, Proceedings of the Cambridge Phylosophical Society, *74*, 217
2. The stability of unfoldings, Lecture Notes in Mathematics, *393*, Springer 1974
3. E. C. Zeeman, Scientific American *234*, 65 (1976)
4. I. Stewart, New Scientist *68*, 447 (1975)

KVANTUM—BIOFIZIKA

B. Pullman
Fizikai-Kémiai Biológia Intézete, Paris

Jövőre, 1977-ben, nagyobb jelentőségű tudományos esemény ötvenedik évfordulóját ünnepeljük: Heitler és London 1927-ben publikált elsőnek molekuláris rendszerre vonatkozó kvantummechanikai számítást. A hidrogénmolekulát tárgyaló híres cikk adta a kémiai kötés első elfogadható leírását. Ez a komoly teljesítmény annakidején nehéz, hosszadalmas számítások árán született meg.

A nevezetes esemény óta eltelt 50 év alatt — csakúgy, mint a tudomány és technika más ágaiban is — óriási haladást tapasztalhattunk. A kvantummechanikának nemcsak a fogalmai hatoltak be mélyen a molekulákkal foglalkozó tudományok minden ágazatába: manapság maguknak a számításoknak alkalmazása is óriási sok-elektron rendszerekre (egészen a biológiai molekulák méretéig) nemcsak lehetőség, hanem tény. A gyakorlati alkalmazhatóság szempontjából a fordulópontot természetesen a modern elektronikai számítógépek megvalósulása jelentette, bár a kvantummechanikai módszerek alkalmazása molekulaszerkezeti problémák, valamint biológiai molekulákkal és rendszerekkel kapcsolatos problémák megoldására már előbb kezdődött, természetesen csak egyszerűbb esetekben. A kvantum-biofizika és kvantumbiokémia (e két tudományágat ezen a fundamentális szinten nem kell, de gyakran nem is lehet megkülönböztetni) születésének idejét valójában a késői ötvenes évekre tehetjük.

A biofizika kvantummechanikai megközelítésének egyik alapvető és meglehetősen sajátos jellemzője az eredmények sokasága és sokoldalúsága. Az e munkaterületen alkalmazott összes többi megközelítés és metodika, pl. a röntgendiffrakciós kristályszerkezetelemzés, magmágneses vagy ibolyántúli színképelemzés, termodinamikai módszerek stb. a vizsgált bio-rendszereknek csak néhány — sokszor egyetlen — tulajdonságára vonatkozólag szolgáltat információt. Ezzel ellentétben a kvantummechanika — posztulátumainak, egyenleteinek és módszereinek fundamentális jellege miatt — a molekuláris valóság rendkívül nagyszámú aspektusáról képes érdemben nyilatkozni. Helyes vitel esetén a kvantummechanikai számítás képes lehet arra, hogy egyidejűleg sok, sőt igen sok molekuláris tulajdonságra vonatkozólag szimultán információt szolgáltasson, mely tulajdonságok kísérleti tanulmányozása különböző módszereket és felszereléseket igényelne. Így például megfelelően programozott számítás közvetlen és szimultán módon kapott eredményeként információ nyerhető preferenciális konfigurációkról, asszociált dipólnyomatékokról (érték és irány szerint), asszociált ibolyántúli színképekről (sávok várható helye, intenzitása, polarizációja), asszociált ionizációs potenciálokról, elektronaffinitásokról stb. Külön előnynek, mégpedig nézetem szerint lényeges és csak a kvantummechanikai számítási módszerekre jellemző előnynek tekintem, hogy nem létező szerkezetek és szituációk tanulmányozását is lehetővé teszi, ami pedig gyakran elősegíti a létező szerkezetek és szituációk jobb megértését. „Hátránya" viszont a dolgok ezen állásának, hogy a munkaterület kutatói elvárják a kvantum-biofizikustól, hogy minden problémájukra és kérdésükre választ tudjon adni, méghozzá gyakran azonnali választ. Hadd tegyem hozzá, hogy amennyiben erre nem képes, ezért inkább őt kell hibáztatni, nem pedig a kvantummechanikát.

A továbbiakban — röviden és erősen összevont formában — a kvantum-biofizikai kutatás néhány főbb vonalát szeretném vázolni.

Az alapvető lépés, amely előfeltétele a további, részletesebb eredmények és elméletek kidolgozásának, a lényeges biomolekulák megfelelő számításokkal elvégzett elektronszerkezetmeghatározása, vagyis az elektron-eloszlás és az elektronenergiaszintek kiszámítása. Ennek a számításnak elvégzése az idők folyamán egyre pontosabban vált lehetővé, amint a kvantummechanikai számítási módszerek az egyszerű Hückel-elmélettől továbbfejlődtek a π-elektronok SCF-módszerén keresztül az össz-vegyértékelektron módszerekig (EHT, CNDO, PCILO) és az ab initio SCF eljárásig, először konfigurációs kölcsönhatás nélkül, majd annak figyelembe vételével. Az elektronszerkezetre vonatkozó adatokhoz közvetlenül kapcsolódva történhetik azután a molekulák és rendszerek fizikai-kémiai tulajdonságai egész sorának meghatározása és előre való jóslása: dipólnyomatékok, ionizációs potenciálok, elektronaffinitások (elektron donor és akceptor tulajdonságok), gerjesztési energiák, elektron-átmenetek polarizációja stb. Ezen fizikai-kémiai tulajdonságok azután alapját képezik a további munkának. Az ilyen munkára, nevezetesen a molekulákkal és rendszerekkel kapcsolatos biofizikai folyamatok jellegének vizsgálatára és/vagy az ilyen folyamatokkal kapcsolatos fogalmak és elméletek kidolgozására nagyszámú és változatos példát említhetünk, nagymértékben különböző munkaterületekről. Ilyenek: az intermolekuláris kölcsönhatások elmélete, például a nukleinsavak purin és pirimidin bázis csoportjainak horizontális, illetve vertikális (hidrogénkötéses, ill. rétegződéses) kölcsönhatásának mechanizmusa és a bázisok komplementaritásának jellege, továbbá a biomolekulák közötti töltésátadás és a töltésátadás-komplexképződés kérdései, egészen az elektron-transzfer-enzimek és a biopolimérek lehetséges félvezető jellegének — vitatható és valóban vitatott — kérdéséig. A biomolekulák tautomér szerkezetének és egyensúlyának kérdései, amelyek pedig kísérleti úton meglehetősen nehezen vizsgálhatók, elméleti szempontból viszonylag egyszerűek és talán közvetlenül is összefüggenek a mutációk kérdésével. További példák a biospektroszkópia kérdései a látható és ibolyántúli tartományban,

Elhangzott az UNESCO és a Magyar Biofizikai Társulat ülésén 1976. (Fordította: Haiman Ottó.)

CD, és a foto-, valamint sugárbiológia, ahol lényeges elméleti eredmények születtek olyan problémákkal kapcsolatosan, mint pl. a timin fotodimérizációja, a recehártya rodopszinje batokromikus eltolódásának eredete, valamint szabad gyökök fénykeltette gerjesztett állapotainak szerkezete stb.

Külön említést érdemel talán az a hozzájárulás, amellyel a kvantummechanika a biomolekulák és biopolimérek magmágneses színképelemzését gazdagította, különösképpen a nukleinsavak és ezek alkotói vonatkozásában, mégpedig izo-árnyékolási görbék vagy spin-spin csatolások elméleti kiértékelésével. Ez az elméleti kiértékelés nézetem szerint döntő fontosságú előfeltétel a kísérleti úton kapott adatok megfelelő értelmezésénél.

Ettől eltérő, további hozzájárulást eredményezett a molekula-konformációk kvantummechanikai tanulmányozása; mivel ennek előfeltétele az össz-vegyérték vagy össz-elektron módszer kidolgozása volt, viszonylag újkeletű, azonban a kvantum-biofizikának máris rendkívül fontos ágazatává vált, amely ezen felül határozottan hatékonyabb a nem-kvantumbiofizikusok által használt, ún. „empirikus" módszereknél. Ebből a szempontból végzett, beható vizsgálatoknak különösen proteineket, nukleinsavakat, foszfolipideket, továbbá az élet- és gyógyszertani szempontból egyaránt érdekes, számos kisebb molekulákat vetettek alá.

Végül a kvantum-biofizika utolsó, legújabb ágának vizsgálati tárgya a környezet hatása a molekulák szerkezetére és tulajdonságaira („molekulák a környezetükben"). Ez fontos lépés előre a szabad vagy elszigetelt molekulák szokásos tárgyalásához képest, amennyiben — legalább is részben és gondolatban — behelyezi a biomolekulákat abba a közegbe, amelyben aktivitásukat fejtik ki. Az ilyen jellegű munka legfontosabb kérdései közé tartozik az oldószerek hatása. Nagy általánosságban jellemezve a helyzetet, két irányban történnek erőfeszítések. Egyes kutatók, a „hagyományos" utat járva, az oldószerrel kapcsolatos kérdések tárgyalásánál, a környező közeg kiátlagolt hatásának értelmezésénél kontinuum-modellre támaszkodnak. Mások — a szerző kutatócsoportját is beleértve — „diszkrét" tárgyalási módszer kidolgozásán fáradoznak, amelynek célja a közeg molekulái egyenként kifejtett hatásának megállapítása a tanulmányozott rendszerre. Ennek a módszernek az alapja a „szupermolekula"-modell, amely együtt tárgyalja és vizsgálja a kölcsönható molekuláris egységeket, példánkban az oldott anyag és az oldószer molekuláit. Ezzel az eljárással kezdetben csak viszonylag egyszerű rendszereknél vizsgálták meg és derítették fel — részletekre kiterjedően, de alapvetően — a hidrogénkötés jellegét, azonban az idők folyamán a módszer alkalmassá vált a fontosabb biomolekulák hidratációs rendszereinek részletes vizsgálatára. Vizsgálhatók vele hidratációs helyek, hidratációs héjak helye és száma, a kötött víz szerkezete, a hidratáció befolyása molekuláris tulajdonságokra, mondjuk a konformációra vagy tautomér egyensúlyokra stb. Ezen a fontos területen, ahol a kísérleti úton nyert információ különösen gyér és pontatlan, a kvantum-biofizika számításai előnyben vannak minden egyéb elméleti módszerhez és kísérleti eljáráshoz képest. Valamelyest hasonló a helyzet más, a szupermolekula-megközelítéssel vizsgált környezet- és közeghatások vonatkozásában, mint amilyen például a kation-kötés biológiai szubsztrátumokhoz. Itt említést kell tennem arról, milyen fontos ezen kutatási ág fejlődésében a molekuláris elektrosztatikus potenciál fogalma, amely — azon felül, hogy közvetlen jelentősége is van bio-molekulák proton-affinitásának vizsgálatánál — feltételezhetően biokémiai reakcióképességek tanulmányozásánál is fontossá válik.

A fentiekben mindössze néhány példát említettem azon lehetséges fogalomalkotási és kutatási-módszertani hozzájárulások közül, amelyekkel a kvantummechanikai elméletek, módszerek és számítások elő tudják mozdítani a biofizika fejlődését. A munka nem nevezhető könnyűnek, hiszen előfeltételezi nagymértékben különböző jellegű tudományágak konvergáló együttműködését: gondoljunk itt csak a kvantumelmélet elvont fogalmaira, a bonyolult alkalmazott matematikai és programozási apparátusra, továbbá a biológiai rendszerek komplex voltára. A módszer előnye azonban kétségtelenül az, hogy a vizsgált problémák fundamentális vonatkozásaiból indul ki és éppen ezért biztosra vehető, hogy nagy fejlődés előtt áll.

A FIZIKA TANÍTÁSA

A MECHANIKA HUSZPARANCSOLATA

Alapvetően fontos tudnivalók a mechanika fogalmainak és törvényeinek jelentéséről

Dede Miklós és Demény András
KLTE Kísérleti Fizikai Tanszék

I. A dinamika alaptörvénye: $\vec{F} = m\vec{a}$.

A törvény egy tetszőlegesen körülhatárolt testre vonatkozik, és minden testre érvényes. Az egyenletben szereplő mennyiségek:

m a test tömege

$\vec{a}$ a test *tömegközéppontjának* gyorsulása

$\vec{F}$ a testre ható *külső* erők *nyíl*összege (lásd 1. ábra).

Megjegyzések:

a: Az erők támadáspontja a tömegközéppont gyorsulása szempontjából közömbös. Példa: 2. ábra. Az ábra három esetében a tömegközéppont gyorsulása ugyanolyan nagyságú és irányú.

b: A test mozgását nem befolyásolja, hogy ő milyen erőt fejt ki a többi testre.

Az alábbi 20 parancsolat a KLTE fizika szakos hallgatói számára készített, illegális formában terjesztett segédlet; feladata az I. félévi utóvizsgák sikerének elősegítése. E „titkos" segédletet változtatás nélkül közreadjuk.

c: Az $\vec{F} = \sum_i \vec{F}_i$ nyílösszegbe minden külső erő beleveendő. Tanács: Az „eredő erő" szó használatát itt kerüljük, mert félreértéshez vezethet: mondjunk helyette „nyílösszeg"-et, megkülönböztetésül a mást jelentő „ekvivalens eredő"-től. (A középiskolában ez utóbbira használták az „eredő erő" szót.)

II. A dinamika alaptörvényét törvénnyé (nem pedig definícióvá) az erőtörvények létezése teszi. Ezek alapján $\vec{F}$-et ismerjük mint a testek kölcsönös helyzetének, sebességének stb. függvényét, és így az alaptörvényt nem azonosságnak, hanem egyenletnek olvassuk. Erőtörvények pl.: gravitációs erő (súly), Coulomb-erő, Lorentz-erő (mágneses térben mozgó töltött részecskére), rúgóerő, Van der Waals erő, közegellenállás erőtörvénye; hiányosan ismert erőtörvények: kényszererő, súrlódás. *Nem* erőtörvény a centripetális erő formulája.

III. Minden erő arra a testre hat, amelyre hat és nem másra. (Az már egy másik erő, még ha esetlegesen ugyanolyan nagyságú és irányú is.) Így a test súlya (szóhasználati megállapodásunk szerint) a test*re* ható erőt jelent; ez térfogati erő (a test minden darabjára hat). A test által az alátámasztó lapra kifejtett erő *nem* a súlyerő, hanem a felületek mikroszkópikus elhelyezkedésétől függő, a felületi részecskék által kifejtett *felületi* erő. A kettő — a körülményektől függően — lehet egyenlő vagy különböző nagyságú. Tehát: Nem a test súlya nyomja az asztalt. Hasonlóan: Nem a centrifugális erő húzza a fonalat.

IV. Tilos (mert fogalmi zavarokhoz vezet) a következő kifejezések használata:

a: Gyorsítóerő, mozgatóerő.

b: A tömegközéppontra ható erő.

Kerülendő a „centripetális erő". (Ez fogalmi zavarokhoz vezet*het*.)

V. Az egyensúly $\Sigma \vec{F}_i = 0$ feltétele *egy* meghatározott testre ható erőkre vonatkozik, a III. törvény (hatás-ellenhatás) $\vec{F}_{1,2} = -\vec{F}_{2,1}$ törvénye *két* test által egymásra kifejtett erőkre. Nevezetesen: A test súlya és az asztal által kifejtett kényszererő egymással egyensúlyt tartó erők; az asztal által a testre és a test által az asztalra kifejtett erő egymás ellenereje; a súly ellenereje az az erő, amivel a test vonza a Földet.

VI. Egy adott testre ható erőket nem lehet olyan komponensekre bontani amelyek más testekre hatnak. Típushiba: „A lejtőn levő testre ható súlyerőt két komponensre bontom; egyik a testet gyorsítja, másik a lejtőt nyomja." Hasonlóan: „A két kötélen függő test súlyát két komponensre bontom, egyik az egyik kötelet, másik a másik kötelet húzza".) Helyes viszont: „A testre ható súlyerőt lejtőirányú és arra merőleges komponensre bontom, és az eredeti súlyerő *helyett* ezekkel számolok. Mindkét erő-komponens változatlanul a testre hat."

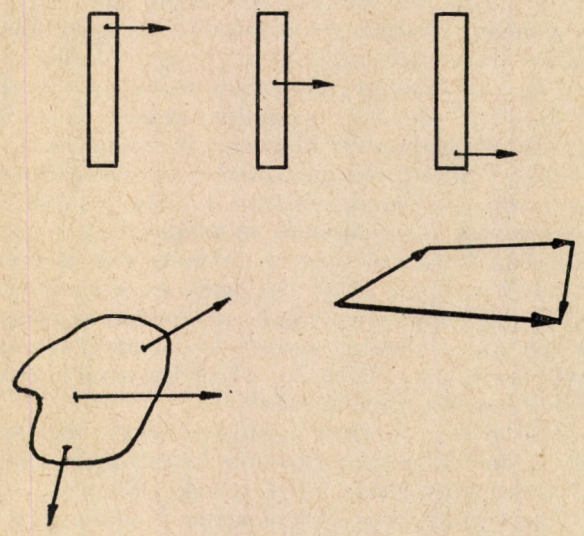
VII. A dinamika alaptörvényét és a forgómozgás alapegyenletét azért nevezik „alap-"nak, mert mechanikai problémák elemzésében általában ezekből indulhatunk. Értelmes használatuk előfeltétele: tudni, hogy most éppen melyik testre írtuk fel, és az *erre* ható erőkre figyelni. Az erőkről első tájékozódás: Erőt fejthet ki az a *másik* test, amely a kiszemelt testhez hozzáér, hathat továbbá gravitációs és elektromágneses erő.

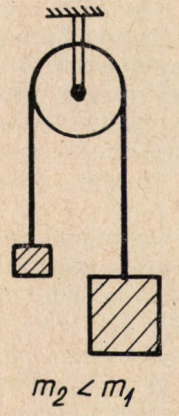
Ha a keresett mennyiségek vagy az adatok között belső erők szerepelnek, akkor — mivel a fenti erőtörvényekben csak *külső* erők vannak — a rendszert olyan testre kell bontani, hogy a rész-testek számára ezek már külső erők legyenek. Kiegészítő információt — különösen hiányos erőtörvényű erők (kényszererők) szereplése esetén — a kényszerfeltételekből és a hatás-ellenhatás törvényéből kaphatunk. Példa: 3. ábra; keressük a kötélben ébredő erőt.

Ajánlott gondolkozásmód:

1. A feladat szabatos megfogalmazása. (Igazi fizikai problémánál ez a megoldóra vár!) Itt:

a: „a kötélben ébredő erő" még kissé homályos: A kötél által (mire?) kifejtett, vagy a kötélre (mi által?), vagy a kötél egyik darabja által a másik darabra (hol?) kifejtett erő? Legyen a kérdés a határozottság kedvéért a kötél *által* a testekre kifejtett $\vec{K}_1$ és $\vec{K}_2$ erő.





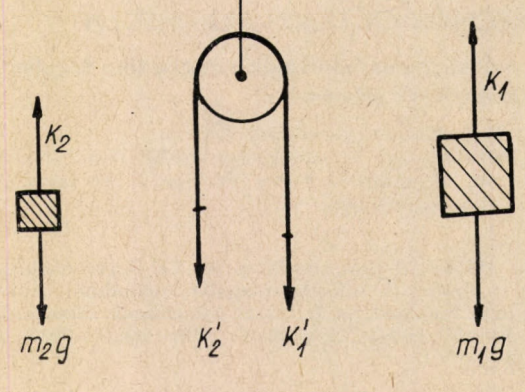
b: A hiányos adatok alkalmas feltevésekkel kiegészítendők. Tekintsük a kötelet súlytalannak és nyújthatatlannak, a csigát elhanyagolható tehetetlenségi nyomatékúnak.

2. A keresett erők az egész rendszer szempontjából belső erők. A fentebbiek szerint akkor azt célszerű három testre bontani (4. ábra). Az alapegyenletek ezekre:

[1] $m_1 a_1 = m_1 g - K_1$,

[2] $m_2 a_2 = K_2 - m_2 g$,

[3] $0 = \Theta\beta = (K_1' - K_2')r$.



(Az egyenleteket rendre a függőlegesen lefelé, felfelé, ill. a papírra merőlegesen befelé mutató tengelyre vonatkozó komponensekre írtuk.)

3. Kiegészítő információk:

a) $a_1 = a_2$ (kényszerfeltétel)

b) $K_1 = K_1'$, $K_2 = K_2'$ (hatás-ellenhatás).

Ezek után az egyenletek egyértelműen megoldhatók. Általános vizsgáztatói elv feladatmegoldás elbírálásában: Csak az a megoldás fogadható el, amelynek minden lépését meg tudja indokolni a megoldó (ha kérdezik). Indokoláson pedig az értendő, hogy meg tudja mondani, milyen fizikai törvényre hivatkozva tehette azt a lépést.

VIII. A kényszererő nem „a kölcsönhatás törvénye miatt" ébred, hanem a felületek közelsége miatt. (Éppen olyan becsületes erő, mint a többi. Az egyetlen különbség: Hiányosan ismerjük az erőtörvényét. Feltételezzük, hogy az erő nagysága a felületi molekulák átlagos távolságától függ, azaz attól, hogy 10^{-6} vagy 10^{-8} cm-re vannak-e egymástól.)

IX. A forgatónyomaték-vektor ($\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}$) valamilyen tengelyre vonatkozó komponense egyenlő az erre a *tengelyre vonatkoztatott* forgatónyomatékkal. (Tehát a középiskolában tanult forgatónyomaték — erő szorozva az erő karjával — az $\vec{r} \times \vec{F}$ *vektor*nak a megfelelő tengely irányába eső vetületével egyezik meg. Nem definíció szerint, hanem a — külön-külön — definíciójukból *következően*.)

X. Erőrendszer ekvivalens helyettesítésén olyan erőrendszert értünk, amelynek nyílösszege egyenlő (nagyságú és irányú) az eredeti erőrendszerével, és az új erők forgatónyomatékainak eredője (= nyílösszege) is egyenlő az eredeti rendszerével. Ekvivalens eredő: Egyetlen olyan koncentrált erő, amely a fenti kikötéseknek megfelel. (Ekvivalens helyettesítést bármely erőrendszerhez találunk, nem is egyet, ekvivalens eredőt nem mindig.)

Az ekvivalens helyettesítés matematikai segédeszköz, amellyel a vizsgált problémát esetleg egyszerűbbre vezethetjük vissza. Az ekvivalens helyettesítés szabályait („az erő a hatásvonala mentén áthelyezhető" stb.) semmiképpen sem szabad a mechanika alaptörvényeihez vagy az erőtörvényekhez hasonló jelentésű fizikai törvényeknek tekinteni.

Az ekv. helyettesítés definíciójában tett kikötések biztosítják, hogy a tömegközéppont gyorsulása és az impulzusmomentum változási gyorsasága (merev testnél: a szöggyorsulás) ugyanannyinak adódjon, mint az eredeti erőrendszer szerint. *Nem* biztosítják viszont a deformáció változatlanságát. (A két végén kétfelé húzott gumiszalag megnyúlása különbözik a nem húzott szalag megnyúlásától!)

„Az erő a hatásvonala mentén eltolható" kifejezés helyett ajánljuk — a bár hosszabb, de a félreértés veszélyét csökkentő kifejezést: — „az erő ekvivalens módon (azaz a tömegkp. gyorsulását és a test forgását változatlanul hagyva) helyettesíthető a hatásvonalának más pontjában ható, ugyanolyan nagyságú és irányú erővel". (Ezen *fiktív* erő támadáspontja akár a testen kívül is lehet!) Ekvivalens helyettesítéssel bajlódni csak akkor értelmes cselekedet (akkor sem mindig), ha a forgatónyomatékot akarjuk meghatározni. Ha a feladat csak a tömegközéppont gyorsulásának a meghatározása, az ekvivalens eredő keresése nevetséges reflexcselekvés, gondolkodó emberhez nem méltó.

Összefoglalva:

a) Az erő nemcsak a hatásvonala mentén tolható el.

b) Az erő a hatásvonala mentén tolható el.

c) Az erő a hatásvonala mentén sem tolható el.

Az a) állítás igaz a tömegkp. gyorsulása szempontjából, a b) a test forgása szempontjából (a mondott értelemben) és c) a test deformációja szempontjából.

XI. A súlypont *nem* a súlyerő támadáspontja, hanem a súlyerő(k) ekvivalens eredőjének a támadáspontja. (Az előbbit csak rövidítésképpen mondjuk.)

XII. Az impulzusmomentum is, a forgatónyomaték is akkor egyértelmű, ha megnevezzük a vonatkoztatási (vagy tengelyt). Az impulzusmomentum-tétel $\left(\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M}\right)$ teljesül:

a: inerciarendszerben nyugvó pontra,

b: a (bárhogyan gyorsuló) tömegközéppontra.

Más (inerciarendszerben gyorsuló) pontra csak az ezzel együtt *haladó* vonatkoztatási rendszerben figyelembe veendő tehetetlenségi erők forgatónyomatékának beszámításával.

XIII. A munka — definíciója szerint — az erő szorozva annak a pontnak az elmozdulásával, amelyre az erő hat. (Nem pedig annak a pontnak az elmozdulásával, amely az erőt kifejti!) A munkát erő végzi (vagy, ezzel egyenértékűen, az erőt kifejtő test), de nem feltétlenül egy másik erő „ellen". Ezért ne azt keressük elsősorban, hogy mi „ellen" történik a munkavégzés (mert ez csak kvázisztatikus elmozdulásnál található meg), hanem hogy mi végzi a munkát. A munkatételben nem az „erő ellenében", hanem az erő *által* végzett munka szerepel!

XIV. A munkatételben a kinetikus energia változása a testre ható összes erő (külön-külön számolt) munkájának (algebrai) összegével egyenlő. Speciális körülmények között teljesülő további állítások:

a: Tömegpont: Az erők összes munkája egyenlő az eredő erőnek a (tömegpont elmozdulásával számolt) munkájával.

b: Kiterjedt merev test: (Az „eredő erő munkája" nem egyértelmű kifejezés: Nem tudjuk, mivel kellene megszorozni az $\vec{F} = \Sigma \vec{F}_i$ eredő erőt, hiszen minden erő támadáspontjának más és más lehet a $\Delta \vec{r}_i$ elmozdulása. Ha valaki netalán — balga módon — arra gondolna, hogy az ekvivalens eredő támadáspontjának az elmozdulásával kellene szorozni, vegye észre, hogy ez sem egyértelmű, hiszen ez a támadáspont egy egyenesen bárhová rakható.) A munkatételben szereplő összes munka itt $W = \Sigma \vec{F}_i \Delta \vec{r}_i$, ahol az összegzés a *külső* erők munkájára terjed ki. (Merev test belső erőinek összes munkája zérus!) *Beláttuk*, hogy ugyanezt a munkát így is megkaphatjuk: $W = \vec{F} \Delta \vec{r}_c + \vec{M}_c \Delta \vec{\varphi}$, ahol $\vec{F}$ a külső erők nyílösszege (támadásponthoz semmi közünk itt!), $\Delta \vec{r}_c$ a *tömegközéppont* elmozdulása, $\vec{M}_c$ a *tömegközéppontra* vonatkozó eredő (külső) forgatónyomaték, $\Delta \vec{\varphi}$ a test szögelfordulása. (A fenti formulához ne fűzzünk misztikus képzeteket, mint pl. „mert az eredő erő a tömegközéppontban hat", ennek ui. részben nincs jelentése, részben — ha adunk neki, $\vec{F}$-et ekvivalens eredőnek vélve — nem igaz. A fenti formula abból következik, hogy utána számoltunk és helyesnek találtuk.) Rögzített tengely körül forgó merev testre jó az egyszerűbb $W = \pm M \Delta \varphi$ formula, ahol M a tengelyre vonatkozó forgatónyomaték. Deformálható testnél, vagy egymáshoz közeledhető-távolodható testekből álló rendszereknél a belső erők munkája általában nem zérus. (Példa: rugóval összekötött két tömegpont.)

XV. A $T_2 - T_1 = W_{1,2}$ munkatétel a *teljes* kinetikus energia megváltozása és az összes (külső és belső erők által végzett) munka között teljesül. *Merev* test esetén a teljes kinetikus energiát felbonthatjuk a „haladó mozgáshoz rendelt" $\frac{1}{2} m v_\xi^2$ és a „forgó mozgáshoz rendelt" $\frac{1}{2} \theta_c \omega^2$ járulékok összegére, és azt találtuk, hogy külön az egyik és külön a másik változást megadja a fentebbi munka-kifejezés első, ill. második tagja. (Hasonló felbontást sikerült találni az impulzusmomentumra is.) Mindebből a lényeges: A munkatétel alkalmazásánál tudatosan állapodjunk meg magunkban, hogy melyik formáját kívánjuk használni, és ahhoz tartsuk magunkat.

XVI. Potenciális energiát olyan kölcsönhatáshoz rendelhettünk, amelyben az erő munkáját egyértelműen meghatározta a kezdő- és véghelyzet, azaz a munka nem függ a pálya alakjától. (Konzervatív kölcsönhatás.) Értelmetlen kifejezés „a kezdeti és végső munka különbsége", értelmes kifejezés „a kezdeti és végső potenciális energia különbsége".

XVII. A potenciális energiát (ha már ismerjük, mint a hely függvényét) kétféle módon használhatjuk a mechanikai feladatok megoldására:

a: A mechanikai energia megmaradásának törvényéből indulunk. (Ezt csak akkor tehetjük, ha a tekintetbe

vett testre ható *minden* erő konzervatív. Pl.: síkos lejtőn csúszó test.)

b: Kiszámoljuk a potenciális energiából a konzervatív erők által végzett munkát ($W_{1,2} = U_1 - U_2$), és a munkatétellel számolunk tovább. (A nem konzervatív erők munkáját közvetlenül számoljuk. Pl.: érdes lejtőn lecsúszó test.)

XVIII. A Hooke-törvények egyensúlyi állapotra (vagy kvázisztatikus mozgásra) vonatkoznak. Arra a ravasz kérdésre, hogy „a két végén kétfelé húzott rúd megnyúlásának kiszámolásához a két erő közül melyiket kell Hooke törvényébe helyettesíteni", a helyes válasz: „Valamelyiknek (bármelyiknek) a nagyságát, hiszen — egyensúly lévén — egyenlő nagyságúak."

XIX. Az egyensúlyban levő test minden darabja egyensúlyban van. A belső darabokra a térfogati erőkön kívül (mint a súly) a szomszédjaik fejtenek ki (az ő szempontjukból külső) erőt, és ezek együttesen biztosítják az egyensúlyt. A test belső pontjában a feszültség a szomszédok által egymásra felületegységenként kifejtett *felületi* erő. (Egyértelműségéhez természetesen meg kell adni a pont helyén kívül még az elválasztó felület orientációját is!)

XX. A tehetetlenségi és a súlyerő nem fáj (!). A feszültség ill. a deformáció az, amit közvetlenül érzünk.* A gravitációs térben szabadon zuhanva testünk minden darabja egyformán gyorsul: deformáció, feszültség nem ébred. A fékező villamoson hasra eső utas orrát nem a tehetetlenségi erő, hanem a padló által kifejtett felületi erő töri be; ilyen módon az orr betörése a vonatkoztatási rendszer választásától független, ún. „rendszerinvariáns".

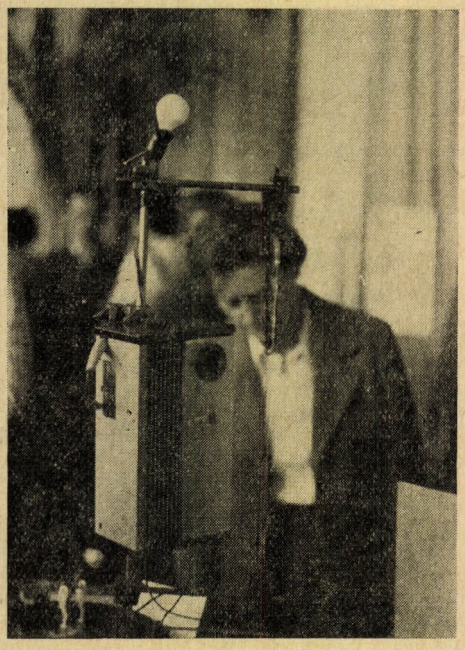
* V. ö. „. . . Rőf kötél súgja majd fejemnek,
Hogy mi a súlya fenekemnek."
(F. Villon: A felakasztását váró Villon négy sora
ford. Illyés Gy.)

A FIZIKATANÁROK XIX. ORSZÁGOS ANKÉTJA ÉS FIZIKAI ESZKÖZKIÁLLÍTÁSA

Csekő Árpád

Változatlanul nagy létszámú résztvevővel zajlott le Zalaegerszegen, 1976. április 5—7. napjain, a tavaszi szünetben a XIX. fizikatanári ankét. A Zala Megyei Tanács Művelődési Osztálya felajánlotta és a lendületesen fejlődő város modern Művelődésügyi Központja színháztermében adott helyet az előadásoknak, báltermében az eszközkiállításnak. Az ankéton 437 tanár vett részt. Zalamegye 20 000 Ft, Zalaegerszeg város 15 000 Ft támogatásban részesítette Társulatunk ezen nagy rendezvényét. Az ankétok hosszú sorában ezúttal harmadszor került napirendre a hőtan tanítása.

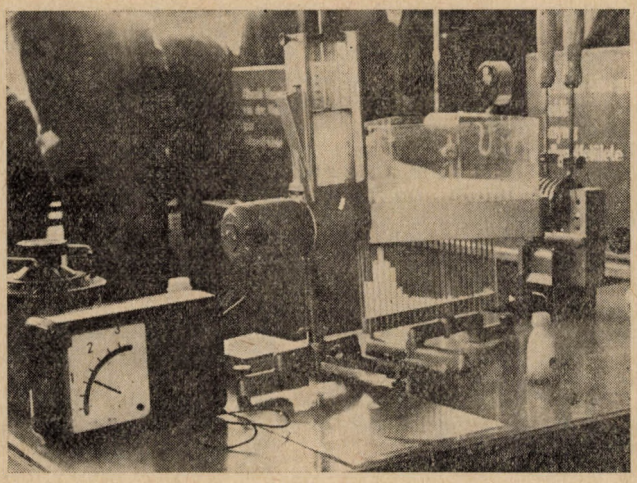
A megnyitón *Koplár Lajos*, a Zala Megyei Tanács elnökhelyettese üdvözlő szavaiból ezt idézzük: „. . . reméli, városunk úgy hallat magáról, hogy a fizikatanárok itt szellemileg gazdagodtak, új oktatási ötletekhez jutottak, felüdültek". *Sas Elemér*, Társulatunk főtitkár helyettese azzal köszönte meg az üdvözletet, hogy örömmel jöttünk és bizonyára beteljesül az elnökhelyettes reménykedése, mert a jó munkának minden feltételét megteremtették. Az ankétot azzal nyitotta meg, hogy az eredmények felmutatása már csak rajtunk múlik.



Sotecki Győző érdeklődést keltő berendezése a gumiszál különleges hőtágulásának demonstrációjához. ELTE

Jánossy Lajos, az Oktatási Szakcsoport elnöke: A statisztikus mechanikáról c. ezúttal is bevezető jellegű előadásából érdemes kiragadni a következő gondolatokat. Annak ellenére, hogy a tanulók többsége hallott a fizikai jelenségek hullámmodellel való értelmezéséről, sőt ilyen irányú ismereteiket szeretik is fitogtatni, a tanárok bátran kezdjék a hőtani jelenségek golyómodellel való megmagyarázását és csak legvégül mutassanak rá annak fogyatékosságaira. Kerüljük el, hogy a tanulók a matematikai levezetésekben fuldokoljanak. Egyszerű belátásokkal juttassuk őket ahhoz, hogy a mechanikai törvényeken kívül a statisztikus törvények is kellenek a kinetikus gázelméleti törvény megértéséhez. A valóságos gázok mindegyike magas hőmérsékleten ideális állapotúként viselkedik. Szükség van a sebességeloszlás ismeretére, hogy a jelenségek értelmezéséhez alapuk legyen. *Sas Elemér* több érdekes hőtani probléma ismertetése mellett a gyertya súlytalansági állapotban való égését nemcsak értelmezte, hanem be is mutatta. *Tasnády Péter:* A gumi rugalmassága és a II. főtétel c. előadását a *Sotecki Győző* által kiállított kísérleti összeállítás értelmezésével kezdte. A gumi „fordított" hőtágulási viselkedése lehetővé teszi olyan periodikus jelenség végbemenetelét, hogy a gumiszálat felmelegítő elektromos hősugárzót a gumiszál által meghúzott relé kikapcsolja. A II. főtételnek az entrópiafogalommal való tanítása konkrétabbá tehető, ha a megszokott ideális gázmodell mellett ezt a modellt is alkalmazzuk. Ennek érdekében a gumi kémiai szerkezetének alapos ismertetését, majd azon keresztül a viselkedés statisztikus mechanikai elméletét mutatta meg. Jól illeszkedett az előadások ismeretláncolatába *Juhász András:* Véletlenek-e a kristályhibák? c. előadása. Az első délelőtti programot *Csákány Antalné:* A hőmérséklet fogalmának kialakítása című előadásában a középiskolák mindegyikében megvalósítható, valóságos mérésekkel kísért, jól kicsiszolt módját mutatta meg annak, mit és hogyan tanítsunk a hőmérsékletről. Ha az előadó e témáról a Fizikai Szemle f. évi 3. számában írt cikkét a résztvevők előzőleg olvashatták volna, akkor megbeszélés tárgya lett volna a hő-fogalom is, amit az előadó az előadásban elkerült, de a tanításban nem hagyhatott ki, mert a tanulók rákérdeztek, hiszen minden addigi tanításaikban a két fogalom szorosan összekapcsolt. Ugyancsak szélesebb körű lett volna a hőmérsékletnek a dimenziójáról félbemaradt vita is. Nyilván nem azért indul meg energiacsere két egymással érintkező test között, mert a joulokban kifejezhető belső energiájukban van különbség, hanem azért, mert az egyiket alkotó részecskék átlagenergiája (joule/darabszám) nagyobb a másikénál.

Az eszközkiállítás a résztvevőknek már a megnyitás előtt rendelkezésükre állott. Mivel a kiállítási helyiség nagyon célszerűen az előadási teremmel szomszédos te-



Rázó készülék a Maxwell eloszlást demonstráló regisztráló kamrával. ELTE kiállítása

remben volt, a szüneteket a tanárok mindig ott tölthették. Az hogy a kiállítás maradandó hatás szempontjából nagyon felzárkózott az előadásokéhoz, első sorban az ELTE Általános Fizika Tanszéke által kiállított nagy mennyiségű és magas szintű hőtani kísérletnek köszönhető. *Radnai Gyula* nyomtatásban való megjelenésre is érdemes írásbeli értelmező anyagot tárt a nézők elé.

Az egész délutánt a *Sas Elemér* által vezetett Fórum és a váltakozva beállított bemutató kísérletek, illetőleg filmvetítések töltötték be. *Radnai Gyula* a PHYWE cég Auer-féle kinetikus gázelméleti összeállításával a rázógép és regisztráló kamra segítségével a gázmolekulákat modellező golyók sebességeloszlását (Maxwell-féle) mutatta meg. — Feltett kérdésre adott válaszában *Sas Elemér* közölte, hogy *Csikai Gyula* professzor kezdeményezésére megalakult Társulatunkban az az Eszközbizottság, amelyik a gyártatandó eszközöket szakmailag értékeli, javaslatot tesz az alapvető kísérleti eszközök sorozatgyártására, véleményezi a Tanért gyártási tervét. Ezért kéri a taneszköztervező tanárokat, hogy eszközeik legfeljebb 5 oldalt kitevő leírását az Eötvös Loránd Fizikai Társulatnak, vagy a Tanértnek küldjék meg, készítményeiket pedig bocsássák annak kipróbálása céljából rendelkezésre. — *Marx György* három filmet mutatott be és fűzött hozzájuk ismertetőt, értelmezést. A furcsa történetek film célja a II. főtétel motiválása, az irreverzibilitásra hívja fel emlékezetben jól megmaradó élményképekkel a figyelmet. Ezt követte egy angol film a hőmérséklet kialakulásának számítógéppel való statisztikus követéséről, (Lásd Fiz. Szle. 1976/5—196.) majd ennek *ifj. Szalay Sándor* által készített, középiskolákban jobban használható változata. — *Főzy István és Juhász András* vetítve mutatták be az ozmózis jelenségével növekvő, növényformájú kristályalakzatokat. — *Kovács Lóránt*, a Tankönyvkiadó főelőadója a tankönyvekre kiírt pályázatok eredményét ismertette és beszámolt a Tankönyvkiadó által kiadásra kerülő fizika tankönyvek és segédkönyvek állásáról. — Örömüknek adtak kifejezést egyes kartársak annak, hogy ankétunk címfeliratából kimaradt a középiskolai jelző. Társulatunk főtitkára és helyettese válaszaikban buzdították a szakközépiskolákban működő kartársakat a Társulatban való tömörülésre és ott aktívabb részvételre. Az általános iskolai kérdések megoldására Társulatunkban jelenleg nincs tömegbázis.

Kunfalvi Rezső a fizikai tanulmányi versenyben elért kimagasló eredményekről szólt és tájékoztatást adott a júliusban megrendezésre kerülő nemzetközi versenyre. — *Ronyecz József* felmutatta a hódmezővásárhelyi, két évvel ezelőtti ankéton elhangzottakról készült könyvet és ígérte, hogy azt a Társulat hamarosan megküldi az akkori részvevőknek, de könyvárusi forgalomban is kapható 20 Ft-ért. *Ujj János* mutatta be *Bakányi Márton* rázókészülékével az egy és kétatomos gázokra, a diffúzióra, a Brown- mozgás modellezésére vonatkozó kísérleteket. — *Isza Sándor* egy rézdrót meghúzásra bekövetkező lehűlését közvetlen méréssel demonstrálta. — *Ujj János* a fázistér szemléltetésére készített berendezését mutatta be. — *Ronyecz József* a Gay—Lussac törvényeket, a gázok belső energiáját és a forráspont nyomásfüggését mutatta be sajátkészítésű eszközeivel.

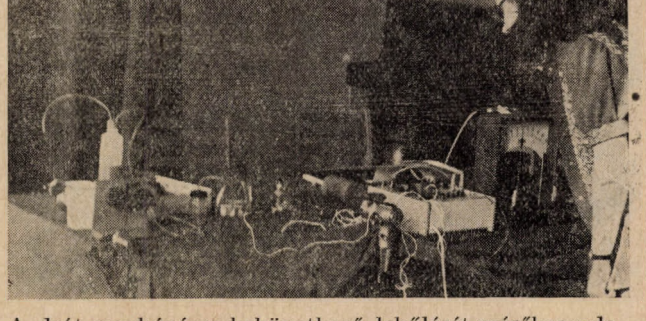
Vacsora után a városi moziban Zalaegerszeg tervszerű fejlesztéséről láttunk igen jól sikerült filmet, majd *Kovács András:* Labirintus c. filmjének ősbemutatóján vettünk részt. Utána a *Marx György* által vezetett megbeszélésen sokan mondták el a filmről benyomásaikat, majd pedig azokra a rendező éjfélig válaszolt.

A második nap *Kovács István* előadásával kezdődött. A termodinamika főtételeit igen szabatosan de érdekfeszítően a perpetuum mobileken keresztül mutatta be. Az előadás világossága és érdekessége megteremtette azt az általános elmélyülést, hogy a számos hozzászólást, vitát az elnöklő *Sas Elemérnek* kellett lezárni. — *Radnai Gyula:* Egyszerű rendszerek egyensúlyi állapotai címmel a termodinamika széleskörű érvényességét igazolta a gáztörvénnyel egyenlő rangú egyéb állapotegyenletek bemutatásával. A böröndnyi molekula eloszlásának egyszerű számadatai bizonyára könnyen megjegyezhető példaként terjed tova. — A délelőtti záróelőadás ezen a második ankétnapon is ugyancsak a tanári megvalósításra vonatkozott. *Gulyás Mihály:* A hőtan tanításának szakközépiskolai problémái címmel adta elő.

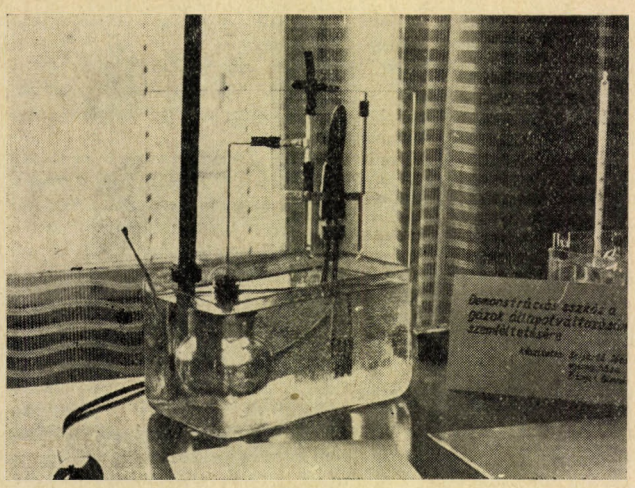
A szokott ünnepies keretek között a következő kitüntetések és díjak kerültek kiosztásra. Az 1976. évi Mikola Sándor díjat *dr Nagy Mihály* debreceni ref. gimnáziumi



Bakányi Márton kinetoszkópja (rázókészüléke). A baloldali térben szaporodnak a golyók a dinamikus egyensúly kialakulásig. A jobboldali kép későbbi időpillanat.

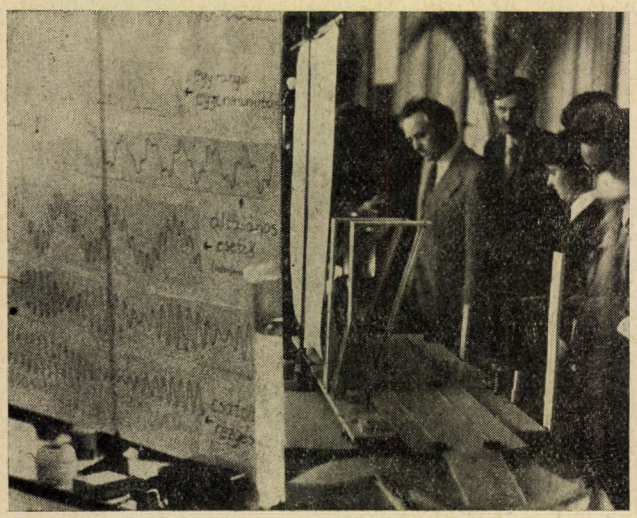


A drót meghúzásra bekövetkező lehűlését mérőberendezés. Isza Sándor KLTE



Demonstrációs eszköz a gázok állapotváltozásának szemléltetésére. Szijártó József

és *Horváth Margit* kaposvári gimnáziumi tanárok kapták. Az Oktatásügy Kiváló Dolgozója kitüntetést *Tichy Géza* az ELTE Szilárdtestfizikai Tanszék adjunktusa és *Tóth László* a budapesti Fazekas Mihály Gyakorló Gimnázium fizika tanára kapta. Az ankéttal kapcsolatos kiállításon bemutatott eszközeikért az Oktatásügyi Minisztérium díjait a következők kapták: I. díjat 4000 Ft-ot *Bakányi Márton* a budapesti József A. gimnázium, II. díjat 2500—2500 Ft-ot *Szijártó József* nyíregyházi Zrínyi I. gimnázium és *Kalamár Gábor* zalaegerszegi Ganz Ábrahám Gépészeti Szakközépiskolai, III. díjat 2000 Ft-ot *Horváth Vilmos* nagykátai Damjanich gimnáziumi, 1000 Ft jutalmat *Ujj János* budapesti József Attila gimnáziumi tanár. A Zala Megyei Tanács III. díját 2000 Ft-ot *Matisz Attila* szombathelyi Ipari tanuló intézeti tanár, a Zalaegerszegi Tanács III. díját 3000 Ft-ot *Zlatnik Károly* csepeli szakmunkásképző-intézeti tanár kapta. A Tanért 1000—1000 Ft-os külön-díját *Cseh Györgyi és Sotecki Győző*, az ELTE tanárjelöltjei kapták. Dicséretben részesültek *Isza Sándor* KLTE Debrecen, *Csekő Árpád* OPKM, *Tarnóczky Attila*, *Varga László* érdi, *Légrádi Imre* soproni, *Sinkó Pál* vépi, *Ronyecz József* hódmezővásárhelyi, *Bihari Sándor és dr Lipp Imre* (Tanért). Köszönetet mondott a bizottság az ELFT, az OM és az OPI nevében a kiállítóknak, kiemelten az ELTE Általános Fizikai Tanszékének, valamint a Tanért Vállalatnak.



Csatolt ingákkal rezgési eseteket író berendezés. Cseh Györgyi ELTE

Az Oktatási Szakcsoport veszprémi ankéton megválasztott vezetőségének mandátuma a f. évben lejár. A Fizikai Szemle 1974/1. számában közölt terveik megvalósításáról most ezen ankét alkalmával írásban számoltak be, amelyet az erre az ankétra jelentkezők megkaptak. A tisztségéről most lemondó vezetőségnek, különösképpen *Jánossy Lajos* akadémikusnak és *Holics László* titkárnak társulatunk főtitkára, *Marx György* mondott köszönetet értékes tevékenységükért. Társulatunk fele olyan fizikus, akik az oktatást választották élethivatásul. Az ezekből alakult Oktatási Szakcsoport Társulatunkban a legnagyobb létszámú és az elmúlt években a legaktívabban működött. Amint a leköszönő Oktatási Szakcsoport jelentéséből kiderül, a jelen ankét résztvevőinek 70%-a nem tagja Társulatunknak. Ennek részben az az oka, hogy iskolafajták szerinti problémáik megoldását eddig nem látták biztosítva.

Ezután a szabályszerűen előkészített választás zajlott le. A jövő ciklusra megválasztott Oktatási Szakcsoport vezetősége:

Elnök: *Jánossy Lajos* akadémikus Budapest

Ügyvezető elnök: *Holics László* vezető tanár Budapest,

Tagok: *Bánkuti Sándor* tanár Békéscsaba, *Dede Miklós* adjunktus KLTE Debrecen, *Károlyházy Frigyes* egyetemi tanár ELTE Budapest, *Kovács László* tanár Nagykanizsa, *Monostori Lászlóné* tanár Budapest, *Ronyecz József* tanár Hódmező- vásárhely, *Sarkadi Ildikó* tanár Nagyecsed, *Skrapits Lajos* adjunktus ELTE Budapest, *Tasnádi Péter* adjunktus ELTE Budapest, *Tóth Eszter* (titkár) tanár Budapest, *Zlatnik Károly* tanár Budapest.

A második ankétnap délutánján 7 nagy autóbusz vitte a résztvevőket a zalai kies dombok között, nagyjainkra emlékeztető helységeken át Hévízre, majd a keszthelyi Festetich kastélyba. A vonyarcvashegyi kilátóról a Balaton vulkáni kúpsorozatát az utolsó napsugarakban pillanthattuk meg. A 320 terítékes hangulatos társasvacsora a Helikon Taverna termeiben volt.

A harmadik munkanapot *Károlyházy Frigyes* nyitotta meg „Nem tudja azt senki fia, mitől nő az entrópia." címmel tréfás hasonlatokban tálalta az entrópiáról tudni valókat. A megszokott magávalragadó, szuggesztív előadás során feltett „Értik?" kérdéseire egyhangúlag mondhattuk, megértettük. De hogy a könnyen megértett fogalmak eljussanak a tanárokban olyan szintig, hogy azt tanítani is tudják, ahhoz sürgősen szükség van, hogy írásban is olvashassák a hallottakat. Az elmúlt két hőtani ankéton az volt az általános vélemény, hogy az entrópia-fogalom ne szerepeljen a középiskolai anyagban. Azóta is illetékesektől ezt olvastuk. A jelen ankét minden előadásából az derült ki, hogy senki sem tudja elképzelni a termodinamika középiskolai oktatását entrópia-fogalom nélkül. Jó volna megkeresnünk középiskolai tanítási



Az Országos Pedagógiai Könyvtár és Múzeum kiállított eszközei

módját is, mert valóban a hőtan II. főtétele az egyik legalapvetőbb természettörvény, nemcsak a fizikában, hanem az egész természettudományban! Lapunk hasábjai nyitva állanak mind a terveknek, mind az eredményeknek.

Dede Miklós a II. főtételről, annak tanításáról tartott alapos, általános tetszést aratott előadást. A kiállításon bizonyára állandó szemlélőserege lett volna annak, ha a KLTE tulajdonában lévő Leybold hőlégmotort annak különböző felhasználásaiban bemutatja.

Bakány László: Energiagondok világviszonylatban című előadása jól vezette el az ankét-résztvevők gondolkozását a fizikai ismeretektől azok közgazdasági, társadalomtudományi alkalmazásaihoz.

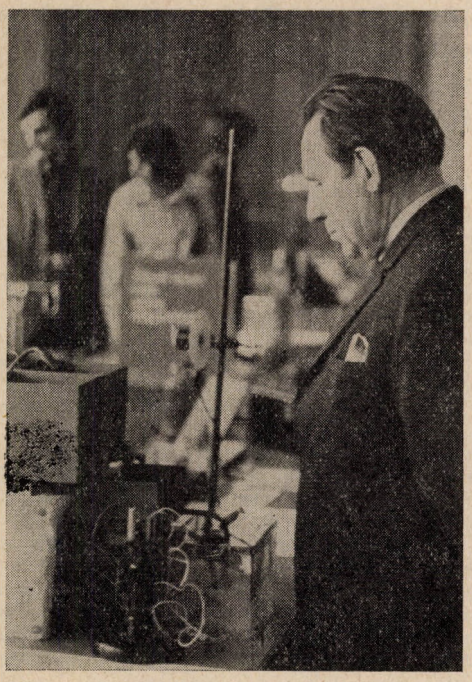
Az előadások fenti ismertetése után, az ankétbeszámolók gyakorlata szerint pár szót kell még ejteni az ankéttal kapcsolatos kiállításról. Ez a 18. kiállítás kiállítási felületre és mennyiségileg elmaradt a nyíregyházi mögött, de az igen sok értékes bemutató miatt ez is felejthetetlen lesz és eredményt hozó. Biztonságosabbá tesz bennünket tanításunkban a megnyúló drót lehűlésének tapasztalása, amit *Isza Sándor* (KLTE) nyújtott. Jól egészítette ki azzal, hogy rögtön a gumi ellentétes viselkedését is mutatta. A sok modellkísérlet mellett ugyancsak fontos tapasztaltatást végzett *Sárai István* (ELTE) az acéldrót hevítésekor annak tágulásában 700 °C körül bekövetkező ugrás bemutatásával. (Kristályszerkezetben bekövetkező átalakulás.) Megelégedéssel szemléltük a Tanért új gyártmányait, az időmérőt és ejtőberendezést. Szerencsésen alakult a kiállítás összetétele, mert a hőtan minden fontosabb fejezetének alapvető eszközeit megtalálhattuk. Hőmérsékletmérés 6 kiállítónál, szilárdtest-tágulás 5, gáztörvény 3, kinetikus hőelméleti modellkísérlet 3, hőmechanikai egyenérték meghatározás 3, hőgépek 3, kalorimetria 2, hősugárzás 2, hővezetés 1, hőáramlás 1, halmazállapotváltozás 2, kritikus állapot 1 kiállítónál volt látható. Sajnos a Brown-mozgás hőmérsékletfüggését még mindig nem láthattuk.

Ennek a zalaegerszegi 18. eszközkiállításnak statisztikája: 2 egyetem 5 oktatója, illetőleg hallgatója 14 fm-en 22 készlettel, az Országos Pedagógia Könyvtár és Múzeum egy kiállítója 19 eszközzel, 11 iskola 12 tanára 18,5 fm-en 82 eszközzel, illetőleg készlettel, 1 egyéni kiállító 0,5 fm-en 1 eszközkészlettel, a Tanért 3 kiállítója 20 folyóméteren 80 eszközzel, illetőleg készlettel, tehát összesen 5 intézmény 54 fm asztalfelületen 204 eszközzel, illetőleg kísérleti összeállítással szerepelt. Jelentős mennyiségű eszközről, illetőleg rengeteg kísérletről részletesen nem tudunk beszámolni. *Ronyecz József, Zlatnik Károly és Kalamár Gábor* mennyiségileg is csodálatosat produkáltak. A díjak és jutalmak felsorolása, valamint a sok fénykép és annak aláírása ad az előbb írottakon felül tájékoztatást.

Marx György főtitkár zárószavaiban először örömét fejezte ki, hogy ez az ankét-program tetszésre talált, sokan, érdeklődve, kitartóan vettek részt. Az Oktatási Szakcsoport jól állította össze, az előadók korszerűen dolgozták fel az anyagot. A termodinamikának a fizikában elfoglalt helyét, annak a fizika egyéb fejezeteivel, a matematikai, a kémiai, a biológiai vonatkozásait, mérnöki, közgazdasági alkalmazásait *Jánossy akadémikus, Csákány Antalné* és *Bakány László* főmérnök előadásaikban jól megmutatták. A termodinamika általános volta és az, hogy a nagyon nagy szabadságfokú rendszerek statisztikus viszonyait, azok legvalószínűbb állapotát fogalmazza meg, nehézségeivel elriasztja a fizikusokat. Nincs tankönyvi megoldás a II. főtétel tanítására. Nem is tudják a tanulók alkalmazni, pedig a természetben a legprimitívebb jelenség. Az Oktatási Szakcsoport új vezetőségének — amelyik nem új, hiszen csak a régi egészült ki és vált sokrétűbb feladatok megoldására alkalmasabbá — szép feladata, hogy az új tantervekben keresse a termodinamika alapvető fogalmai megtanításának jó elhelyezését.

Az előadások tanulságosak voltak, élveztük őket, a közvéleményt jól formálták. Helyesen a II. főtételen volt a hangsúly és a statisztikus értelmezés dominált.

Összefoglalásként végigment a termodinamika mindkét nézőpontból felépíthető leglényegesebb ismeretanyagán. Ezzel célja az volt, hogy a résztvevőket próbálkozásra,



Termoelektromos árammal hajtott motor.
Isza Sándor KLTE

oktatási kísérletezésre, munkára serkentse. Azt a reményét fejezte ki, bizonyára lesznek kartársak, akik a termodinamikai fogalmakat nemcsak a makroszkopikusan észlelhető mennyiségekre építve, hanem statisztikus mechanikailag származtatva is oktatni próbálják. Az előadások szervezését konzervatívnak minősítette. A szokásos sikeres előadók mellé felfrissítés, nem egyetemi oktatók szerepeltetése mind az ankétokon, mind pedig az évközi Fórumokon a jövő érdekében nagyon kívánatos volna. Nagyon jóknak találta a bemutatókon, illetőleg a kiállításon látott kísérleteket és a filmeket. Az előadásoknak, a kísérleteknek és filmeknek jobb összehangolására törekedni kellene. A Fórumon kevés idő jutott a kísérleti bemutatók és filmbemutatók, valamint a tájékoztatások miatt a részvevők szerepeltetésére. Az előadók a kérdezőknek szünetekben adott válaszaikat tartalékolhatták volna, sok esetben érdemes lett volna a nagy közösség elé tárni.

Javasolja az Oktatási Szakcsoportnak, hogy felerősödött alakjában szélesebb körű legyen kapcsolata ne csak az Oktatási Minisztériummal, Országos Pedagógiai Intézettel, Oktatás Technikai Központtal, a Tanért Fejlesztési Osztályával, hanem olyan könyvtárakkal is, mint pl. az Országos Pedagógiai Könyvtár és Múzeum, ahol idegen nyelvű tankönyvek, folyóiratok vannak, amelyekben a bennünket érdeklő törekvésekre felhívják a figyelmet. Helye van ezeknek az ismertetéseknek a Fizikai Szemlében ugyanúgy, mint a tanárjelöltek diplomamunkái tanítási vonatkozásainak.

A Fizikus Naptárban felsorolt nyári, őszi oktatási programokra hívta az érdeklődőket és közölte, hogy a jövő évi ankét előreláthatólag Szolnokon lesz fénytani tárgykörrel.

A főtitkár befejezésül *Kovács Lajosnak* a Zala Megyei Tanács Művelődésügyi Osztálya vezetőjének a vendéglátásért, az ankét megrendezéséért a Társulat helyi csoportjának és a Művelődési Központ munkatársainak, különösképpen *dr Ábrahám Istvánné* vezető felügyelőnek őszinte köszönetét fejezte ki. Elismeréssel állapította meg hogy eddig ritkán volt ilyen olajozottan futó ankét.

Kovács Lajos búcsúszavaiban annak a reményének adott kifejezést, hogy a résztvevők az itt Zalaegerszegen hallottakat a tanításban jól hasznosítják, városunk fejlődési törekvéseinek jó hírét viszik szerte.

NÉHÁNY MÓDSZERTANI MEGJEGYZÉS A KINEMATIKA ÉS DINAMIKA ELEMEINEK TANÍTÁSÁHOZ A GIMNÁZIUM II. OSZTÁLYÁBAN

Farkas Gyula
Tapolca, Batsányi János Gimnázium

Bevezetés

Jelenleg a középiskolás (gimnáziumi) tanulók a gimnázium II. osztályában tanulnak először fizikát. Életkoruk és szellemi fejlettségi szintjük jóval meghaladja azt, ahogyan fizikát általános iskolában tanultak; arról nem is szólva, milyen gazdag a való életről, a természetről szerzett tapasztalatuk, a termelő munkában való jártasságuk. Mivel fizikával egy évig alig, vagy egyáltalán nem foglalkoztak a tanulók, így a már tanult fizikai fogalmak is rendkívül heterogén módon élnek nagy többségükben.

Célunk és feladatunk is az, hogy elsősorban a tantárgyat megszerettessük a tsnulókkal, felkeltsük érdeklődésüket. El kell érnünk azt, hogy a tanítványainknak az az érzése támadjon, hogy fizikaórán nem csak fizikát tanulnak, hanem a körülöttünk levő élettel, a valóságos világgal ismerkednek.

Az oktatás-nevelés folyamatában mindig arra kell építenünk, amit a tanulók ismernek és tudnak. Meg kell teremtenünk az egyes területeken és tantárgyakban szerzett ismeretek szintézisét, és észrevétlenül is úgy kell formálnunk tanulóink gondolkodásmódját, hogy kevés képlet memorizálásával is el tudjanak igazodni a jelenségek és fizikai problémák között, elkerülve a képletszerű gondolkodást. A tiszta és világos fogalomalkotás, jelenségmeglátás megkönnyíti a megértést, a megértés széppé teszi a tantárggyal való foglalkozást.

A fenti gondolatok sugallták számomra azt, hogy a témakört a szokásos tankönyvi sorrendtől eltérően, bár nem alapvetően új felépítésben, de sok új tartalommal megtöltve tárgyaljam.

A tananyag felépítésének kérdése

A tanulóknak konkrét tapasztalatuk és élményük van a mozgásokról, a mozgásformákról. Az ezekkel kapcsolatos fogalmak, mint a sebesség és gyorsulás, többnyire helyesen alakult ki a tanulók többségében (vagy legalábbis az élményszerű tapasztalás a tanulók mindegyikében meg van). A gimnázium I. osztályában bőségesen oldanak meg mozgási feladatokat, melyek színvonala sokszor meghaladja a II. osztályos fizika tankönyvben szereplő feladatokét. Függvényszerű gondolkodásuk kialakítása érdekében foglalkoznak a mozgások út-idő függvényével, az egyenes és fordított aránnyal és ezek függvényalakjával. Tanulták az eltolás, elforgatás geometriai transzformációkat. Ezeket élővé tehetjük, ha kapcsolatba hozzuk a testek (merev testek) tranzlációs, illetve rotációs mozgásával; csak úgy, mint az eltolásvektort az elmozdulással (elmozdulásvektor). Különösebb gondot csak a sebesség és gyorsulás fogalmak precíz és körültekintő megfogalmazására kell fordítani, mintegy belopva a tanulók tudatába az ismert dolgokkal való foglalkozás közben.

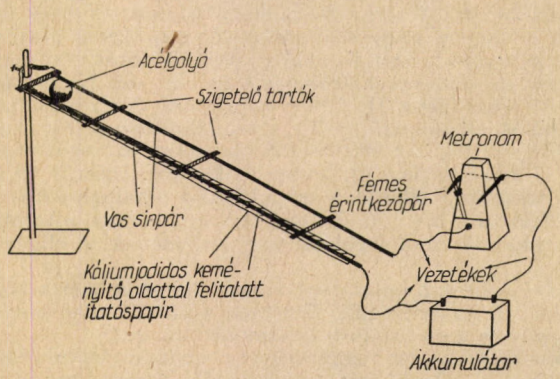
A fentiek azt igazolták számomra, hogy a tárgyalást mindenképpen a kinematikával kezdjem, és csak később kerüljenek tárgyalásra (a dinamika keretében) az olyan nehezebb és rendkívül elvont fogalmak, mint az erő és a tömeg. Tapasztalatom az, hogy a tanulóknak az utóbbi két fogalomról rendkívül hamis képük van. Elgondolásom, hogy az egyszerűtől haladjunk a nehezebb, elvontabb felé úgy, hogy az utat a tárgyalás közben adódó kérdések és problémák határozzák meg.

Következzék most néhány gondolat a témakör feldolgozásából:

A sebesség és gyorsulás

Az egyenes vonalú egyenletes mozgás nem ismeretlen a tanulók számára; Mikola-csöves vagy légpárnás kísérletet végeztethetünk mérési gyakorlaton (ekkor történhet a mérőeszközök ismertetése, a mérés pontosságával kapcsolatos problémák megbeszélése; mérési hiba kiszámítása). Elkészítik a mozgás út—idő grafikonjait. A grafikonok közös értékelése során könnyen megállapítható az egyenes arányosság a megtett út és a hozzá szükséges idő között. Az $\frac{s}{t}$ = állandó mérőpáronként mégis különbözőknek adódik, bár a mozgás típusa — amit közben már a tanulók meg is fogalmaztak — természetesen azonos. Természetes most már a tanulók számára az, hogy ez az *állandó* az, ami az azonos típusú mozgásokat megkülönbözteti egymástól. Érdemes azonban azt megvizsgálni, hogy mit fejez ki ez az állandó. Kiderül ez a tört értékének vizsgálatából, abból, hogy mikor kicsi, illetve nagy az értéke, és mit jelent ez a fizikai valóság számára. Könnyen rájönnek a tanulók, hogy ez olyasmit fejez ki, amit a mindennapi életben is sebességnek nevezünk. Tehát ezt az állandót célszerű fizikai mennyiségként kezelni. Az ilyen típusú mozgás sebességét tehát a következőképpen értelmezzük: $\frac{\text{megtett út}}{\text{megtételhez szükséges idő}}$ $\left(\frac{s}{t} = v\right)$. Vigyáznunk kell, mert itt még nem általában a mozgások sebességét ismerték meg a tanulók. Nem haszontalan felvetni azt a kérdést sem, hogy a sebesség értelmezett egységei milyen nagyságrendűek (nagyok, kicsik, vagy átlagosak?). Egyébként a kérdést tanulságos dolog másutt is feltenni. Érdekes módon például az idő egységei közül a sec egységet nagyon kicsinek ítélik meg, pedig ennél lényegesen kisebb egységeit mérjük, sőt érzékeljük is (gondoljunk csak a biológiai reflexidőkre). A sebesség vektorjellegének kidomborítása érdekében elegendő csak arra hivatkoznunk, hogy a természetben lejátszódó folyamatoknál lényeges a folyamat iránya is. Így a megtett út helyett az elmozdulásvektor több információt ad a jelenségről, hisz a megtett út nagyságán kívül tartalmazza a mozgás irányát is. Ha jó a természeti jelenségekre használt eddigi matematikai modell, akkor matematikai ismereteik alapján: $\frac{1}{\Delta t} \cdot \vec{\Delta s} = \vec{v}$; a sebességvektor iránya a pillanatnyi elmozdulás irányával egyezik.

Ezek után olyan feladatokat, problémákat vethetünk fel, hogy az eddig tanult fizikai mennyiségek hogyan függnek a vonatkoztatási rendszertől. Ilyen típusú feladatok színvonalban is megfelelők találhatók az I. osztályos matematika tankönyvben. (Gondolok itt adott sebességű járművek egymáshoz viszonyított sebességének meghatározására; vagy mozgó járműveken történő mozgások, elmozdulások számítására; vagy csónak folyón történő mozgásával kapcsolatos feladatokra. Szerepeltetni kell a mozgások s-t, v-t grafikonjainak elkészítését, és adott grafikonokról a mozgások lehetséges adatainak



1. ábra

kiolvastatását. Feltétlenül módot kell adni olyan feladatok megoldásának is, amelyek a sebességvektorok összegezésére vonatkoznak.) Össze kell vetni az egyenes vonalú egyenletes mozgás s-t és v-t grafikonjait! Hogy milyen szoros a két függvény közötti kapcsolat az a későbbiek során is nagyon hasznos lesz számunkra.

Az átlagsebesség bevezetése már sejteti a tanulókkal, hogy a természetben lejátszódó mozgások többnyire nem azonosak a fent leírtakkal.

A lejtőn legördülő golyó mozgásának vizsgálata vezet el egy újabb típusú mozgáshoz. A mozgás s-t grafikonja több féle módon elkészíttethető a tanulókkal mérési gyakorlaton. Nagyon élvezetes és tanulságos a tanulók számára a módosított Galilei-lejtőn történő mérés. Megoldható ugyanis az, hogy a mozgó golyó pillanatnyi helyét a metronom kattanásakor a káliumjodidos keményítő oldattal felitatott itatóspapíron elektrolízis útján maga a golyó jelöli meg (1. ábra). Az elkészített s-t grafikon (függvény) elemzése során könnyen rájönnek a tanulók matematikai ismereteik alapján az $s \sim t^2$, $s = k \cdot t^2$ megállapítására, ahol k szintén egy állandó, amely az ilyen azonos típusú mozgásokat különbözteti meg egymástól. Tehát e konstansnak van fizikai tartalma! Mindenekelőtt azt kell megvizsgálni, ami ezen mozgástípust az előzőleg tanult mozgástípustól megkülönbözteti. Ez pedig az, hogy az út/idő hányados különböző időtartamokra más-más értéket ad. Felmerül a kérdés, hogyan értelmezzük az ilyen típusú mozgás sebességét? (a sebesség fogalmával már találkoztak a tanulók, de a fogalom igazi tartalmát most kell elmélyíteni). A probléma azért is nehéz, mert a szükséges matematikai apparátust csak egy évvel később tanulják a tanulók. Most is a tanulók konkrét gyakorlati tapasztalataikra, élményeikre kell támaszkodnunk. Természetes ugyanis számukra az, hogy ha két mozgó test bármely vonatkoztatási rendszerben tartósan együtt halad, akkor sebességük is azonos. Adódik most már a módszer, hogy ugyanis a változó mozgást végző testet valamilyen módon követni kellene ismert sebességű, tehát egyenletes mozgást végző testtel, melynek ismert sebessége a változó mozgást végző test adott szakaszra számított átlagsebessége. A közelítés tehát szakaszonként egyenletes mozgással történik. Így természetes, hogy az ismeretlen sebességű és az ismert sebességű testek szakaszonként (időtartamonként) egyszer-egyszer egy pillanatra egymás mellett fognak haladni. Összehasonlítást természetesen csak akkor tehetünk a két mozgó test sebessége között, ha azok mindenütt, esetleg „gyakran", vagy majdnem mindenütt egymás mellett haladnak. Ha a szakaszokat (időtartamokat) lerövidítjük, akkor elvileg elérhető, hogy bármely kicsi időtartamonként a két test „egy pillanatra" együtt haladjon. Nagyon kicsi időtartamokkal számolva természetes, hogy a két test nagyon nem távolodhat el egymástól, vagyis *„majdnem mindig együtt halad"*.

A fenti gondolatkísérletet számítással és az ún. lépcsős függvénnyel is kísérjük a jobb megértés érdekében. (A grafikonokat célszerű előre elkészíteni írásvetítő fóliákra; minden lépést külön fóliára, és egyszerre csak két fóliát hagyjunk egymás felett, ami a gondolat egyes lépéseit mutatja.)

A fenti módszerrel két fontos dolgot intéztünk el egyszerre:

a) Megadtunk egy módszert *bármilyen* mozgást végző test pillanatnyi sebességének értelmezésére és kívánt pontosságú meghatározására.

b) Extrapoláltunk egy függvényt; mozgásunk sebesség—idő függvényét.

Az *a)*-nál meg kell említenünk és fel kell a figyelmet hívni arra, hogy nem valami nagyvonalúságról van itt szó, hiszen pontosabb sebességmeghatározást tesz ez lehetővé, mint amilyen pontosan távolságot, vagy időt mérni tudunk, vagy lehet. Így a $\frac{\text{tetszőlegesen kicsi út}}{\text{megtételhez szüks. idő}} =$ pillanatnyi sebesség, a mérési pontosságnak megfelelően, elfogadható a sebesség értelmezéseképpen $\left(\text{amit } \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = v \text{ itt még nem lehet és nem is kell felírni}\right)$.

A pillanatnyi sebességet tehát a következőképpen értelmezzük egy adott időpontban: Az időpont környezetében a mérés pontosságnak megfelelően választott és mért időtartamhoz megmérjük a megtett utat; és a kettő hányadosa adja a pillanatnyi sebességet a mérési pontosságnak megfelelően $\left(v = \frac{\Delta s}{\Delta t}\right)$.

Az elkészített (extrapolált) v-t függvényből a tanulók könnyen megállapítják az egyenes arányosságot v és t között. Tehát a $\frac{v}{t} =$ áll.

És valójában ez az a mennyiség, amely az azonos típusú mozgásokat megkülönbözteti egymástól. Ugyanis a tört értékének vizsgálatából az derül ki, hogy ez az állandó azt fejezi ki, hogy a test milyen mértékben *változtatja sebességét*. Ezért nevezzük el gyorsulásnak (a). A gyorsulás is vektor, hiszen $\frac{1}{\Delta t} \cdot \vec{\Delta v} = \vec{a}$. A gyorsulásvektor tehát a sebességváltozás $(\vec{v_2} - \vec{v_1})$ irányába mutat. Mivel az itt megismert a gyorsulás az ilyen típusú mozgásokat különbözteti meg egymástól, és a korábban megismert $s = k \cdot t^2$ összefüggésben a k konstans is, így kell lenni a kettő között valamilyen kapcsolatnak. Rávilágít a dologra az, ha megnézzük a v-t függvény alatti területet egy adott intervallumban, hisz az a megtett út mérőszámát adja. Így egyszerűen eljutunk az $s = \frac{a}{2} \cdot t^2$ összefüggéshez, amelyből látszik, hogy k a gyorsulás fele. Hogy miért nevezzük e mozgástípust egyenletesen változónak, azt a tanulók most már könnyen megválaszolják. Mindössze két összefüggést ismertek meg a tanulók e mozgástípusra $\left(a = \frac{v}{t} \text{ és } s = \frac{a}{2} \cdot t^2\right)$ és ezt elegendőnek is tartom ahhoz, hogy feladatokat tudjanak megoldani; természetesen, ha ismerik ezek érvényességi körét és a bennük szereplő betűk fizikai tartalmával is tisztában vannak. Meg lehet és kell is ezekkel az összefüggésekkel olyan feladatokat megoldani, melyek nem zérus kezdősebességű mozgásokra vonatkoznak. Célszerű kezdetben csak olyan jellegű problémákat felvetni, melyek a gyorsulás irányának meghatározására vonatkoznak. Ilyen kérdések lehetnek az induló, ill. megálló lift, vagy jármű gyorsulásának iránya. A számításos feladatok mindenképpen olyan, a gyakorlati életből vett példák legyenek, melyek nem csupán a képletekbe való egyszerű behelyettesítések. (A gyorsulás egységeinek megállapításánál mindenképpen célszerű kitérni az egységek nagyságrendjének kérdésére. Ha a tanulókban felmerül a nem állandó gyorsulás kérdése, akkor ugyanúgy járhatunk el, mint a változó mozgás sebességénél.)

A különböző hajlásszögű lejtőkön végzett kísérletek, ill. gyorsulásmérések elvezetnek a szabadesés problematikájához. (Nem szabatosan szólva: „90°-os lejtő esete a szabadesés".) Felmerül ezzel kapcsolatban két fontos kérdés:

1. A mennyiségi változás nem okoz-e minőségi változást a mozgásformában? Van-e más testeknek szerepe egy adott test mozgásánál?
2. Bár a szabadesést mérési gyakorlaton is vizsgáljuk, mégis furcsának és nem megmagyarázottnak hat számukra az, hogy különböző testek légüres térben együtt esnek. Felvetődik a kérdés, hogy magának a testnek van-e olyan tulajdonsága, amely a mozgás szempontjából lényeges?

Ezen utóbbi kérdéscsoport vezet el didaktikailag a dinamika problémaköréhez.

Az erő és a tömeg

(Newton-axiómák; erőtörvények)

A dinamika tárgyalását célszerű a fentebb már említett gondolatok megfogalmazásával kezdeni, nevezetesen mi az, ami a dinamika tárgykörébe tartozik?

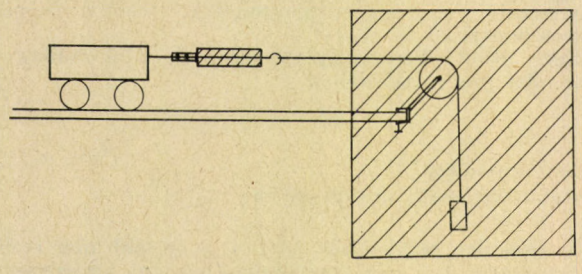
A dinamika tárgya: Olyan kérdésekre ad választ, hogy:

a) más testeknek van-e szerepe egy adott test mozgásánál,

b) magának a mozgó testnek van-e olyan tulajdonsága, amely a mozgás szempontjából lényeges.

Az *a)* kérdésre könnyen megbeszélhetjük a választ a tanulókkal: hogy a testek önmaguktól képtelenek mozgásállapotukon változtatni, másrészt konkrét mozgásállapotváltozásoknak mindig sikerült konkrét materiális forrását találni. Ezek után már természetes, hogy ha egy test más testek hatásaitól mentes, akkor a legtermészetesebb mozgása az egyenes vonalú egyenletes mozgás. Axiómaként mondjuk ki a természeti törvényt, Newton I. axiómáját.

Rögtön kínálkozik a helyzet arra, hogy az I. axióma következményeit megbeszéljük a tanulókkal: Ha egy testnek a sebessége megváltozik, akkor azt csak más test, vagy testek hatásának tulajdoníthatjuk. Ha nincs gyorsulás (v = állandó), akkor a test hatásmentes állapotban van (vagy a hatások egyensúlyban vannak). Az erőt tehát úgy definiálhatjuk, mint más test, vagy testek olyan hatása, amely a testen mozgásállapotváltozásban nyilvánul meg. Mindjárt azt is meg kell jegyeznem, hogy az erőként definiált hatás a testeken a mozgásállapotváltozással egyidejűleg deformációt is okoz. A gyorsulás és deformáció nehezen szétválasztható megnyilvánulásai az erőnek, ezért az adott szinten kár lenne bármelyiket is túlhangsúlyozni. (Lásd még Jánossy—Párkányi: Az erő és tömeg fogalma... Fizikai Szemle, 1972/12.) A fenti gondolatmenetből kiderül az is, hogy az erő és gyorsulás között kell lenni valamilyen kapcsolatnak, melyet tanulóink is könnyen belátnak. Ahhoz, hogy e kapcsolatot feltárjuk szükségünk van egy kvantitatív erőskálára. Az erőskálát (az erő egységei nélkül) az erő deformációs hatása alapján készíthetünk. Tulajdonképpen előre kell bocsájtanunk a lineáris erőtörvényt, hiszen erőtörvény nélkül Newton II. törvényének állítása dinamikai felépítésben meggyőző módon kísérletileg nem igazolható. Az erőskála felvétele után végezzük el a 2. ábra szerinti mérőkísérletet. Hitelesített rugót csatlakoztatunk a kiskocsihoz, és azt vizsgáljuk, hogy a rugó megnyúlásának függvényében mekkora a kiskocsin okozott gyorsulása. A csigán átvetett fonálon lógó test biztosítja a rugó állandó megnyúlását (az állandó erőt). A kísérlet utóbbi részét el is takarhatjuk a tanulók elől. Táblázat és grafikon készítése után az $\frac{F}{a}$ = állandó mérési eredményhez jutunk. Érdemes a kapott mérési eredményt tüzetes vizsgálat alá vetni: hogy vajon mit fejez ki az imént kapott állandó, van-e fizikai tartalma, és jellemez-e valamit? Most is, mint eddig tettük a tört értékét vizsgáljuk! Mikor nagy, illetve kicsi a tört értéke? Mit jelent ez utóbbi a fizikai valóság számára? Ha ezt a vizsgálódást a tanulókkal közösen elvégezzük, akkor az derül ki, hogy ez az állandó a mozgásban levő testnek egy *tulajdonságára* utal, arra, hogy hogyan viselkedik a gyorsító hatással szemben. Milyen mértékben hagyja magát gyorsítani, ill. milyen mértékben tehetetlen a hatással szemben. Kézenfekvő tehát, hogy ez az állandó a test egy olyan *tulajdonsága*, amely a mozgás (gyorsítás) közben nyilvánul meg, amit célszerűen tehetetlenségnek (tehetetlen tömegnek) neveztek el. A tulajdonság megnyilvánulásában nincs szerepe annak, hogy milyen irányú a mozgás. Így a tömeg, mint fizikai mennyiség tehát skalár. A mechanika eddigi matematikai modelljébe az erő viszont vektorként vonul be, hiszen $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$. Az erővektor iránya a gyorsulásvektor irányával egyezik. A koncentrált (egy pontban ható) erő az erőfogalomnak csak egy megideologizálását jelenti, amely a dinamikai problémák jelentős részénél jól használható eszköz a birtokunkban a valóság kellő pontosságú közelítésében, leírásában. Nem szabad megfeledkeznünk arról, hogy a természet ennél sokkal bonyolultabb és gazdagabb; a természet megismeréséhez, megértéséhez közelebb juttatjuk tanulóinkat, ha a fogalmakat tisztán, több oldalról megvilágítva tárjuk elébük.



2. ábra

Megismertettük a tanítványainkkal a leglényegesebb természeti törvényt, a dinamika alapegyenletét úgy, hogy eddig sem az erő, sem a tömeg egységei nem voltak értelmezve. Viszont azonos hatások (erőhatások) különböző testeken mért gyorsulásaiból (melyek megvalósíthatók) a testek tömegeinek aránya meghatározható. Ugyanis $F = m_1 \cdot a_1 = m_2 \cdot a_2$ összefüggésből $\frac{m_1}{m_2} = \frac{a_2}{a_1}$ És ennél többet eddigi eszközeinkkel meghatározni nem tudunk. Ha tehát tömeget akarunk mérni, akkor ahhoz értelmezni kell az egységnyi tömeget. Azt hiszem, hogy ebben a feldolgozásban derül ki igazán az, hogy miért kell definiálni az egységnyi tömeget, és miért kezeljük a tömeget alapmennyiségként a fizikában! A tömegetalon tehát egy konkrét test, melynek gyorsítás közbeni tulajdonsága az 1 kg. A tömeg tehát testhez, anyaghoz kötött, amire érdemes felhívni tanítványaink figyelmét. Csak megemlítem, hogy a tömeg ilyen módon történő bevezetése („tömeg = tulajdonság") lehetőséget ad arra, hogy szólni lehessen az érdeklődés felkeltésének szintjéig a súlyos és tehetetlen tömeg fogalmáról; és nem kelt megdöbbenést tanulóinkban a relativisztikus tömegeffektus; és könnyebben megközelíthető lesz számukra a tömegenergia ekvivalencia is.

A tömeg egységeinek ismeretében értelmezhetők most már az erő egységei is; és tulajdonképpen birtokunkban van egy módszer az erő és tömeg mérésére (dinamikai módszer). A korábban már használt hitelesített rugó az erő egységeinek ismeretében alkalmas az erő sztatikai mérésére is (dinamométer). Az $F = D \cdot x$ lineáris erőtörvény adja az erő sztatikai mérésének elvi alapját. A tanulók figyelmét azonban arra is fel kell hívni, hogy mi a *tartalmi különbség* a formailag hasonló $F = m \cdot a$ dinamikai alapegyenlet (mozgásegyenlet) és az $F = D \cdot x$ erőtörvény között. Az ezekkel kapcsolatos feladatok és újabb erőtörvény megismerése rá fog világítani a tartalmi különbségre.

Maradt még egy megbeszélésre érdemes kérdés a szabadesés kapcsán: Mi gyorsítja a szabadon eső testeket, és valóban állandó-e az a gyorsulás? A tanulók tudják, hogy a gyorsulás okozója (g) a test és a Föld között levő vonzás, hiszen erről földrajzi órán már hallottak. Minden okunk meg van arra, hogy itt ismertessük meg tanulóinkal az általános tömegvonzás törvényét (erőtörvényt!). Ha van lehetőségünk mérőkísérletet végezni, akkor az nagyon tanulságos, ha pedig eszköz hiányában mérést nem tudunk végezni, akkor különösen kár lenne ennek megtanítását egy évre elhalasztani. Ha megismertetjük tanulóinkkal az $F = f\frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$ erőtörvényt, akkor lehetőségünk nyílik arra, hogy a felvetett kérdésekre választ adjunk, és néhány dologra ennek kapcsán rámutassunk:

1. $f \cdot \frac{M \cdot m}{R^2} = mg$ egyenletet gyakran fel szoktuk írni, amelyből a Föld tömegét szoktuk kiszámíttatni tanulóinkkal a rendelkezésre álló többi adatból. Nem haszontalan az egyenletet g-re rendezni sem: $g = f \cdot \frac{M}{R^2}$, tehát g csak a Föld tömegközépponjától való távolság függvénye. Könnyen becslést adhatunk

arra is, hogy mekkora az a felszíni réteg, amelyben adott tizedes jegyig a g állandónak tekinthető. A g változásának egyik okozója a Föld tömegközéppontjától való távolság változása.

2. A súly $G = m \cdot g \left(= m \cdot \frac{f \cdot M}{R^2}\right)$ szintén egy *erőtörvény*, a gravitációs erőtörvény. Ezt a tényt tankönyveink sem hangsúlyozzák kellőképpen, tanulóink pedig gyakran azonosítják helytelenül az $F = m \cdot a$ dinamikai alapegyenlettel.
3. A gravitációs erőtörvény adja meg a tömeg sztatikai mérésének elvi alapját is, amire szintén nyomatékosan fel kell hívni tanulóink figyelmét.

A teljesség igénye nélkül vázoltam fel néhány gondolatot azok közül, amelyek az oktatási gyakorlatomban, a témakör tanítása kapcsán bennem felmerültek.

IRODALOM:

Budó Ágoston: Kísérleti fizika I.

Jay Orear: Modern fizika

R. P. Feynman: Mai fizika I.

Jánossy—Párkányi: Az erő és tömeg fogalma. Fizikai Szemle, 1972/12

Légrádi Imre: Módszertani megjegyzés... A fizika tanítása, 1975/3.

KONZERVATÍV RENDSZEREK HELYETTESÍTŐ RENDSZEREI

Horváthy Péter

ELTE TTK V. éves matematika szakos hallgató

Bevezetés

Az 1975/76-os tanév első félévében a Fővárosi Fazekas Mihály gimnáziumban tartottam szakkört. Célom a fizika — első sorban a mechanika — módszereinek és eszközeinek emberközelbe hozása volt. Arra törekedtem, hogy ezeket a módszereket úgy tárgyaljam, hogy egy középiskolás is megérthesse. A hallgatóság a gimnázium kiemelt matematikai osztályának negyedikes diákjaiból került ki. Így az átlagosnál jobb matematikai ismeretekre és fejlett poroblémamegoldó gondolkozásra támaszkodhattam. A diákok persze azért nem ismerhették behatóan a tárgyaláshoz igazából szükséges apparátust. Célom éppen az volt, hogy megkeressem ezen eljárások *konkrét, szemléletes fizikai* tartalmát. Precíz matematikai bizonyítások helyett konkrét példákat, problémákat tárgyaltam. Elvem az volt, hogy most, a gimnázium végén az a cél, hogy a diákok megértsék a vizsgált módszerek fizikai lényegét. Az általános levezetéseket majd egyetemista korukban sajátítják el. Ebben az értelemben szakköröm az egyetemre (de nem a felvételi vizsgára) készítette elő a diákokat.

Örömmel tapasztaltam, hogy a hallgatóság megértette az itt tárgyalt problémákat. Lelkesedtek az új, szemléletes és egyben hathatós matematikai-fizikai módszerekért. Úgy érzem, a legtöbben közülük magukévá tették ezt a — számukra újszerű — felfogást.

A megértés szempontjából döntő volt az, hogy a diákokat bevonjam aktívan a munkába. Ebből a célból feladatokat adtam nekik, és néhány témakört maguk dolkoztak föl útmutatásaim alapján.

Konzervatív rendszerek leírása

Az olyan mechanikai rendszereket hívják konzervatívnak, melyekre érvényes az energia megmaradásának tétele: Ha a rendszer kinetikus energiáját T, potenciális energiáját V jelöli, akkor a mozgás során végig:

$$T + V = E = \text{const.}$$

A fontos az, hogy ez a rendszer *minden lehetséges* mozgása esetén teljesül.

Tekintsünk egy tömegpontot mint legegyszerűbb mechanikai rendszert. Lehetséges helyzeteinek összességét nevezzük KONFIGURÁCIÓS TÉR -nek, jelölje azt Q. Ekkor a mozgást tetszőleges kezdeti feltétel esetén egy

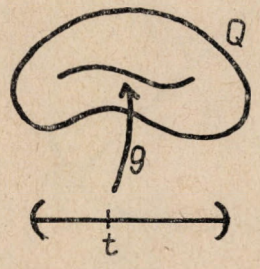
$$g: t \to g(t) \varepsilon Q$$

folytonos (sőt differenciálható[1] görbe írja le. (1. ábra.)

Ha a tömegpont a térben szabadon elmozdulhat, akkor Q az egész tér, $Q = R^3$.

[1] Itt nem foglalkozunk avval, mikor nevezünk egy függvényt differenciálhatónak.

A rendszer konzervatív voltára tett feltevésünk azt jelenti, hogy a testre ható erő potenciálból származtatható. Ezen a következőket értjük: Megvizsgáljuk milyen erő hat a tömegpontra a tér különböző pontjaiban. Azt tapasztaljuk, hogy ez a hatóerő nem függ a test mozgásállapotától, csak attól, a konfigurációs tér mely pontjában tartózkodunk. Vagyis a testre ható erő egy *függvény* Q-n („térerő"). Ez a erőtér pedig olyan, hogy a konfigurációs tér tetszőlegeses kiszemelt pontjából egy másik pontba menve, a végzett munka független az úttól, amin mentünk, és csak a végpontoktól függ. A tér egy tetszőleges pontját rögzítve, minden ponthoz hozzárendelhető az a munka, melyet a tér végez, ha a rögzített pontból a tekintett pontba megyünk. Ez a szám tehát a potenciál(is energia).



1. ábra

A mozgást egy másodrendű differenciálegyenlet, a Newtontörvény határozza meg.

$$(*) \qquad m\ddot{q} = F(q)$$

ahol a kezdeti feltétel:

$$(t_0, q_0, v_0)$$

ami azt jelenti, hogy a t_0 időpontban a q_0 ponton kell áthaladnia a testnek, mégpedig v_0 sebességgel.

A fizika feladata, hogy adott kezdeti feltételek mellett meghatározza a mozgást.

Matematikailag: a (*) differenciálegyenletet kell megoldani. Ezen azt értjük, hogy olyan

$$g: t \to g(t)$$

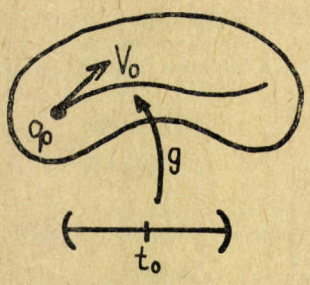
Q-beli görbét kell keresni, melyre egyrészt:

$$g(t_0) = q_0$$

$$\dot{g}(t_0) = v_0$$

vagyis átmegy a q_0-on és ekkor a sebessége v_0;
másrészt a t időhöz tartozó görbepontban a második derivált (gyorsulás) éppen a Newton-törvény által adott:

$$\ddot{g}(t) = \frac{F(g(t))}{m}$$



2. ábra

A szabad tömegpontot tehát három adattal jellemezhetjük:

1. hol mozog? ez a konfigurációs tér, Q
2. mekkora a tömege, m
3. a konfigurációs téren adott erőtörvény: $F : Q \to R^3$ függvény.

Így NEWTON-FÉLE LEÍRÁSON a

$$(Q,m,F)$$

hármas megadását értjük.

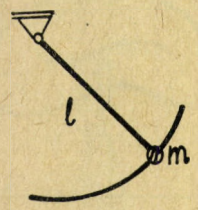
Konzervatív rendszerek esetén az F helyettesíthető a potenciállal: az ilyen rendszerek tehát megadhatók

$$(Q,m,V,)$$

alakban is.

Mi van azonban, ha a tömegpont nem mozdulhat el szabadon a térben, hanem valamiféle „kényszer" korlátozza a mozgást? Például:

1. PÉLDA: Matematikai inga l hosszúságú fonál végére kis m tömeget erősítünk. Írjuk le a mozgást (3. ábra).



3. ábra

Megoldás: Annak a „kényszernek" kell most teljesülnie, hogy a test végig a feszes fonál végén maradjon, azaz pályája a kör egy íve lehet. Hogy ez teljesüljön, ahhoz kell, hogy a nehézségi erőn mint „szabaderőn" kívül még egy másfajta ún. „kényszererő" is hasson a testre. Ez a K kényszererő nem ismert eleve, nem adhatjuk meg a mozgás konkrét lefolyásának ismerete nélkül. K-t éppen abból a feltételből határozhatjuk meg, hogy a mozgás az előírt pályán történik.

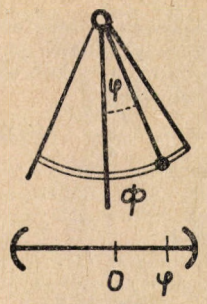
A konfigurációs tér itt nem az egész tér, hanem annak csak egy része, nevezetesen a fölfüggesztési pont körül „l" sugárral írt kör egy íve.

Egy lehetséges eljárás az lenne, hogy a Newton-törvényt kiegészítenénk az ismeretlen K kötélerő hozzávételével, és a Newton-egyenlethez hozzávennénk azt is, hogy a test végig az előírt pályán marad.

Konzervatív rendszereknél van egy másik eljárás is. A Q konfigurációs teret — jelen esetben a körív — valahogy „belsőleg" koordinátázzuk. A kérdés az, hogy ezen belső koordináták halmaza fölfogható-e úgy, mint egy elképzelt tömegpont elképzelt mozgásának konfigurációs tere? Vagyis:

PROBLÉMA: Lehetséges-e az eredetileg vizsgált rendszert egy olyan képzeletbeli rendszerrel helyettesíteni, melynek konfigurációs tere éppen a „belső koordináták" halmaza? (4. ábra.) Megköveteljük persze ekkor, hogy a „helyettesítő rendszer és az eredeti „egyszerre" mozogjanak.

Lássuk konkrétan, mit értünk ezen.



4. ábra

Az inga helyzetét kézenfekvő a fonál függőlegessel bezárt szögével jellemezni. Legyen ez φ. Ha a q végigfut a körív, ez a φ egy nyílt intervallumot ír le a számegyenesen. Így kölcsönösen egyértelmű kapcsolat létesíthető a Q konfigurációs tér és egy valós számokból álló intervallum között (4. ábra). Van tehát egy Φ leképzés, mely a körív minden pontjához hozzárendel egy valós számot, a fonál függőlegessel bezárt szögét.

$$\Phi : Q \to R$$

$$\Phi\,(q) = \varphi$$

$$\Phi\,(Q) \subseteq R \text{ nyílt intervallum.}$$

Ezt a Φ-t nevezzük térképező leképezésnek, $\Phi(Q)$ a térkép. Problémánk átfogalmazása: tekinthető-e a térkép egy olyan egyenesvonalú mozgás színterének, mely helyettesíti az eredeti mozgást, azaz az azonos időhöz tartozó reális és térképbeli pontok egymásnak felelnek meg a Φ leképezés által.

Az előzőek értelmében egy olyan fizikai rendszert — vagyis (Q',m',F') hármast — kellene megkeresni, mely helyettesítené eredeti rendszerünket:

$$Q' = \Phi\,(Q)$$

így csak a „helyettesítő tömeget" és „helyettesítő erőteret" kell keresni.

Konzervatív rendszerről lévén szó, erőtörvény helyett lehet potenciált is keresni.

A helyettesítő rendszer megkeresésére a következő módszer lesz alkalmas:

Fejezzük ki az inga összes energiáját a szög függvényeként:

A kinetikus energia, T:

$$T = \frac{1}{2} m \quad v^2 = ml^2\omega^2/2$$

ahol ω a szögsebesség: $\omega = \dot{\varphi}$

A potenciális energia:

$$V = mg\,l(1-\cos\varphi)$$

És most döntő észrevételünk: ez éppen olyan tömegpont mozgását jellemző megadás, melynek helykoordinátája φ, tömege m, az erőtörvény

$$F'(\varphi) = -mgl\sin\varphi$$

És éppen ez volt a célunk: találtunk egy helyettesítő rendszert.

$$Q' = \Phi(Q) \; R \text{ intervallum}$$

$$m' = ml^2$$

$$F'(\varphi) = -mgl\sin\varphi$$

Ezután a megoldás már közismert: kis szögek esetén a rendszer helyettesíthető egy másikkal. A helyettesítés itt nem ugyanaz, mint az előzőekben: most nem pontos, csak közelítő helyettesítéssel van dolgunk. Szokás szerint $\sin\varphi$ helyett φ-t írunk. Vagyis: a testre ható erőtörvényt megváltoztatjuk. Szemléletesen érezzük, hogy így a rendszert csak „kicsit változtattuk meg", és így az új rend-

szer mozgása „közel" lesz az eredetihez. Ez bizonyítható, itt nem részletezzük. (A fizikusok ezt az eljárást hívják linearizációnak.) Végezetül tehát az ingát „helyettesítve" majd „linearizálva" kapjuk:

$$Q'' = \Phi(Q)$$

$$m'' = ml^2$$

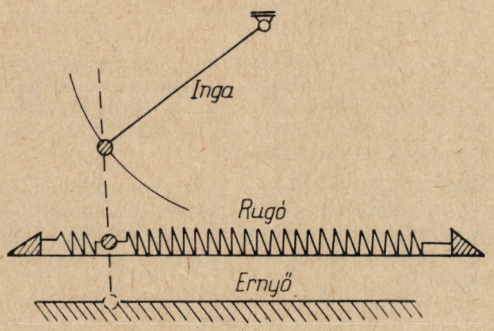
$$F''(\varphi) = -mgl\varphi$$

Itt pedig örömmel ismerjük föl egy m'' tömegű, $D'' = mgl$ direkciós erejű rugó végén, egyenes mentén rezgő tömegpont adatait.

AZ INGA HELYETTESÍTHETŐ TEHÁT EGY LINEÁRIS REZGÉST VÉGZŐ RUGÓ VÉGÉN FÜGGŐ TÖMEGPONTTAL.

Az így kapott helyettesítő rendszer persze nem az egyetlen. Másik ilyen kapható úgy, ha az „általános koordinátaként" a szög helyett pl. az ívhosszat vesszük. Szemléletesen: a egyenest „fölcsavarjuk" a körív kerületére. Ez a helyettesíthető rendszer könnyen demonstrálható is:

DEMONSTRÁCIÓ: Az adatok megfelelő választásával elérhető, hogy egy hosszúságú fonál végén kis kitéréssel lengő test és alatta egy rugó végén rezgő tömegpont árnyéka az ernyőn jó közelítéssel egybeessen (5. ábra.)



5. ábra

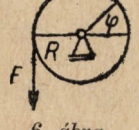
Most már azt is értjük, miért jó megtalálni egy helyettesítő rendszert: a helyettesítő rendszer adatai között a kényszererő nem szerepel, és így a leírás könnyebb lesz. Könnyebb lesz azért is, mert egyszerűbben tárgyalhatunk egy lineáris problémát, mint egy síkbelit.

Végezetül képzeljük el, hogy valamiféle „lények" élnek az inga mentén. Ezek a lények nem tudnak arról, hogy az inga pályáján kívül is létezik világ. Ők csak olyan dolgokról tudnak, mely a körív mentén történnek. A kérdés az, hogy ők is föltalálhatják-e Newton mechanikáját, azaz csak a saját, belső adataikkal leírhatják-e a mozgást egy „tömegpont" segítségével. A jelen esetben ez sikerült. Kérdés: vajon sikerül-e általánosságban?

További példákat a függelékben találunk, a feladatok között.

Nézzük, alkalmazható-e ez az eljárás más, bonyolultabb rendszereknél is? Nevezetes példa a merev testek problémája. Előfordulhat, hogy a merev test helyzete is egyetlen adattal jellemezhető .Erre példa:

2. PÉLDA: Súrlódásmentesen csapágyazott korong kerületére fonalat csévélünk, és azt állandó erővel húzzuk. Írjuk le a mozgást.



6. ábra

Megoldás: Első eljárásunk abból állna, hogy alkalmazzuk a forgómozgás alapegyenletét. De ne feledjük, hogy ez tulajdonképpen egy származtatott módszer: alapvetően a Newton-törvényből kell kiindulnunk. A következőkben éppen a forgómozgás alapegyenletét vezetjük majd le, mégpedig előző eljárásunk segítségével.

A korong helyzetét célszerű az elfordulás szögével jellemezni. Legyen ez φ. Amennyiben a korong az összes lehetséges helyzetet fölvesz φ egy intervallumon változik. Célunk most hogy ezt a térképet egy képzeletbeli mozgás konfigurációs terének tekintsük, és így a valódi mozgást egy egyszerűbbel helyettesítsük. Kérdés: mi legyen a „tömeg" és az „erőtörvény". Ebből a célból most is kifejezzük a korong energiáját a szöggel:

$$T = \theta\omega^2/2 = \theta\dot{\varphi}^2/2$$

$$V(\varphi) = F \cdot R \cdot \varphi$$

ahol R a korong sugara. Ezt azért írhatjuk, mert ha a korong φ szöggel elfordul, akkor az erő munkája:

$$F \cdot R\varphi = F \cdot s$$

Ez pedig tekinthető egy V potenciálfüggvénynek, melyből az erő származik.

Vegyük észre, hogy így minden megvan:

$$E = T + V = \theta\,\dot{\varphi}^2/2 + F \cdot R\varphi$$

tekinthető egy θ tömegű, egyenes mentén mozgó tömegpontnak (helykoordinátája φ), melyre a φ pontban $F \cdot R$, a helytől független erő hat. Így kapjuk a forgó korong egy helyettesítő rendszerét:

$$Q' = \Phi(Q) \subseteq R \text{ intervallum}$$

$$m' = \theta$$

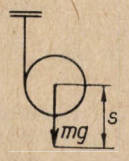
$$F'(\varphi) = F \cdot R$$

Ez pedig egyenes pályán egyenletesen gyorsuló tömegpont adatai.



7. ábra

3. PÉLDA: jojó. Korong kerületére fonalat csavarunk, a fonál másik végét a mennyezethez erősítjük. Hogyan mozog a korong; ha elengedjük?



8. ábra

Megoldás: A korong helyzetét most is jellemezhetnénk pl. a szögelfordulással. A változatosság kedvéért most inkább új paramétert választunk: legyen ez s, a korong süllyedésének mértéke. s nyilván egy intervallumban változik. Szeretnénk ezt az intervallumot egy helyettesítő rendszer konfigurációs terének fölfogni.

Fejezzük ki az energiát most is az „általános koordináta" függvényében:

$$T = [\theta\dot{s}^2/R^2 + m\,\dot{s}^2]/2$$

hiszen ha a korong φ szöggel fordul el, akkor eközben a kerületéről $R \cdot \varphi$ hosszúfonál csavarodik le, és középpontja $s = R\varphi$-vel kerül lejjebb. Ezért

$$\dot{s} = R\dot{\varphi}$$

A potenciálváltozás:

$$V = mgs$$

Az összes energia:

$$E = T + V = \frac{1}{2}[\theta/R^2 + m]\dot{s}^2 + mg\,s$$

És itt most egy
$\theta/R^2 + m$ tömegű,
s helykoordinátájú
tömegpont adatait ismerjük föl. Az erőtörvény: mg erő hat minden pontban. Vagyis:

$$Q' = \text{nyílt intervallum}$$

$$m' = \theta/R^2 + m$$

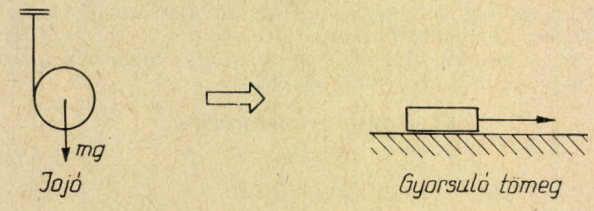
$$F(s) = mg$$

A megoldás a jól ismert egyenletesen gyorsuló mozgás. A jojó egy helyettesítő rendszere tehát egyenes menti, egyenletesen gyorsuló, m' tömegű tömegpont.
Ennek gyorsulása — az eredeti rendszert alkotó jojó tömegközéppontjának gyorsulása —

$$mg/(m + \theta/R^2)$$

Ha a korong homogén, akkor $\theta = mR^2/2$
és így a gyorsulás:

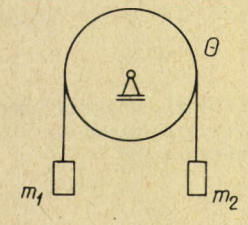
$$2g/3$$



9. ábra

Felmerül a kérdés, mi van összetett rendszereknél?

4. PÉLDA: θ tehetetlenségi nyomatékú fogaskerékre súlytalan láncot helyezünk, a lánc végére m_1 és m_2 tömegű testeket erősítünk. A korongot súrlódásmentesen csapágyazzuk. Hogyan mozog a rendszer?



10. ábra

Megoldás: Válasszuk paraméternek pl. az egyik test elmozdulását. A rendszer mozgását ekkor most is egy valós szám-paraméter jellemzi. Szeretnénk újra helyettesítő rendszert keresni. Vegyük észre, hogy az első test elmozdulásának függvényében úgy a kinetikus mint a potenciális energia fölírható

$$T = \frac{1}{2}m_1\dot{x}_1^2 + \frac{1}{2}m_2\dot{x}_2^2 + \Theta\dot{x}_1^2/R$$

$$V = -m_1 q x_1 + m_2 g x_1$$

És az összes energia:

$$E = T + V = \frac{1}{2}(m_1 + m_2 + \Theta/R^2)\,\dot{x}_1^2 + (m_1 - m_2)\,g x_1$$

és itt egy $m' = m_1 + m_2 + \theta/R^2$ tömegű,

$F(x_1) = (m_1 - m_2)\,g$ erőtörvény

hatása alatt mozgó tömegpont adatait találjuk.

Ez lesz tehát a helyettesítő rendszer:

$$Q' \subseteq R \text{ nyíltintervallum}$$

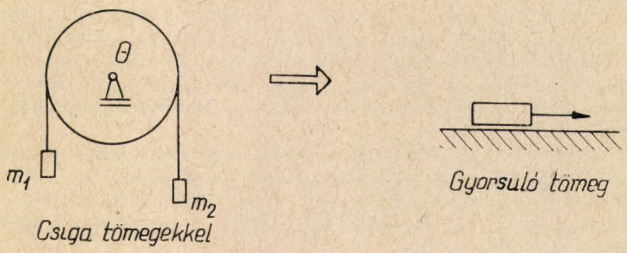
$$m' = m_1 + m_2 + \theta/R^2$$

$$F(x_1) = (m_1 - m_2)g$$

Ennek gyorsulása egyenletes,

$$\ddot{x}_1 = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2 + \theta/R^2}$$

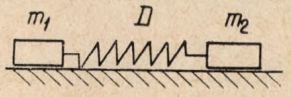
A térképezés választása következtében ez éppen az első kötél gyorsulása. A második kötél gyorsulása ezzel egyenlő. A fogarkerék szöggyorsulása pedig ennek $1/R$-szerese.



11. ábra

Valamennyi eddigi példánkban a mozgást végző test helyzetét egyetlen paraméter jellemezte: a helyettesítő rendszer mozgása 1 dimenzióban játszódott (ekkor mondjuk, hogy a rendszer szabadsági foka 1). Mi van több szabadsági fokú rendszereknél?

5. PÉLDA: Két, rendre m_1 és m_2 tömegű testet D direkciós erejű rugó köt össze. A testet vízszintes asztalon súrlódás nélkül mozoghatnak. Keressük meg a rendszer egy helyettesítő rendszerét és annak segítségével írjuk le a mozgást!

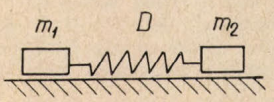


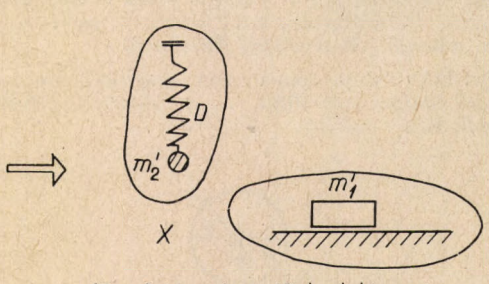
12. ábra

Megoldás: Most két paramétert vezetünk be: legyenek ezek a két test helykoordinátái.
Az energia:

$$T = m_1 x_1^2 + m_2 x_2^2$$

$$V = \frac{D}{2}(x_1 - x_2)$$





13. ábra

Itt van egy kis baj: ezek nem egyetlen lineáris mozgást végző tömegpont adatai. Vegyük észre, hogy ha belátnánk azt, hogy ez az energia — kifejezés tekinthető viszont két, egymástól f ü g g e t l e n ü l mozgó tömegpont adatainak, akkor készen lennénk: azok mozgása külön-külön meghatározható lenne, és így a rendszer „helyzetét" jellemző x_1, x_2 pár — melyet egy síkbeli pont koordinátáinak tekinthetünk — mozgása a koordinátákból rekonstruálható lenne. Szeretnénk a rendszert tehát két független lineáris mozgást végző tömegpontból álló rendszerre szeparálni. Ez lehetséges. Vezessünk be új koordinátákat:

$$X_1 = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2}{m_1 + m_2}, \quad X_2 = x_1 - x_2$$

(ezek a tömegközéppont és a relatív koordináták).
Ezekkel fölírva az összes energia már fölbomlik két szeparált részre:

$$T = \frac{1}{2}(m_1 + m_2)(X_1)^2 + \frac{1}{2}[m_1 m_2/(m_1 + m_2)](X_1)^2$$

$$V = D/2\,(X_2)^2$$

Ez pedig tekinthető két független tömegpont adatainak: mintha az első erőmentes térben mozogna: adatai:

Q_1' a konfigurációs tere, (itt fut X_1)

$m_1' = m_1 + m_2$ a tömege

0 az erőtörvény

A második tömegpont adatai:

Q_2' a konfigurációs tér (itt fut X_2)

$m_2' = m_1 m_2/m_1 + m_2$ a tömege

$F_2'(X_2) = -DX_2$ az erőtörvény.

Így rendszerünket most k é t ilyen függetlenül mozgó tömegpontból álló rendszerrel helyettesíthetjük. Azok mozgása egymástól függetlenül könnyen meghatározható.

Az eddigiekben több példát láttunk arra, hogyan kell megkeresni egy fizikai rendszer helyettesítő rendszerét. Két alapvető kérdés vetődik fel:

1. Tetszőleges belső koordinátázás esetén a térkép tekinthető-e egyetlen tömegpont konfigurációs terének?

2. Több szabadsági fokú rendszer esetén szeparálható-e ez a rendszer független lineáris mozgásokra?

Az 1. esetben a válasz könnyen láthatóan negatív: pl. ha azt írjuk elő, hogy egy tömegpont egy ellipszis mentén mozogjon, akkor a „helyettesítő tömeg" nem lesz konstans.

A 2. kérdésre ellenpélda két elektromosan töltött tömegpont mely külső mágneses térben mozog. Belátható, hogy ezek mozgása általában nem bontható föl független mozgásokra.

Így sajnos fenti módszerünk általában nem alkalmazható: nem létezik mindig helyettesítő rendszer. Így a helyettesítő rendszer fogalmát kell kicsit megváltoztatni: a térképbeli mozgás általában nem tekinthető egy tömegpont mozgásának, csak egy matematikai pont mozgásának. Annak leírására már vannak módszerek: fenti gondolatmenetünk segítségével kaphatók az ún. Lagrange-féle másodfajú mozgásegyenletek.

Függelék

A következő feladatok az előzőekben tárgyalt módszer elsajátítását szolgálják. Nem mind új, több közülük közismert. A mellékelt útmutatás alapján a megoldás nem okozhat már gondot.

1. FELADAT: m tömegű pont a nehézségi erő hatására függőleges tengelyű csavarvonalon súrlódás nélkül csúszhat. Bizonyítsuk be, hogy a mozgás ugyanolyan típusú, mint ha lejtő mentén történne!

Útmutatás: A feladat állítása azt a szemléletes tényt fejezi ki, hogy a csavarvonal „olyan mint egy henger felületére csavart lejtő". A hengerfelület pontjait célszerű hengerpolárkoordinátákban megadni, ekkor a csavarvonal egyenlete:

$z = b\varphi$, $r = \text{const.}$

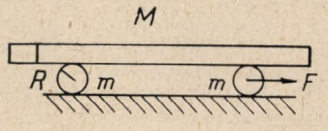
Ezekkel a koordinátákkal úgy a kinetikus mint a potenciális energia könnyen kifejezhető. Vegyük észre, hogy a lejtőn való mozgás szokásos tárgyalásakor a „koordinátá" a lejtő menti elmozdulás, az ívhossz. Így célszerű lesz a mi esetünkben is a „spirál-lejtő menti elmozdulás, „azaz az ívhosszat bevezetni általános koordinátaként. Így a „térkép" megegyezik egy lejtő térképével. A kinetikus- és potenciális energia könnyen átírható a térképre, amikor is örömmel ismerjük föl egy lejtőn mozgó test adatait. A feladat azon állítása tehát, hogy a „mozgás olyan típusú, mint a lejtő menti mozgás" pontosabban azt jelenti, hogy a csavarvonalon lecsúszó test egy helyettesítő rendszere a lejtő.

2. FELADAT: l hosszúságú pálca egyik végére m-tömegű testet erősítünk, és a pálca másik végét csapágyazzuk. A pálcához olyan spirálrugó illeszkedik, mely az elfordulás szögével arányos visszahúzó nyomatékot gyakorol a pálcára. Keressünk helyettesítő rendszert és írjuk le a mozgást!

Útmutatás:

Koordinátaként célszerű az elfordulás szögét választani Így térképünk egy nyílt intervallum lesz. A kinetikus és potenciális energia a szög függvényében könnyen fölírható; aholis egy ml^2 „tömegű", rugó végén rezgő test adatait ismerjük föl. Így helyettesítő rendszernek vehető pl. egy lineáris harmonikus rezgés.

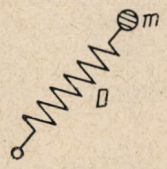
3. FELADAT: Két vízszintes tengelyű R sugarú, m tömegű homogén hengerre a 14. ábra szerint M tömegű gerendát helyezünk és az első hengert F erővel húzzuk. Feltéve, hogy az F elég kicsi ahhoz, hogy a rendszer ne csússzon meg, írjuk le a mozgást!



14. ábra

Útmutatás: A rendszer helyzete most is jellemezhető egyetlen paraméterrel, pl. az első henger középpontjának helyzetével. A csúszásmentes gördülés következtében a másik henger ugyanennyit mozdul el, a szögelfordulás ennek $1/R$-szerese, a fölső gerenda pedig kétszerannyit mozdul előre, mint a hengerek. Ezután a kinetikus- és potenciális energia fölírható. Így térképünk egy intervallum a számegyenesen, a helyettesítő rendszer pedig könnyen láthatóan egyenletesen gyorsuló mozgás végző tömeg.

4. FELADAT: Vízszintes asztallapon szabadon mozgó tömegpontot a sík egy rögzített 0 pontjához D direkciós erejű rugó köt. Bizonyítsuk be, hogy a rendszer helyettesíthető két egymástól független lineáris rezgést végző rendszerrel. Írjuk le a mozgást!



15. ábra

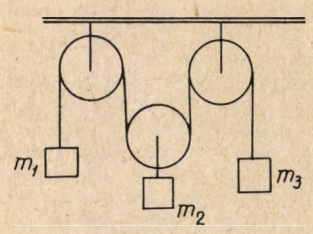
Útmutatás:

Tetszőleges derékszögű koordinátarendszert választva a síkon, az energia fölbomlik két tagra, melyek közül az egyik csak az első, a másik csak a második koordinátától függ. Így a rendszer fölfogható két egymástól függetlenül mozgó rendszer egyesítésének. Mindkét rendszer könnyen láthatóan lineáris oszcillátor. A függetlenség miatt a lineáris rezgések egymástól függetlenül leírhatók, az összetétel a jólismert Lissajous-görbéket adja. Az eredő pálya így ellipszis (lásd elliptikusan poláros fény).

Megjegyezzük, hogy nem volt szükség asztalra: a centrális erők tétele szerint a térbeli esetben is síkmozgás jön létre.

5. FELADAT: Keressük meg a 16. ábrán látható csigasor egy helyettesítő rendszerét és ennek segítségével írjuk le a mozgást!

Útmutatás: Azonnal meggyőződhetünk róla, hogy a rendszer nem 1 szabadsági fokú. Ha paraméternek pl. az első és a második tömeg elmozdulását választjuk, térképünk a sík lesz. Ezekkel az adatokkal kifejezhető az energia, az azonban nem lesz a két „általános koordináta" szeparált függvénye. Ezen alkalmas koordinátatranszformációval segíthetünk: a koordinátatengelyeket megfelelően elforgatva és nyújtva (ami a koordináták lineáris kombinációinak bevezetését jelenti) elérhető, hogy az energia két független tagra essen szét. Ezután a megoldás triviális.



16. ábra

A KÉMIA NAGY PILLANATAI II.—III.

Alkémia

Szabadváry Ferenc és Pető Gábor Pál

(Színhely: Egyetemi laboratórium 1970-ben. Egy riporter interjút készít egy professzorral a kémia eredetéről.)

Riporter: A kémia tehát az alkémiával kezdődött, azzal a majdnem 1500 évig tartó erőfeszítéssel, hogy aranyat csináljanak nem-nemes fémekből. Honnan vették ezt az ötletet egyáltalában?

Professzor: Nagyon egyszerű. Az emberek már a legrégibb korban is megfigyelték, hogy a dolgok más dolgokká változtak. Arisztotelesz azt tanította, hogy négy alapvető anyagból készült minden más anyag. A fémek főleg tűzből és földből álltak — minnél több volt a tűz, annál nemesebb volt a fém. Ebből logikusan következett, hogy a fémeket úgy lehet megnemesíteni, ha kidobjuk belőlük a földet és tűzzel helyettesítjük.

Ez a gondolat azután került Egyiptomba, hogy Nagy Sándor meghódította a világot. Ott a racionális görög világnézet kapcsolatba került régi mítoszokkal és ismeretekkel, amelyeket egy nagyhatalmú papi rend őrzött, köztük sok a gyógyászatban használt kémiai jellegű ismerettel. Hiszen akkor már értettek a szűréshez, a desztilláláshoz, a kristályosításhoz és számos más kémiai művelethez. A görög filozófia és a régi keleti mítoszok egyesülése hozta létre az alkémiát, amely egész fennállása alatt megtartotta keleti eredetű miszticizmusát.

Riporter: Szóval ez volt az alkémia kezdete?

Professzor: Igen, legalábbis így magyarázzák a tudománytörténészek. Az alkémisták maguk azonban azt állították, hogy az alkémia sokkal magasztosabb és nemesebb eredetű.

Riporter: Mit jelentsen ez? Hogyan mondják el ők a történetet?

Professzor: Legjobb, ha közvetlenül őket kérdezzük meg! Menjünk vissza a 14-ik századi Spanyolországba, hogy beszélhessünk Raymundus Lullussal, akit sokan az Alkémisták Királyának neveztek. 1235-től 1315-ig élt. Mehetünk? (Az idő visszapereg, kb. 1305-ben vagyunk. A színhely egy alkémista laboratórium, ahol egy előkelő megjelenésű idősebb úr egy olvasztó tégely fölé hajol, amit tűzön melegít. Az olvasztótégely tartalma izzani kezd.)

Alkémista: Elérkezett a pillanat, amit régóta vártam: a csontjaimban érzem, hogy itt van. Az arannyá változás meg fog történni és munkám végre eredményt hoz. Ezentúl, ahogy a nagy Hermes Trismegistus tanította, a Természet uralkodni fog a Természet fölött.

(Hangos kopogás az ajtón; int a vendégeknek, hogy lépjenek be.)

Riporter: Köszöntlek ó, Alkémisták Királya! Elmagyaráznád-e a 20. századi olvasónak, miért igyekszel szüntelenül aranyat csinálni a nem nemes fémekből? A célod csupán a vagyon, a gazdagság?

Lullus: Könnyen lehet, hogy néhány előttemjáró alkémistát és adeptust ilyen alacsony indítékok mozgattak, az én okaim azonban sokkal magasabbrendűek. Azért akarok aranyat csinálni kevésbé nemes és olcsóbb fémekből, hogy a keresztény világ uralkodóinak biztosíthassam azt a pénzt ami szükséges, hogy ki tudják űzni az eretnek mórokat Spanyolországból. Ha a nagy titkot megoldottam, az általam készített arany ennek a kereszteshadjáratnak célját fogja szolgálni.

Riporter: Mondja Uram, valóban azt reméli, hogy ez sikerülni fog?

Lullus: Már nem vagyok messze a Bölcsek Kövétől. Sőt, már ott tartok, hogy arannyá tudnám változtatni a tengereket, ha higanyból lennének. A Nagy Elixir néhány cseppje elegendő, hogy hatalmas higanytömegeket aranyná változtasson és bízom benne, hogy nemsokára a kezemben lesz ebből a csodálatos anyagból legalább egy kis mennyiség.

Riporter: (félre, a professzorhoz): A 20. század nyelvén a Bölcsek Kövét az első katalizátornak nevezhetnénk, nem? (Lullushoz): Mester, nem töri-e le az a tény, hogy soha egyik elődjének sem sikerült aranyat csinálni sem higanyból sem más fémből?

Lullus: Egy tudós soha se veszítse el a bátorságát. Kísérleteit folytatnia kell többszöri balsiker után is. Ha megfelelő hittel dolgozik, biztos, hogy egy napon siker koronázza erőfeszítéseit. Minden alkémista tudja, hogy Hermes Trismegistus ismerte az aranycsinálás titkát. Továbbá azt is tudja, hogy 36 000 kötetben jegyezte fel nagy titkát.

Riporter: De hát mi történt ezzel a titokkal és ennyi rengeteg könyvvel?

Lullus: Sajnos elvesztek: és e nagy tragédia okozója nem más, mint a nagy király, Bölcs Salamon. Ugyanis Ezekiel arkangyal átadta Salamonnak ezeket a könyveket megőrzésre és az uralkodó a trónja alatt tartotta őket, mert úgy vélte, ott biztonságban vannak. Egy furfangos démon azonban ellopta őket és soha nem kerültek többé elő.

(Eszébe jut a kísérlete): Csöndet kérek! Minden adeptus jól tudja, hogy minden itt alant egy azzal, ami fönt van és állandó változásnak van alávetve. A legnagyszerűbb dolgok történhetnek, amikor kivetjük az alacsonyrendű földet. Ez a megnemesedés, a csodálatos transzmutáció akármikor bekövetkezhet, akár a következő pillanatban! Táplálnom kell a tüzet! (Visszafordul a tűzhöz és megint belemerül a munkájába.)

Az I. rész megjelent a Fizikai Szemle 1974. évi 9. számában.

(Az idő visszaváltozik jelenné.)
Riporter: Tehát a szegény alkémisták ott álltak értékes könyveik nélkül és mindent elölről kellett kezdeniök, és mindezt azért, mert Salamon Királynak túl sok dolga volt, vagy talán túlságosan elfoglalta Sába királynője, és nem őrizte kellőképpen a rábízott nagy kincset. Milyen kár, hogy több századot fecséreltek az alkémisták hiábavalóságra.
Professzor: Bocsásson meg, de ellent kell mondanom Önnek. Ezek a korai mesterek sok értékes dolgot találtak fel, sok érdekes tényt figyeltek meg és jegyeztek fel. Nézze csak meg az üvegeket itt a laboratórium polcán és olvassa el a címkéket rajtuk: — sósav, kénsav, salétromsav. E nélkülözhetetlen vegyszerek nélkül nem lenne kémia. Mindezeket pedig az alkémisták vaktában folytatott kísérletezgetéseinek köszönhetjük. Ugyanez vonatkozik az alkoholra, amelynek haszna és kellemetessége nem korlátozódik a laboratóriumra. Nézze meg ezeket a különböző formájú és méretű üvegeket, a desztillálót és a vízfürdőt. Bizony mindezeket az alkémistáktól örököltük. Azt a fontos anyagot, amit porcelánnak hívunk, ugyancsak, egy alkémista fedezte fel. Az alkémisták munkájának és találékonyságának valóban hosszú sor vegyi anyagot és készüléket köszönhetünk. Nyugodtan mondhatjuk, hogy a kémia az alkémia gyermeke.
Riporter: Milyen hosszú ideig tartott az alkémia kora?
Professzor: Elméletileg az arannyá változtatás a transzmutáció lehetőséget nem lehetett komolyan vitatni, amíg az elemek arisztoteleszi elméletét elfogadták a kémiai gondolkozás alapjának — vagyis addig, amíg újra nem éledt az atomizmus a 17. és 18. században. Ezután az időszak után már nem létezett konstruktív alkémia, de alkémisták még sokáig voltak. Ekkor ez azonban már szélhámosság vagy botorság volt. Sokan meggazdagodtak az emberi kapzsiságon. Mindig akadt valaki, akiből ki tudták csalni a pénzt azok, akik azt állították, hogy újra felfedezték az aranycsinálás régen elveszett művészetét. Bizonyára meglepi, hogy a legutolsó uralkodó, aki alkémista kísérleteket támogatott, nem más volt, mint Ferenc József.

Akkor, amikor már gőzmozdonyok futottak Bécs és Budapest között, 1867-ben három férfi, akik azt állították magukról, hogy felvilágosult adeptusok, kihallgatást kértek az uralkodótól. Elmondták, hogy át tudják alakítani az ezüstöt arannyá. A királyt teljesen meggyőzték és felfogadta őket. Még jelentős előlegeket is fizetett a majdani aranyszállítmányokért. Az állítólagos alkémisták úgy tettek, mintha szorgalmasan dolgoznának 15 héten keresztül, majd egy éjszaka eltűntek és soha nem fogták el őket.
Riporter: Akkor hát hogyan ítéljük meg az alkémiát? Nemrégiben egy ismert kémiatörténetben azt olvastam, hogy az alkémia története nem egyéb, mint egy tévedés története.
Professzor: A 19-ik század tudósai többnyire túl magabiztosak voltak. Azt hitték, hogy az ember már megközelítette a tudás határait és nemsokára minden lényeges dolgot tudni fogunk. A daltoni atomteória majdnem egy évszázadon át uralta a kémiai gondolkozást és nem kétséges, hogy ezen az alapon a kémia sokat haladt. Ez a teória azt tételezte fel, hogy az egyes elemek atomokból állnak, amelyeket nem lehet már tovább bontani, és hogy minden elem más-más anyagból áll, melyek között semmi közös nincs. Azután a 19-ik század végén jött a meglepő felfedezés, a radioaktivitás. Világossá vált, hogy létezik egy teljesen új terület, saját még ismeretlen törvényekkel. Vagyis röviden, az atomokon belüli új világ tárult fel.
Riporter: Ez tehát annyit jelent, hogy a korábbi elmélettel ellentétben, az atomok igenis szétbonthatók?
Professzor: Már a múlt század elején is azt állította néhány merész kutató, hogy az atomok összetettek és kivétel nélkül ugyanazokból a komponensekből állnak. Azt is állították, hogy az elemek közötti különbségek abból adódnak, hogy ezek a szubatomikus összetevők számban és elrendezésben különböznek.
Riporter: Nem nagyon hasonló ez a gondolat ahhoz, amit Arisztotelesz mondott évszázadokkal ezelőtt?
Professzor: Így van, legalábbis abban, hogy azt állítja, hogy minden elem atomjai ugyanazokból az összetevőkből állnak. Azonban a tűz, a víz, a föld és a levegő helyett ma protonokról, neutronokról, elektronokról és más szubatomikus részecskék egyre növekvő számáról beszélünk.
Riporter: Ebben az esetben, legalábbis elméletben, át kellene tudnunk változtatni, transzmutálni az elemeket egymásba egész egyszerűen úgy, hogy megváltoztatjuk a szubatomikus részecskék számát és helyzetét.
Professzor: Igen, a vegyészek és fizikusok erre a következtetésre jutottak megfigyeléseik alapján, mint ahogy elődeik az alkémiához jutottak az arisztotelészi elmélet alapján.
Riporter: Ebben az esetben azonban ennek a következtetésnek az alapja nem természetfilozófiai spekuláció, hanem kísérletileg alátámasztott tudományos tény volt.
Professzor: Valóban így van, és ezért a 20. század alkémistáinak sikerült is mesterségesen átalakítani elemeket. Először 1918-ban. Néhány kiváló tudós ült össze a brit Hadügyminisztériumban egy fontos téma megbeszélése céljából — a német tengeralattjárók elleni védekezésről volt szó. Ernest Rutherford, a híres brit fizikus azonban elkésett az értekezletről. Amikor szemrehányásokat tettek neki, hogy elmaradt erről a fontos találkozóról, így felelt: „Hagyjanak nekem békét: felfedeztem valamit ami fontosabb, mint a maguk egész háborúja".

Rutherford nem túlzott. Nitrogént bombázott alfasugarakkal és közben néhány olyan jelenségre figyelt fel, melyből arra lehetett következtetni, hogy egyes nitrogén atommagok oxigén atommaggá alakultak át. Ezt csakhamar bizonyítani is sikerült. Nemsokára más elemeket is mesterségesen átalakítottak. Ma már, mint tudjuk nagy mértékben lehet előállítani a legkülönbözőbb mesterséges elemeket.
Riporter: Így tehát az alkémisták évszázados álmai végül valóraváltak. Lehet-e aranyat is előállítani mesterségesen olyan nagy erejű készülékekkel, mint a ciklotron és az atommáglyák?
Professzor: Lehet. De a mesterségesen előállított arany radioaktív és nem használható pénz vagy ékszerek készítésére. Azonban ennél sokkal jótékonyabban szolgálhatja az emberiséget az orvostudományban. Érdemes megemlíteni, hogy a mesterséges aranyat főleg úgy állítják elő, hogy higanyt bombáznak neutronokkal. Tehát, ha akarjuk Raymundus Lullus jóslatát, akár beigazoltnak vehetjük. Itt azonban álljunk meg! Ne menjünk tovább következtetéseinkkel. Soha nem szabad túlmesszire menni a történelmi analógiákkal.

Orvosi kémia

Előadóterem az egyetemen 1971-ben.

Az órának vége, de egy diák ott maradt, hogy megbeszélje a professzorral a napi anyagot, mely a tudományok eredetével foglalkozik.
Professzor: ..... modern tudományaink közül a legtöbb visszavezethető a renaissancera. Néhány elhanyagolt szaktudomány újjászületett és sok új tudományág létesült, mivel másképp szemlélték a jelenségeket mint korábban.
Diák: De mi okozta a változásokat abban, ahogy az ember a természetet és az anyag tulajdonságait figyelte?
Professzor: A leglényegesebb a kísérletezés fontosságának felismerése volt.
Diák: Nemde ez a nagy angol filozófus, Francis Bacon érdeme nagymértékben? 1620-ban megjelent „Novum Organum" című könyvében azt mondja: „Amint a hétköznapi életben az ember természete és legelrejtettebb érzései legtöbbször akkor törnek fel, ha megzavarják őket, ugyanígy a természet titkai könnyebben elárulják

magukat, ha mesterségesen faggatjuk őket, mintha szabadon járják útjukat."

Professzor: Részben igaza van. Az említett munkában Bacon valóban a tudományos haladás ezen új fajtájának kitűnő vázlatát adta. Kiemelte, hogy az ember nem csupán azért kísérletezik, hogy pontosabb leírást kapjon a dolgokról, hanem inkább azért, hogy a tárgyakat és jelenségeket megfelelő kapcsolatba hozza. De Bacon nem felfedezte az induktív kutatás módszerét, hanem leírta csupán azt, ahogy akkor már kutattak. Ugyanis már Leonardo da Vinci, a nagytehetségű géniusz, aki kb. egy évszázaddal Bacon előtt élt, ugyanezeket a gondolatokat fejtette ki: „A természet csodálatos művének tolmácsa a tapasztalás (kísérlet). Ez soha nem vezet félre, legfeljebb értelmünk fogyatékossága téveszt meg minket időnként. El kell fogadnunk a tapasztalás segítségét, amíg általános szabályt nem tudunk felállítani. Míg a természet az okkal kezdődik és kísérletezéssel ér véget, mi egy ezzel ellentétes folyamatot kényszerülünk követni, így mi a kísérlettel kezdjük és aztán tanulmányozzuk az okot."

Míg a középkorban hosszú vitákat tartottak a pont oszthatóságáról, meg arról, hogy hányféle angyal és démon létezik, és szorgalmasan idézték a régi görög forrásokat, a XV. századnak az óceánra kimerészkedő tengerészei evvel nem elégedhettek meg. Hiszen Arisztotelész semmit sem szólt a tengert bátran szelő hajók helyzetének meghatározásáról. A hajózást ugyanis csak személyes tapasztalás útján lehet megtanulni. Ezek és ehhez hasonló példák vezettek a tapasztalás és a kísérletezés nagy fontosságának felismeréséhez.

Diák: A modern csillagászat, mechanika és fizika valóban ebből a korból ered, de nem látom ugyanezt a kémiára vonatkozóan.

Professzor: A modern kémia valóban később alakult ki, de akkoriban szintén átalakuláson ment keresztül, mégha nem is az utolsón. Pillantsunk megint vissza a múltba, és utazzunk a 16. századbeli Salzburgba, abba a kedves városba, ahol Mozart született és, amely ma minden évben nagy zenei fesztivál színhelye.

Hely: salzburgi Fehér Rózsa Csapszék, Késő este van, zajos tömeg tolong a füstös fogadóban.

Professzor: (igyekszik, hogy hangja hallhatóvá váljék a lármában) Gyerünk, menjünk abba a sarokba és figyeljünk. (Keresztül tolakodnak a szobán a sarokasztalhoz, ahol egy zilált, kopott, csúnya öltözetű férfi állt integetve és teli tüdővel kiabál. Hosszú kardja mögötte van a széken.)

Diák: (a beszélőt figyelve) Ki ez a nagyhangú fickó?

Professzor: Ez nem más mint a híres, vagy inkább hírhedt Paracelsus. Hallgassa mit mond.

Paracelsus: Figyeljetek rám! Én mondom, hogy a ti összes nagyratartott orvosi tekintélyetek mint Hippocrates, Galenus, Avicenna és a hozzájuk hasonlók nem méltók arra sem, hogy saruszíjamat megoldják. Hogy miért? Azért mert én tudom, hogy a gyógyítás legfőbb alapja a szeretet. Minden ember tisztán jön a világra, mégis mindenkinek keresztül kell mennie a poklon élete során, míg megtanulja a Tartarus értelmét és az Archeust — az életelvet, amely irányítja, ellenőrzi és fenntartja az élőlények növekedését és folytatódását. Azok a bazeli professzorok, akik engem elűztek annak a városnak egyeteméről, hiába keresik ezeket az igazságokat. Csak idejüket vesztegetik az ősi kódexek lapozgatásával. Van egy az önökénél sokkal értékesebb kódex, tisztelt professzorok! És ez a természet kódexe! Ez az egyetlen, amelyet olvasniuk és tanulmányozniuk kellene! Senki nem mélyedt el a természetben olyan szorgalmasan és gondosan mint én. Oh! Ti hivatásos idióták! Hadd igyam tovább! Tölts még bort! Nehéz az én szívem, nagyon nehéz. Ezek a professzorok azt mondják, hogy olvassuk tisztelettel a régieket és aztán alkalmazzuk így megszerzett ismereteinket a betegségek gyógyítására fejlesztésére. Én, Philippus Aureolus Theophrastus mást mondok. (Visszaroskad székébe és fejét az asztalon nyugtatja.)

Diák: Nézze! Nyilvánvalóan részeg. Elképzelhető, hogy tanulni lehet valami érdemlegeset ilyen embertől? Az a benyomásom, hogy amit mond, annak nem sok értelme van.

Professzor: Reakciója erre a hencegésre teljesen érthető. Paracelsus így részegen írt sok könyvet, amelyek nemigen érthetők, ámbár követői megpróbáltak értelmet magyarázni bele. Mindamellett a tanács, amelyet ez a heves, féktelen és kötekedő ember újra meg újra ismételt, nevezetesen, hogy a kémia feladata nem az aranycsinálás, hanem gyógyszerek készítése fordulatot jelentett e tudományban. Megkezdődött vele az orvosi kémia kora. Paracelsusnak sok bírálója volt, de számos követője is orvosi körökben. Őt az a gondolat vezette, hogy a kémia egy szép napon majd feltárja a gyógyítás titkát. Követői ebben az irányban tettek erőfeszítéseket.

Sok máig is használatos gyógyszert Paracelsus vezetett be. Ő fejlesztette ki és tanította olyan szervetlen sók használatát, mint az ólom, vas és cink. Ő használt elsőnek higanyos kenőcsöket, arzénkészítményeket bőr és hasonló betegségek gyógyítására.

Diák: Az orvosok nyilván jólképzett emberek voltak, minthogy már a középkorban egyetemet végeztek és tanult emberek között mégis legközelebb álltak a természethez.

Professzor: Tudomány egyúttal rendet jelent. Az orvos-kémikusok kezdték elsőnek rendszerezni azon kémiai ismeretek nagy tömegét, amelyeket az alkimisták gyűjtöttek. Paracelsus nézete szerint az életfolyamatok tulajdonképpen kémiai folyamatok, és mivel vizes oldatok fontos szerepet játszanak az életfolyamatokban, ezért kezdték különleges érdeklődéssel tanulmányozni őket. Míg az alkimisták elsősorban olvadékokban dolgoztak, az orvos-kémikusok leginkább oldatokkal. Bár az alkimistákhoz képest kevesebb új anyagot fedeztek fel, de sok fontos megállapítást tettek a kémiai folyamatokkal és állapotokkal kapcsolatban.

Diák: Milyeneket?

Professzor: Nos, elkezdték osztályozni a vegyületeket. Definiálták a savakat és sókat. A flamand Jean Baptiste van Helmont, a legnagyobb orvos kémikus felismerte, hogy az anyag, amikor feloldódik, nem tűnik el, csupán más formát vesz fel, és felismerte, hogy sok anyag különféle halmazállapotban létezhet. Rájött arra is, hogy nem minden légnemű anyag levegő, hanem vannak mások is — azaz a gázok létezését ismerte fel. E szót is ő találta fel.

Diák: Tehát már világosfejű, modern tudós volt?

Professzor: Nem éppen, ez túlzás lenne. A 17. századi kémikusok két korszak határán álltak. Mögöttük Arisztotelesz és a középkor merev hierarchiája, amelyben mindennek megvan a maga kijelölt helye, királynak és parasztnak, angyalnak és ördögnek, álló csillagnak és bolygónak. Előttük pedig egy ismeretlen világ volt, amely arra várt, hogy feltárják titkait. Hogy ezt megtehessék, vállalniuk kellett azt, hogy megtagadják azt a büszke hitüket, mely szerint az ember az univerzum középpontja, hogy a nap és más égitestek körülte keringenek. Helyébe csak Descartes doktrínáját kapták: „Cogito ergo sum" mely azt jelenti, hogy az ember azért, mert tud gondolkozni képes egy új világot alkotni sajátmaga számára. E férfiak egyik szemükkel bátran néztek a jövőbe, a másikkal aggódva pillogtak a múltba, ahonnan az inkvizíció, s ki tudja, tán a pokol lángjai fenyegették az új tanok hirdetőit.

A realitást gyakran befolyásolta a miszticizmus — például még a neves van Helmont is azt hitte, hogy saját lelkét látja egy kristálygömbben.

Diák: Más szavakkal az orvosi kémia kora egy lépcsőfok volt az elméletek és koncepciók rendszerezése felé, és megkísérelt valamiféle rendet teremteni a különféle anyagok áttekinthetetlen áradatában.

Professzor: Így igaz. Az orvostudomány védőszárnyai alá vette és annak részeként a kémia belopakodott az egyetemekre. Később már természetesen függetlenül fejlődött tovább és az orvosi periódus vége felé már nagykorú tudományként kezdett szerepelni.

EMLÉKEIM SZILÁRD LEÓRÓL

Beszélgetés D. HAWKINS professzorral

Szilárd Leó Budapesten született 1898. febr, 11-én. Mint sok más kortársa abban az időben. ő is külföldre volt kénytelen menni, hogy egyetemet végezhessen. Berlinben doktorált 1922-ben, majd 1928-ban ugyanott habilitált. Pályájának állomásai 1934 után London és Oxford, majd 1939-től az Egyesült Államokban a Columbia Egyetem. Itt kezdődik kapcsolata Fermivel. A nagy probléma: az uránhasadás. Vele dolgozik az első atomreaktor megvalósításán New York után Chicagóban, ahol a háború után 1946-tól a Sugárbiológiai és Biofizikai Intézetet vezeti. Később az Enrico Fermi Institute of Nuclear Studies, végül a Salk Institute for Biological Studies irányítója. 1964-ben halt meg La Jolla-ban.

Érdekes, színes egyéniség. Nevéhez fűződik a Szilárd-Chalmers reakció, a rácsreaktor szabadalma. Sok más között foglalkozott molekuláris biológiával, az öregedés, az emberi memória, az entrópia és információ problémájával. Történelmi szerepe is volt, mikor Einstein az ő hatására felhívta Roosevelt elnök figyelmét az uránhasadás katonai fontosságára. Azt is ki lehet viszont emelni, hogy a háború végén Einsteinnel együtt tiltakozott az atombomba felhasználása ellen. Az amerikai akadémia az atomenergia békés felhasználása érdekében kifejtett tevékenységéért az Atom for Peace Awards díjjal tüntette ki.

Prof. David Hawkins a Mountain View Center for Environmental Education, University of Colorado, Boulder tanára. 1976. május 3-án az Eötvös Loránd Fizikai Társulatban „Creative Education for Physics" címmel tartott előadást. Felesége, Francis Patricia Hawkins ugyanakkor beszámolt óvodás korú gyermekkel végzett munkájáról „Logic of Action" címmel. Prof. Hawkins hosszabb ideig együtt dolgozott Szilárd Leóval és ebben a beszélgetésben felelevenít néhány élményt a háború alatti és utáni időkből.

Professzor úr a legnehezebb időkben munkatársa volt Szilárd Leónak, akinek tudományos érdemei ismertek, és akiről sok anekdóta — Szilárdiana — kering. Részt vesz Szilárd összegyűjtött munkáinak kiadásában, és ismertette a már megjelent köteteket. Bizonyára vannak olyan személyes emlékei, amelyek a Fizikai Szemle olvasói számára érdekesek.

Sok emlékem van Magyarországról származó ismerősökről, de talán a legkellemesebbek azok, amelyek Szilárd Leóval kapcsolatosak. Rá mindig örömmel és szeretettel gondolok. Nem is tudom, hol kezdjem el emlékeimet!

Azt kell mondanom, hogy nagyon jól nem is ismertem, nem sorolhatom személyes barátaim közé. Talán 10—15-ször voltunk együtt, de akkor mindig valami egészen érdekes dolog történt. Biológiai problémákon együtt is dolgoztunk, azután sokat beszélgettünk, vitatkoztunk politikáról, társadalmi problémákról. Nem álltunk nagyon közel egymáshoz, de megtanultam becsülni mint egy jó barátot.

Talán egy történettel kezdeném, amely Szilárdnak az atombombával kapcsolatos szabadalmához fűződik.

Ez ugyebár az a British Admiralty szabadalom, melyről a Physics Today részletesen megemlékezik az 1976. februári számában?

A háború alatt Robert Oppenheimer mellett Los Alamosban dolgoztam mint fiatal asszisztens. Nem lévén fizikus, hanem „csak" filozófus, adminisztratív munkára fogtak be, azzal az elgondolással, hogy erre egy filozófus is alkalmas, a fizikusok fontosabb munkát is végezhetnek. Los Alamosban dolgozott a kormány megbízásából egy olyan csoport, mely az atombombával kapcsolatos szabadalmi problémákkal foglalkozott. Ezzel kapcsolatban ugyanis, főként a háború után, súlyos jogi nehézségek merülhettek volna fel, ha kellő időben nem tisztázzák.

Emlékszem arra, hogy egy fiatal katonatiszt, aki egyúttal jogi szakértő is volt, erősen panaszkodott Szilárdra, aki sok nehézséget okozott nekik éppen a kérdéses szabadalommal kapcsolatban. Mikor Szilárddal találkoztam, megkérdeztem tőle, hogy mi is volt tulajdonképpen a probléma.

Szilárd szerint a következő, egészen egyszerű ügyről volt szó:

„Van egy rendkívül fontos szabadalmam. Az Egyesült Államok kormánya ezt a szabadalmat kívánja megvásárolni, de csak egy dollárt akar érte (jelképes összeg) adni. Én hajlandó vagyok a szabadalmat ingyen is átengedni, de ha fizetni akarnak, akkor adjanak az értékének megfelelő összeget és nem egy dollárt. Olyan összeget kérek, ami az anyagi helyzetemen javít. A kormány nem akar fizetni, én pedig egy dollárért nem vagyok hajlandó lemondani jogaimról. Az eset emlékeztet a következő anekdótára az első világháború idejéből:

Az egykori Osztrák—Magyar Monarchiában bevonult katonának egy szegény kis szabó is. Békés emberke volt, és igazán nem akart harcolni, kénytelen-kelletlen mégis fel kellett húznia a mundért. Kikerült a harctérre, ahol egységével együtt valamilyen táborban volt elszállásolva. Egyik nap kora hajnalban ébredve valami zajra lett figyelmes. Gyanút fogott, felkeltette feletteseit és éppen idejében sikerült felkészülniük a közelgő ellenség tá-

madására. Így a kis szabó éberségével sok ember életét mentette meg, és szóba került, hogy eme tettéért magas kitüntetésre terjesztik fel. A parancsnok magához hívatta és megkérdezte, hogy mit választana szívesebben: a kitüntetést vagy talán valami komolyabb pénzjutalmat — mondjuk 1000 koronát. A szegény kis szabó gondolkodási időt kért. Másnap felkereste a parancsnokot és megkérdezte, hogy mennyit ér az érdemrend. A parancsnok meglepetve mondta, hogy annak magas erkölcsi értéke van, amit pénzen nem is lehet kifejezni, hiszen elsősorban nagy dicsőséget jelent. „De mennyi az érem — mondjuk az arany — pénzértéke?" — érdeklődött tovább a szabó. „Körülbelül 5 korona" — volt a válasz. A kis szabó gondolkodott és azután azt kérdezte: „Nem kaphatnék esetleg 995 koronát és az érdemrendet?" Ez volt Szilárd magyarázata a saját helyzetére.

Igen! Ez valóban egy igazi „Szilárdiana", ahogy a róla szóló anekdoták seregét nevezik.

Szilárdot akkor volt alkalmam közelebbről megismerni, amikor tanácsadóként fiatal tudósok csoportjával foglalkozott, akik a háború után az atombombával kapcsolatos világpolitikai kérdések iránt érdeklődtek, és figyelmeztetni kívánták az emberiséget a fenyegető új veszélyre. A Manhatten Project-en dolgozó tudósok közül sokan csatlakoztak Szilárd törekvéséhez, hogy a kongresszus tagjait, a szenátorokat és általában a befolyásos közéleti személyeket a veszély igazi természetéről felvilágosítsák. Azt kellett megérteni és megértetni, hogy itt nem egyszerűen egy valamivel nagyobb hatású robbanószerről van szó. Amikor valami egyszerre egy ezres vagy tízezres faktorral változik, az ember nem képes a hatást felfogni. Ilyen különbség pl. a gyalogos és a szuperszonikus repülőgép sebessége. Az új eszköz társadalmi következményei beláthatatlanok. Az atombombát eleinte egyszerűen egy másik fegyvernek tekintették, és nem értették át annak katonai és társadalmi hatását. Szilárd nagy aktivitást fejtett ki a jó értelemben vett propaganda érdekében, hogy a világot fel kell világosítani az új fegyver jelentőségéről. hozzá kell tenni, hogy ez már Hiroshima és Nagasaki után történt. Mi valamennyiben — talán úgy neveznénk — nukleáris pacifisták lettünk. Nem vallási vagy morális meggyőződésből váltunk pacifistává, hanem felismertük, hogy az egész világ nemzetközi struktúrája alapvetően megváltozott. Fenyegetett az a veszély, hogy ezt az emberiség képtelen lesz megérteni, mint ahogy még a mai napig sem érti meg teljesen. Szilárd sokat gondolkodott ezeken az alapvető problémákon, szívesen irányította a fiatalabb kollégákat. Nem csatlakozott ugyan a Federation of American Scientists nevű politikai szervezethez, de szívesen eljött a legtöbb ülésre, részt vett az elméleti, gyakorlati, politikai és erkölcsi tárgyú vitákon, mindig új színt adva azoknak. Weisskopf tag volt, az idősebb kollégák általában szimpatizáltak, de nem vettek részt a mozgalomban. Magam élénken bekapcsolódtam ebbe a politikai színezetű tevékenységbe, nem mint az atombombán dolgozó tudós, hanem mint egyszerű ember.

Szilárd mindig tele volt problémák teljesen irreálisnak látszó megoldásával. Így a háború után, még Eisenhower idejében, megpróbálta meggyőzni az amerikai politikusokat arról, hogy az atombomba nem egyszerűen egy másik fegyver legfőbb értéke csak az lehet, hogy megakadályozzák bevezetését valahol is háborúban. Szilárd a megfélemlítésen alapuló egyensúly helytelenségét hirdette. Az általa kitalált „coda duello" (párbajkód) gondolatával érvelt, mely a következő gondolatmenetet jelentette:

Tegyük fel, hogy két ország, *A* és *B* háborút visel. *A* kijelenti, hogy ha *B* valamilyen országot — mondjuk Mexikót — megtámadja, akkor *A* atombombát dob *B* egyik városára. Erre *B* azzal válaszol, hogy akkor viszont *A* valamelyik városát pusztítja el a Föld színéről. Így nem háború alakul ki, hanem valamiféle párbaj. Politikailag és hadászatilag abszurdum. Szilárd szerint az ilyen abszurdum, egy egyszerű matematikai megoldás. Szerinte a matematikai megoldás egy olyan megoldás, mely a probléma természetét világossá teszi, akkor is, ha nem realizálható.

Valóban ez jellemzi az úgynevezett „Szilárdian style"-t!

1950 körül Szilárd ellátogatott az én egyetememre (University of Colorado). Meghívtuk, hogy tartson előadást az atombombáról. Ekkor találta ki az „Utolsó ítélet" fegyverét, mely az egész bolygón megszüntet minden életet. Ez lenne a kobalt bomba. A létrehozott nagymértékű radioaktív sugárzás sterilizálja az egész Földet, megszüntet minden életet.

Erre utal Szilárd egyik utopisztikus novellája, a „Grand Central" című ismert sci-fi is!

Szilárd szokása szerint elvégezte ezzel kapcsolatban az összes számításokat is. Be akarta bizonyítani, hogy az emberiség fennmaradásának biztosítására a békés együttélés módjának megvalósítása minden másnál előbbrevaló. Akkoriban szenzációt jelentett egy ilyen extrém következménynek egyáltalában a lehetősége. Szilárd rádöbbentette a hallgatóságát arra hogy a Föld mint bolygó egy véges életteret jelent. Az emberek képzeletében eddig az élettér végtelennek látszott és minden folyhatott tovább úgy, mint eddig.

Az elhangzott előadásokat élénk vita követte, amelyben többek között egy kiváló pszichoanalitikus is részt vett. Élvezet volt Szilárdot hallani egy egyenrangú, nagy intelligenciával bíró ellenféllel folytatott vitában. Általában nehéz volt vitában legyőzni, ebben az esetben pedig még a szokottnál is jobb formában volt. A pszichoanalitikus azzal érvelt, hogy a Szilárd csak rémületbe ejti az embereket, és azok így nem viselkednek ésszerűen. Ha ennyire meg vannak ijedve, akkor nem tudnak helyesen gondolkodni. Szilárd válasza erre az volt: „Én csak az igazságot akarom megmondani; nem hiszek abban, hogy az embereknek

hazudnunk szabadna." Ellenfele igen kellemetlen helyzetbe került, mert hiszen úgy látszott azt ajánlja, hogy az embereket az atombomba következményeivel kapcsolatban félrevezessék. Nem is tudta véleményét a továbbiakban kellően kidomborítani.

Szilárd vita közben sokszor igen hatásosan tudott replikázni. Így mikor egy másik alkalommal a közönség között valaki felállva azzal kezdte felszólalását, hogy ő egy pszichológus, Szilárd komoly arcot vágott, meghajtotta magát és így szólt: „Akkor én nagyon sajnálom Önt, uram!"

Szilárdról annak idején anekdoták voltak forgalomban, melyek őt beképzelt embernek említették például. Volt ebben valami igazság?

Szerintem az ilyen történetek terjesztőinek nem volt igazuk. Szilárd nem volt beképzelt, csak igen jól ismerte a nyilvános viták közönségének pszichológiáját. A fentihez hasonló epizódnak kétféle következménye lehetett. A két vitatkozó vagy ellenség, vagy igen jó barát lesz. Szerencsére akkor is az utóbbi történt. A két férfi sokszor összejött azután és mindig tisztelte egymást. Az érdekes vitának volt még egy eredménye. Szilárd többször is eljött a Colorado Egyetemre, és szívesen tartott előadásokat a biofizikusok előtt.

Szilárd érdeklődése a háború utáni időben teljesen a biológia felé fordult. Hallhatnánk erről pár szót?

Igen! Ő ebben az időben igen fontos munkát végzett a biológia terén. Új gondolatokkal és teljesen új irányba terelte ezt a tudományt. A vele való beszélgetés különben is mindig rendkívül ösztönző, gondolatébresztő volt. Mindig tele volt ötletekkel. Naponta legalább húsz új ötlet jutott eszébe, és ha ezek között havonta legalább egy igazán használható akadt, akkor is ez kitűnő teljesítményt jelent. Azok közé a ritka emberek közé tartozott, akik valósággal sugározzák az új gondolatokat, olyan ötleteket, melyek másnak nem jutnak eszébe. Sokat beszélgettünk akkoriban egyrészt biológiáról, másrészt politikáról. Mint tudjuk, a háború befejezéséig Fermivel dolgozott együtt a chicagói egyetemen, a győzelem után azonban elhatározta, hogy nem foglalkozik többé fizikával — pontosabban mondva, nem lesz többé fizikus. Hitem szerint egyébként azért lett fizikus, mert a maghasadás problémája érdekelte. A maghasadás terén sok problémát előbb látott, mint mások. A Physics Today idézett cikke igazolja, hogy a legkiválóbb fizikusok sokáig valószínűtlennek látták a maghasadás gyakorlati megvalósítását. Ez még Fermire is vonatkozik, aki az első működő atommáglyát építette. Úgy emlékszem, Szilárd 4—5 évvel előbb gondolt a láncreakcióra, mint pl. Fermi a transzurán elemeket felfedezte. Atomenergiáról az emberek már 25—30 évvel korábban beszéltek. Magam már gyermekkoromban hallottam hatalmas energiáról, melyet fel kellene szabadítani, ismert volt a radioaktivitás stb. Szilárd azonban a láncreakció különleges szerepét fogta fel korán.*

Talán térjünk vissza a háború utáni eseményekre, amikor Szilárd hátat fordított bizonyos értelemben a fizikának, ami azt jelentette, hogy elsőként alkalmazott fizikai módszereket a biológiában.

Szilárd 1946-ban a Chicagoi Egyetemen a biológia és társadalmi tudományok professzora lett. Innen kezdve minden gondja az emberiség jóléte lett. Szerintem ez egy igen mély tartalmú erkölcsi elszánás. Valami újat akart létrehozni a biológia és a társadalmi kutatás területén. A társadalmi problémák terén az ő egyéni hozzájárulása egyrészt azon kísérleteit jelentette, melyekben a katonai problémák „matematikai megoldását" mutatta be, továbbá a sci-fi irodalomhoz tartozó kiruccanásai, pl. „A delfinek hangja". Ezekben rá akarta döbbenteni az embereket, hogy nem szabad addig halasztani a döntést, míg a döntéssel már elkéstek. Korábban irodalommal nem foglalkozott, mégis határozott írói tehetséget árult el a szellemes történetekben.

Fő munkaterülete természetesen a biológia lett. Ebben az időben szorosabb kapcsolatban voltam vele, megismertem egy Allan Novik nevű munkatársát is, kivel számos közös dolgozatot publikált. Jellemző vonása Szilárdnak, hogy amikor elhatározta, biológiával fog foglalkozni, akkor azt először alaposan meg akarta tanulni. New York államban Springs Harbourban évente nyáron rendeznek — vagy legalábbis rendeztek — egy mikrobiológiai szemináriumot. Szilárd részt vett ezen a tanfolyamon, szorgalmas munkával megtanult baktériumokkal dolgozni, tápanyagot szaporítani, mikroszkóp alatt számolni, megismerte az E coli bacilusok, a bakteriofágok természetét, szóval elsajátított minden elméleti tudást és a biológiai kutatáshoz szükséges technikát. Az E coli bacilusokkal dolgozott mindenki, mert igen jól standardizálható, állandó viszonyokat lehet velük teremteni.

Azt hiszem, a fizikusok hozzájárulása a biológiához elsősorban az volt, hogy fizikai módszereket alkalmaztak nagyszámú, egyszerű organizmus esetén. Így nem okoz problémát a statisztikai ingadozás. A baktériumok genetikájával, a baktériumok és vírusok közti viszonnyal foglalkozott már Max Delbrück is, aki Niels Bohr tanítványa volt Koppenhágában. Bohrt nagyon érdekelte a biológia és nagy reményeket fűzött Delbrück munkásságához. Látta benne a tehetséget, segítette, hogy

* Talán érdekes megjegyeznünk, hogy 1939 szeptemberében a Természettudományi Közlönyben „Lehetséges-e az atommag energiájának gyakorlati felhasználása?" címmel Vermes Miklós írt már Hahn és Strassmann felfedezéséről. S. Flüggének a Naturwissenschaften jún. 9-i számában megjelent cikkéről referálva leírta, hogy az urán atommagja neutron hatására két nagyobb darabra hasad és 2 vagy több neutron is található a szilánkok között. Ha elegendő uránatom van jelen, láncreakció keletkezik. Konkrét számadatokat közölve rámutat egyrészt az atombomba, másrészt az atomreaktor létrehozásának lehetőségére.

biológus legyen. Delbrück jelentős mértékben járult hozzá a modern biológia fejlődéséhez. Ő korábbi nagy alak ezen a területen, melyen azután Szilárd a maga különleges tehetségével olyan dolgokat csinált, amilyenekre addig senki sem gondolt. Említeném talán az általa kitalált chymostat nevű egyszerű eszközt baktériumok tenyésztésére. A tápanyag állandó cirkuláltatásával stacionárius állapotot hozott létre, ezzel mutációk keletkeztek melyeket kiválasztott. Így mintegy az evolúció folyamatát valósította meg kémcsőben. A chymostatot hosszabb ideig működtetve több száz mutáció állt elő, végül olyan baktériumokat tudott előállítani, melyek egész sereg, a kiindulástól eltérő sajátságot mutattak. Meglepően fontos méréseket tudott végezni, olyan területeken, amelyeken előtte erre senki sem gondolt. Erről talán többet nem érdemes szólni, hiszen az eredmények az irodalomból ismertek.

Emlékszem, hogy egy időben az öregedéssel kapcsolatos munkájáról beszélgettünk. Mi az oka élőlények, különösképpen az ember öregedésének? Sokféle elmélet merült már fel, de olyan nem, amelyet kvantitatíve ellenőrizni lehetett volna. Szilárd felállított egy igen egyszerű elméletet, melynek következtetéseit laboratóriumi viszonyok között ellenőrizni lehetett egyszerű statisztikai adatokból. Ehhez szüksége volt egyrészt megfelelő statisztikai elméletre, másrészt adatgyűjtésre. Én vállalkoztam arra, hogy adatokat gyűjtök olyan forrásokból, melyeket Szilárd nem ismert. Így pl. vizsgálatuk az egypetéjű ikerpárok halálozási időpontja közti különbséget. Sokat vitattuk az eredményt, de Szilárd nézete az volt, hogy ez az elmélet csak nulladrendű közelítés. Tudományos stílusához tartozott, hogy a bonyolultról először egy igen egyszerű modellt csinált, a rendszer leglényegesebb jellemzőit megtartva. Ehhez kitűnő képzelőereje és tehetsége volt. Ha a nulladrendű közelítést a tapasztalat igazolta, akkor az elméletet tovább csiszolta és finomította.

Kérhetnénk még néhány jellemző motivumot Szilárd egyéniségéről?

Szilárd megrögzött agglegény volt, akit el sem lehetett képzelni mint házas embert. Pedig megházasodott. Amerikában újra találkozott egy régi bécsi vagy budapesti ismerősével, Gertrúd Weisszel. Valamikor még barátság, talán szerelem is fűzte őket egymáshoz. Néhány év után, úgy 1950 körül, összeházasodtak, de továbbra is külön éltek. Gertrúd az orvosi egyetemen tanított. Igen boldogok voltak mindig együttlétük idején, de önálló életmódjukat nem adták fel.

Mindig nagyon érdekelte feleségem pedagógiai munkássága. Rendkívül értelmes kérdéseket tudott neki feltenni, bár ő egyáltalán nem volt jártas kis, óvodáskorú gyermekek nevelésében. Csak még egy olyan nagy fizikust ismertem, aki elég szerény volt ahhoz, hogy egy nőt, méghozzá tudományos fokozat nélküli, gyakorló pedagógust meghallgasson és információt kérjen tőle. Ez a fizikus pedig Niels Bohr volt, aki több órán át adott fel a feleségemnek intelligens kérdéseket kisgyermekek nevelésére vonatkozóan. Tudományos eredményeiket nem akarom összehasonlítani, de mindkét nagy tudós képes volt igazi intellektuális szerénységre és alázatosságra.

Szilárd igazi jó barát volt. Egy ízben politikai álláspontom miatt anyagi nehézségekkel küzdöttem. Ő vitatta ugyan, hogy álláspontom, melyet képviseltem, helyes, meg akart győzni, hogy nincs igazam, de egyidejűleg komoly pénzösszeget hagyott titokban egy közös barátunknál arra az esetre, ha megszorulnék.

Ilyen ember és ilyen tudós volt!

Kunfalvi Rezső

NEMZETKÖZI FIZIKAI OLIMPIA MAGYARORSZÁGON

A IX. Nemzetközi Fizikai Diákolimpiát Magyarország rendezte 1976. július 1—8-án Budapesten. A versenynek az MSZMP Politikai Főiskolája adott ideális otthont, ahol a gyakorlati verseny kivételével egyetlen helyen lehetett megoldani a rendezvény összes problémáit. A gyakorlati verseny céljára a szomszédos I. István Gimnázium termeiben találtunk alkalmas helyet.

Az Olimpia előkészületei már 1975 nyarán elkezdődtek. Elkészült a program, a részletes ütemterv, a személyi kérdések megoldása, elkezdődött a magyar versenycsapat kiképzése. Tervbe vettük az eddiginél lényegesen több — 18 — ország meghívását. Sajnos a meghívók adminisztratív okokból igen későn — február közepén — kerültek kiküldésre. A pár napos jelentkezési terminus és a rövid felkészülési idő miatt több ország nem is válaszolt, vagy negatív választ küldött. Így is velünk együtt 10 ország jelentette be részvételét: Bulgária, Csehszlovákia, Franciaország,Lengyelország, Magyarország, a Német Demokratikus Köztársaság, a Német Szövetségi Köztársaság, Románia, Svédország és a Szovjetunió, ami eddig a fizikai olimpiákon a legnagyobb szám, továbbá Finnországból érkezett egy megfigyelő.

Az Olimpia védnökségét az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, a Nemzetközi Bizottság elnökségét Marx György akadémikus, egyetemi tanár vállalta. Az elméleti feladatbizottság elnöke Vermes Miklós, tagjai Bodó Zalán, Holics László és Radnai Gyula voltak.

A gyakorlati feladatbizottságot Soós Károly vezette, a munkában részt vett a Budapesti Tudományegyetem Általános Fizikai Tanszékének majdnem minden oktatója, élükön Kovács István tanszékvezető docenssel. A szervezést Kunfalvi Rezső irányította, helyettese Sükösd Csaba volt. A házigazda és irodavezető tisztét Maróti Péter látta el. A munkában az Olimpia előtt és alatt a korábbi nemzetközi és hazai versenyek győztesei, résztvevői és az Ifjúsági Fizikai Kör tagjai vettek részt. A delegációk mellett kísérő tolmácsok, a dolgozatok fordításán nyelvtudással bíró fizikusok dolgoztak. A magyar csoportot Tichy Géza és Sasvári László vezette. Az Oktatási Minisztérium részéről az Olimpia ügyeit Székely György főelőadó gondozta.

A külföldi delegációk július 1-én érkeztek, a többség repülőgépen, néhányan vonaton. Július 2-án délelőtt városnézés volt, du. a Nemzetközi Bizottság alakuló ülését követően megnyitó ünnepélyen Komoróczky Sándorné főosztályvezető üdvözölte a résztvevőket, és Marx György tartott előadást „Mi a fizika?" címmel. A résztvevők átvették az olimpia jelvényét. Este film-

vetítés következett. Az elméleti versenyre július 3-án, a gyakorlati versenyre július 5-én került sor, 5—5 óra munkaidővel. Előtte a vezetők fordították le a feladatok szövegét az angol, francia, német, orosz hivatalos nyelvről. A versenynapokon délután szabad idő, este szórakoztató program (folklór est, Vidám Park) egészítette ki a programot. Július 4-én autóbuszkirándulás volt a Balatonra, július 6-án a Dunakanyarba. A verseny eredményét a Nemzetközi Bizottság július 6-án délután hagyta jóvá, este a tanulók sétahajózáson vettek részt. A vezetők részére az Eötvös Loránd Fizikai Társulat adott fogadást a Technika Házában. Ezen megjelent Hanga Mária miniszterhelyettes, a külföldi és magyar fizikus pedagógusok elbeszélgettek a fizikatanítás modernizálásának problémáiról és megtekintettek néhány újszerű oktatófilmet. Július 7-én délután a záróünnepélyen Polinszky Károly oktatási miniszter osztotta ki a díjakat. A delegációk nevében Ingmar Bartholdson svéd vezető, a tanulók részéről Rafał Łubin lengyel versenyző mondott köszönetet. Ivan Nater a csehszlovák kormány megbízásából bejelentette, hogy az 1977-évi Nemzetközi Fizikai Olimpia Csehszlovákiában lesz Hradec Kralova városában. A delegációk július 8-án utaztak el.

Az Olimpián mindvégig kitűnő hangulat uralkodott. A 10 országból származó fiatalok összeszoktak, az aránylag nem túlságosan zsúfolt program lehetővé tette, hogy beszélgessenek, barátkozhassanak. A társaság összekovácsolásában a francia és a magyar résztvevőknek volt nagy érdemük. A vidám hangulat a búcsúvacsorán vidám éneklésben és táncban érte tetőfokát. A külföldi vezetők kiemelték, hogy a budapesti Olimpia ismét egy újabb magasabb színvonalat jelentett a versenyek történetében, ilyen meleg hangulat eddig még sehol sem alakult ki. Talán az első két Olimpia (Varsó és Budapest) családias légkörét lehet hasonlítani hozzá, ahol a kisebb létszám (15, ill. 24 tanuló) mellett ezt könnyebb volt megvalósítani.

Az elméleti verseny a statutumnak megfelelően 3, a gyakorlati verseny 1 feladatból állt, az utóbbi két egységet képezett az elbírálásnál. A feladatok a következők voltak:

„1. R = 0,5 mm sugarú, üres gömb állandó $\omega = 5\ s^{-1}$ szögsebességgel forog függőleges átmérője körül. A sugár fele magasságában egy behelyezett kis tárgy együtt forog a gömbbel ($g \approx 10\ m/s^2$).

a) Legalább is mekkorának kell lennie a súrlódási együtthatónak, hogy ez az állapot lehetséges legyen?

b) legalább mekkora súrlódási együtthatóra van akkor szükség, ha a szögsebesség $\omega = 8\ s^{-1}$?

c) Vizsgáljuk meg az előbbiekben megállapított súrlódási együtthatók esetében az állapotok stabilitását, ha

α) kicsit megváltozik a tárgy helyzete,

β) kicsit megváltozik a gömb szögsebessége!

2. Az 1 dm^2 alapterületű henger külső fala, dugattyúja és a belső elválasztó fala hőszigetelő anyagból készült. Az elválasztó fal szelepe akkor nyílik, ha a nyomás jobbról nagyobb, mint balról. Kezdetben a 11,2 dm hosszú bal oldali részben 12 gramm, a 11,2 dm hosszú jobb oldali részben 2 gramm hélium van, mindkét részben 0 °C hőmérsékleten. Kinn a nyomás 10 newton/cm^2 = 10^5 pascal. A fajhő állandó térfogaton c_v = 0,75 cal/gfok = 3,15 joule/gfok, állandó nyomáson c_p = 1,25 cal/gfok = = 5,25 joule/gfok.

A dugattyút lassan nyomjuk a válaszfal felé. A szelep kinyílásakor megállunk, majd a dugattyút lassan tovább nyomjuk a falig. Mennyi az általunk végzett munka?

3. Egy üveggömbben valahol gömb alakú levegőbuborék van. Ismertessünk módszereket, amelyekkel a légbuborék átmérőjét meghatározhatjuk! (Az üveggömb megsértése tilos. Az eljárások leírása legyen minél pontosabb.)

4. (Gyakorlati feladat.) A munkahelyen egyéb eszközök mellett rendelkezésre áll egy 12 V feszültséggel fűthető kémcső, ismert fajhőjű (c_0 = 0,5 cal/g °C) folyadék és ismeretlen termikus tulajdonságú X anyag. Az X anyag a folyadékban nem oldódik.

Vizsgálja meg az X kristályos anyag termikus tulajdonságait szobahőmérséklet és 80 °C között! Határozza meg az X anyag hőtani jellemző adatait! Mérési adatait foglalja táblázatba és ábrázolja grafikusan is!

(Csak az asztalra készített eszközöket és anyagokat használhatja, az elrontott eszközök és elhasznált anyagok nem pótolhatók.)

A feladatok igényesek, az első kettő a klasszikus mechanika és a termodinamika következetes, hibátlan alkalmazását kívánta, a harmadik önálló gondolkodást és ötletet. Ugyanezt mondhatjuk a mérési feladatról, mely elvárta a módszer megtervezését és technikai kivitelét. Aki hibás elgondolásból indult ki, a rendelkezésre álló anyaggal nem tudott bánni, az észleltekből nem tudott jól következtetni — nem ért el eredményt. A feladatok megoldását és részletes diszkusszióját a Középiskolai Matematikai Lapok Fizika Rovata az 1976 novemberi számban közli.

Egy feladat kifogástalan megoldásával maximálisan 10 pontot, a gyakorlati feladat esetében (terv, értékelés, technikai végrehajtás) 20 pontot lehetett nyerni. Így az elérhető maximális pontszám 50-nek adódik.

A ténylegesen elért legmagasabb pontszám 47,5 volt (Rafał Łubin lengyel tanuló). Ezt tekintve 100%-nak, I. díjat azok a tanulók kaptak, akik *ennek* 90%-át, legalább 42 pontot kaptak. A II. díjhoz legyalább 78% (37 pont), a III. díjhoz 65% (30 pont), dicsérethez 50% (23 pont) volt szükséges. A Nemzetközi Bizottság úgy határozott, hogy a tizedes törteket a pontok esetében lefelé kerekíti, ami erősen emelte a kiadott díjak számát. A versenyen való részvételről mindenki kapott emléklapot. Így kiadásra került 7 első, 7 második, 12 harmadik díj és 13 dicsérő oklevél. Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat jutalmat adott minden ország legeredményesebb versenyzőjének, és külön díjjal tüntette ki Rafał Łubin lengyel tanulót a feladatok különösen szép megoldásával elért kiemelkedő eredményéért. A résztvevők között ezúttal 3 lány is akadt, eddig a legnagyobb szám.

A magyar csapat tagjai közül Vankó Péter (Budapest, Móricz Zs. Gimn.) III. díjat, Faragó Béla (Csongrád, Batsányi J. Gimn.), Gulyás László (Orosháza, Táncsics M. Gimn.), Virosztek Attila (Szolnok, Verseghy F. Gimn.) dicséretet, Zimányi Gergely (Budapest, Fazekas M. Gimn.) emléklapot kapott.

Hivatalos pontverseny nincs. Az elért pontszámok összege országonként: Bulgária 120 pont (1 harmadik díj, 2 dicséret), Csehszlovákia 158 pont) 2 második, 1 harmadik díj, 1 dicséret), Franciaország 134 pont (1 első, 1 harmadik díj, 2 dicséret), Lengyelország 170,5 pont (2 első díj, 3 dicséret), Magyarország 134,25 pont (1 harmadik díj, 3 dicséret), NDK 174 pont (3 második, 1 harmadik díj, 1 dicséret), NSZK 114 pont (3 harmadik díj), Románia 179,5 pont (1 első, 1 második 3 harmadik díj), Svédország 81 pont (1 harmadik díj), Szovjetunió 194,75 pont (3 első, 1 második díj, 1 dicséret).

Minden mérlegben fel kell tüntetni a pozitív és a negatív oldalt. A budapesti Olimpia esetében a pozitív oldalon áll a kitűnő hangulat, a verseny színvonala, a nemzetközi siker. Vendégeink megelégedetten távoztak, sikerült a múlt évi igen jól szervezett rendezvényhez hasonló, bizonyos vonatkozásokban azt túlszárnyaló élményt nyújtanunk. Köszönhető a versenybizottságoknak, a rendező társadalmi aktíváknak (szervezés, kísérők, tolmácsok), a vendéglátó Főiskolának és kétségkívül a jó hangulatot teremtő magyar fiataloknak is.

A negatív oldalon áll az, hogy a későn szétküldött meghívók miatt nem sikerült a résztvevők számát lényegesen emelnünk, továbbá a magyar csoport meglepetésként ható gyenge szereplése. Az utóbbival részletesen kell foglalkoznunk, hogy belőle a tanulságokat a jövő évre levonhassuk.

Vizsgálódásainkban támaszkodhatunk egyrészt konkrét számokra, másrészt nem mérhető, de erősen érezhető tényezőkre.

Mint tudjuk, az évente felváltva különböző országokban rendezett Nemzetközi Fizikai Diákolimpia egyéni verseny. Meghatározott százalékos teljesítmény után első, második, harmadik díj, ill. dicséret jár. Mégis — más versenyekhez hasonlóan — szokás az elért pontszámokat összegezve rangsorokat készíteni. Felfogásom szerint a találkozó célja elsősorban nem a versengés, nem a

pontokért folytatott harc, hanem ismerkedés, tapasztalatcsere, barátkozás, ismeretek kiegészítése, más szempontok megismerése. Valamit azonban a pontokból is ki lehet olvasni. Ezeknek az elemzésére teszünk kísérletet a jelen és a jövő szempontjából anélkül, hogy „számfetisizmusba" esnénk.

Több kérdés merül fel. Meg kell vizsgálnunk, hogy a feladatkitűzés módja a fizikai Olimpiákon a legalkalmasabb-e, mit tehetünk a magyar csapat jobb kiképzése, előkészítése érdekében, és végül milyen következtetéseket lehet levonni fizikaoktatásunkra, sőt általában iskolai oktatásunkra vonatkozólag.

Az eddigi 9 Olimpián legnagyobb pontszámmal végzett háromszor a szovjet, háromszor a magyar csapat, 1—1 alkalommal a csehszlovák román, ill. az NDK csapat. „Hazai pályán" 5 ízben volt első a vendéglátó (egyszer a magyar), 4 alkalommal idegen csapat (ebből kétszer a szovjet és kétszer a magyar). Ezek a számok gondolkodásra késztetnek olyan vonatkozásban is, hogy nincs-e a feladatkitűzés rendszerében valami hiba. A feladatokat a fizikaversenyeken elfogadott statutum szerint a vendéglátó tűzi ki. Ennek előnye az, hogy az évről évre más típusú, más fogalmazású példákból tanulni lehet. Az elméleti feladatokat kidolgozhatná közös bizottság is. Ez azzal a veszéllyel jár, hogy a bizottságokban gyakran az utolsó pillanatban felvetett módosítások és a szövegezés nyelvi nehézségei miatt könnyen becsúszhatnak hibák. Az idei feladatokkal kapcsolatban — ellentétben a múlttal — semmiféle kifogás nem merült fel. Gyakorlati feladatra azonban csak olyasmi javasolható, amit a vendéglátó ország meg is tud valósítani. Hiába említette itt pl. a svéd vezető, hogy egy ragyogó, modern ötlete van — de ehhez honnan tudtunk volna 50 lasert és további felszerelést előteremteni? Az Olimpia végén beszélgettem a csehszlovák delegátussal a statutum valamiféle módosításának lehetőségeiről, de lényeges változást aligha lehet javasolni. Felmerültek gondolatok arra vonatkozólag, hogy a pontozás módját részletesen elő kellene írni. Hosszú vita után a Nemzetközi Bizottság úgy döntött, hogy a pontozásban nem lehet megkötni az elbírálók kezét mereven, főként szellemes, újszerű megoldások esetén kell rugalmasan, értelemszerűen eljárni. Budapesten a külföldi delegátusok ismételten hangsúlyozták, hogy a „fair play" elve teljes mértékben érvényesült. A feladatkitűző bizottságok és a magyar csapat előkészítői egymástól teljesen függetlenül dolgoztak, a legtökéletesebb titoktartás mellett semmiféle hír a kitűzésre kerülő feladatokról nem szivárgott ki — amit éppen az eredmény igazol leghatásosabban. Eddig csak Bulgáriában történt meg, hogy a házi csapat ennyire lemaradt.

A legtöbb olimpián disszonáns jelenség a vezetők harca pontokért, miután a tanulók már versenyeztek. Ezúttal alig kívántak néhány korrekciót — összesen 11 esetben, általában a fordítás homályos helyei miatt. Mindenki meg volt győződve a magyar bizottságok korrekt eljárása felől.

A magyar csapat előkészítése gondos és alapos volt. A téli és a tavaszi szünetben megtartottuk a szokásos ankétot 200—200 résztvevővel. 40 tanuló levelező oktatás keretében havonta kapott elméleti és gyakorlati feladatokat. Májusban az egyhetes előkészítőn 21 tanuló, június végén a 3 napos előkészítőn 6 tanuló vett részt. Tervbe vettem a matematika mintájára a vidéki tanulók felhívását legalább havonta egyszer, de ezt a Minisztérium pénzügyi okokból nem engedélyezte. A versenycsapat kiválogatásánál az elért eredmény volt mérvadó. Faragó Béla 1974/75-ben és 1975/76-ban is helyezett volt az Országos Középiskolai Versenyen, továbbá II. díjat nyert az 1975. évi Nemzetközi Olimpián. Gulyás Mihály 1975/76-ban helyezett az Országos Középiskolai Tanulmányi Versenyen, és dicséretet nyert az Eötvös Versenyen. Vankó Péter kitűnt az 1975/76-os Országos Középiskolai Tanulmányi Versenyen. Virosztek Attila helyezett volt az 1974/75-ös és az 1975/76. évi Országos Középiskolai Tanulmányi Versenyen, harmadik díjat nyert az Eötvös Versenyen és az 1975. évi Nemzetközi Olimpián. Zimányi Gergely első az 1975/76. évi Országos Középiskolai Tanulmányi Versenyen és második az Eötvös versenyen. A szélesebb keretben akadt még több igen kiváló tanuló is, de a kísérletezésben a kiválasztottaktól többet lehetett várni. Mind a kilenc eddigi olimpiai csapatot ismerve, azt kell mondanom, hogy ha akadtak is egyes kiválóbb versenyzőink (Szalay Sándor, Takács László, Maróti Péter), mint együttes kétségkívül a mostani volt a legerősebb.

Ezekután felmerül a kérdés: ha a csapat ilyen erős volt, akkor mi lehetett az oka az aránylag gyenge eredménynek? Miért csak a legfiatalabb tag nyújtotta azt, amit tőle várni lehetett.

A legegyszerűbb felelet az lenne, hogy a magyar csapat jó volt, de a többi még jobb. Természetesen ezzel a magyarázattal nem elégedhetünk meg. A verseny részletes elemzése a jövő szempontjából igen tanulságos számunkra.

Nézzük meg az eredményt *az elméleti verseny végén.* A pontszámok: SzU 120,75, Románia 112,5, NDK 108, Magyarország 106,25. Tehát annak ellenére, hogy Faragó Béla aránylag gyengébben szerepelt, a negyedik helyen álltunk és a rangsor elég szoros. A további 6 csapat lényegesen nagyobb közzel következik. Továbbmenve, ha csak *az első két feladat* eredményét nézzük, a sorrend rendkívül érdekes és jellemző: Magyarország 87,25, Románia 84,5, SzU 78,75, NDK 77. Az első két feladat valamelyikére összesen 9 versenyző kapott 10—10 pontot, ezek közül három magyar. Az első két feladatra együttesen 4 versenyző kapott 19 pontot (20 pontot senki), ezek közül 3 magyar. Tehát *az első két feladattal tanulóink vezettek.* A harmadik elméleti feladatnál kezdődött a visszaesés, de akkor még mindig a negyedik helyen álltunk. A gyakorlati feladat megoldása tanulóinknak egyáltalán nem sikerült. Itt az élen Lengyelország (81 pont), a SzU (72 pont), Csehszlovákia (70 pont), Románia (67 pont), az NDK (66 pont) állt, a magyar együttes 28 ponttal utolsó. A számok igen sokat elárulnak.

A verseny után megbeszéltem és leírattam tanulóinkkal véleményüket. Ezekből idézek:

„Az első két feladat jól sikerült (bár az első példa nekem jócskán elhúzódott, ezért nem maradt idő a harmadik feladatra). Ennek oka, hogy ehhez hasonló feladatokat bőven találunk az OKTV-en és a KöMal-ban is, lényegében ilyen jellegű példák voltak az előkészítőn is, hőtanba még mélyebben is belemerültünk. Ebben a két példában hosszú, figyelmes munkára volt szükség, de különösebb ötletre nem.

A harmadik példával már problémák voltak: Lehet, hogy több időt kellett volna rá hagyni. Mindenesetre ide ötletek kellettek. A megtorpanásnak oka lehetett hogy ilyen jellegű példákkal keveset találkozunk. Mindenesetre ezek után még semmi sem volt elveszve. De jött a mérés, ami végképp beadott nekünk. Átlagosan 28%-osan oldottuk meg. Egészen váratlan volt a mérés jellege. Mindenki elektromos példát várt — az elméleti feladatok után —, az előkészítőn is az elektromos mérések voltak túlsúlyban. Az előkészítőn és az iskolában egyaránt szilárd anyagok — általában fémek — fajhőjét mérjük. A módszer benne van minden iskolai könyvben, sok gondolkodást ezek a mérések nem igényeltek.

Itt ezzel a módszerrel nem lehetett sok pontot szerezni.

Egyszerre kellett volna végigmérni 25—70 fokig az anyagot — erre senki nem gondolt. Pláne nem gondoltunk ilyen apróságokra, hogy egy anyagot csak egyszer lehet felhasználni, mert elveszti a kristályvizét és megváltozik. . .

A sikertelenség oka valószínűleg az, hogy még a szakosított osztályokban sincs rendszeres mérés. Nálunk is két-három mérés volt egy évben. Mindenhol — az érettségihez és felvételihez szükséges — példamegoldást tartják fontosnak. Kísérleti fizikával, problémamegoldással, méréssel csak nagyon keveset foglalkozunk az iskolában.

Többen mondták, hogy elbizakodott volt a csapat, de nem hiszem, hogy ez rontotta volna az eredményeket. Bennünk is volt izgalom a verseny előtt, bár kétségtelen, hogy a hazai környezet miatt biztosabb volt a kiállásunk.

Mindenesetre egy figyelmeztetés volt ez az olimpia. részben nekünk, hogy többet foglalkozzunk problémamegoldással, hogy ezen a téren le vagyunk maradva,

részben pedig a jövőre nézve: a lehetőségekhez képest nagyobb súlyt kell fordítani az ilyen irányú előkészítésre. *Azt hiszem, hogy az iskolákban is jobban szeretnék a fizikát, ha több kísérlet, mérés, gyakorlati példa lenne.*

Remélem, hogy jövőre jobban sikerül a küzdelem, tanulunk az esetből." (Vankó Péter)

„Számomra, és azt hiszem, a csapatnak is a legnagyobb sikertelenséget a mérés okozta. Ennek, úgy érzem, több oka van. Talán a legkisebb ok, hogy közvetlen előtte volt a balatoni kirándulás. Igaz, hogy ezen mindenki ott volt, de nekem személy szerint úgy érzem, hogy rontott valamennyit a teljesítményemen.

A másik, szerintem sokkal lényegesebb ok, hogy az előkészítőn a mérések teljesen rutin jellegűek. Meg van adva, hogy ezt és ezt mérd ki, az is meg van adva, hogy hogyan kell mérni és csak végre kell hajtani. Az olimpián pedig se az nem volt megmondva, hogy mit kell mérni, bár az sejthető volt, se az, hogy hogyan. A másik dolog még, hogy az előkészítő során mindig tudtuk, hogy kb. minek kell kijönni, és ha az ember egy nagyon vad eredményt kapott, azt egyszerűen elvetette, és be sem írta a jegyzőkönyvbe. Az ehhez hasonló további kudarc elkerülése érdekében szerintem a következő előkészítőn a harmadik feladathoz hasonló gondolat-kísérleteket lehetne feladni." (Faragó Béla)

„Végiggondoltam tevékenységünket a fölkészüléstől kezdve.

Itthon és az előkészítőkön csak olyan feladatokat oldottam meg, amelyeknél nyilvánvaló volt, melyik összefüggést kell alkalmazni. Ezekből az egész csapat jól fölkészült. . .

Az előkészítőn csak rutinmérést végeztünk, ami érthető, de a havonta küldött mérési feladatok szerintem változatosak és ötletesek voltak. Ennek ellenére már a verseny előtt éreztem, hogy gyakorlatból gyöngébb vagyok, mert keveset mértem, s gyakorlati érzékem sem jó. . .

Fölvetődik a kérdés. Az első: könnyelmüsködtünk-e. Ezt támogatná, hogy nagy reményekkel indultunk, és föltűnően élénkek voltunk (lezserek, hangosak, elkéstünk stb.). Szerintem ez mindenképpen túlzás. Az általánosan elfogadott (bár lehet, hogy téves) nézet, hogy nem érdemes közvetlenül a verseny előtt tanulni. Ez alapján nem sokat beszéltünk a fizikáról. Biztos, hogy jobb versenyszellemet is kialakíthattunk volna, de így is mindnyájan éreztük, hogy az országot képviseljük. Talán figyelmünk szétszórtsága bosszulta meg magát a versenyen, ahol talán nem tudtunk a fizikára összpontosítani." (Gulyás Mihály)

„Úgy vélem, el kell különíteni rövid és hosszútávú okokat. Hosszú távon vitathatatlan, hogy kevés mérési feladattal találkoztunk. Általában az ún. klasszikus típusú példák megoldásában fejlődtünk. Ez azt jelenti, hogy a gondolkodásunkban nem volt szükséges az egyenletek felírása előtt egy olyan szakasz, amikor a jelenség lefolyását kellett felidéznünk. Úgy értem ezt, hogy a megközelítés módja az első pillanatban világos volt. Tudjuk, hogy ha nem is lesz szép a megoldás, ezekkel az egyenletekkel „biztosan kijön". Az előkészítőn többször is volt, hogy nem tudtunk megoldani egy példát. Utána azonban éreztük, hogy csak éppen valamilyen közismert tény nem jutott eszünkbe. Tehát nem valamilyen alapvető hiba napfényre jötte volt ez, hanem hiányosság. Mivel olyan példák, mint a 3., vagy a mérés, nem kerültünk szembe, nem is tudtunk ezen a vonalon alapvető hiányról. Az előkészítő során nem kerültünk szembe komoly problémával. Ezért alakulhatott bennünk (legalábbis bennem) a magabiztosság. Úgy éreztem, mindent tudok a klasszikus példák megoldásához, s ez nagyrészt igaz is volt. Viszont így nem éreztem eléggé a feladat nagyságát, ami előttem állt. Úgy éreztem, platón állok, ahonnan majd az egyetemen tovább kell lépni. Nem láttam eléggé, hogy minden problémával meg kell küzdeni.

A mérésről. Az összes, életemben végrehajtott mérés számomra csak szórakozás volt. Nem tudtam (nem tudok) olyan „mérési fogásokat", mint a példamegoldásnál. Nem kaptam visszajelzést arról, hogy milyenek a méréseim. Ezek hiányában semmi ilyen típusú gyakorlati érzék nem fejlődött ki bennem. Tehát ki lehet agyalni elvileg helyes méréseket, de nem tudom magam megmondani, hogy a gyakorlatban melyik hajtható végre. Ezért javasolok a MATLAP-ban, vagy akár az olimpiai előkészítőn sok olyan példát, hogy „Hogy mérnéd meg" vagy a Nuffield-könyv alapján az ehhez nagyon hasonló „Adjon becslést a következő értékekre" [pl. egy gumilabda mennyi hőt fejleszt, amikor lepattan, keverékek jellemzői (olvadáspont stb.)]. Ezek nagyon fejlesztenék a valóságérzéket. Pl. a röntgensugár abszolút gyakorlati dolog, nem kellett ész a kitalálásához, csak ismeret. Példaként említeném, hogy a Nuffieldben van egy olyan példa, hogy „Becsülje meg egy jéggyűrű ellenállását. (Tekintse egymenetes tekercsnek.)" Fogalmam sincs arról, hogy hogyan fogjak hozzá. Teljesen idegen a probléma.

A rövid hatótávú okokat lényegében leírtam, talán csak a hazai pálya biztonságérzetét kell még említeni. („. . .Elmegyek az olimpiára 75-ös trolival.") Azt hiszem, hogy általában nem éreztem olyan nagynak ezt az eseményt, és ez ütött vissza. . .

Lényegében ezek a gondolataim. Szerintem láthatóan egyoldalú volt a felkészülésünk, s ez rögtön kiütközött, ahogy más területen is számot kellett adni tudásunkról. Mi magunk is levonjuk (levontuk) ebből a tanulságot, de az utánunk jövőknek jó lenne, ha már nem ilyen szomorú körülmények között kellene rájönni minderre." (Zimányi Gergely)

„Ha megnézzük a feladatonkénti pontszámokat, megállapíthatjuk, hogy az első két feladat után még igen előkelő helyen állhattunk, hiszen majdnem mindenki a maximális pontszámot kapta. Ez körülbelül el is várható, hiszen a feladatok stílusa ismert volt számunkra.

De a méréseknél (az elméleti 3. példát is ide sorolom, hiszen mérési módszert kellett megadni) az egész csapat nagyon gyengén szerepelt. Ennek nyilván az az oka, hogy csak a feladatmegoldásban vagyunk járatosak, a mérésekben nem. Azt hiszem, hogy erre kézenfekvő magyarázat, hogy a középiskola négy éve alatt szinte alig végzünk méréseket, otthon ezt eszközök hiányában nem tehetjük meg, az előkészítőn a mérések pedig csekély számuk miatt nem tölthetik be hivatásukat.

Társaimmal való beszélgetéseink során még egy szomorú tényre jöttünk rá. Az első két példához nem kellett különösebben gondolkodni, hiszen mindenki tudta, hogy ilyen példákat milyen gondolatmenetet követve kell megoldani. De amint olyan feladatok álltak előttünk, amelyekhez ún. fizikus gondolkodás volt szükséges, csődöt mondottunk. Ezek szerint olyanok vagyunk, mint a számítógépek. A középiskolában és a KÖMAL megoldások során begyakorolt „programokkal" bármilyen, a témába beillő feladatot meg tudunk oldani, de ha a feladathoz nincsen sémánk, akkor az egész szerkezet „zárlatos" lesz.

Összefoglalva a kudarc legfőbb okainak (amelyek természetesen összefüggenek egymással) a mérések és a gondolkodás hiányát tartom." (Virosztek Attila)

„Az olimpia elméleti versenyén a versenyzők három feladatot kaptak. Az első kettő bizonyos értelemben hagyományos feladat volt, a feladat szövegéből világosan látszott, hogy milyen módon kell a probléma megoldásához hozzáfogni, mit kell végiggondolni és végigszámolni. Ezek a példák az eddigi diákolimpiákon nehéz feladatoknak számítottak volna. . . *A harmadik feladat jellege eltért a megszokottól, a kérdésfeltevés sokkal általánosabb volt. Ezen a feladaton a magyar csapat sok pontot vesztett.*

A kísérleti feladat a pontok 40%-át adta. A versenybizottság egy termodinamikai problémát tűzött ki, egy ismeretlen anyag ($Na\ S_2O_3$) hőtani tulajdonságait kellett meghatározni. *Már az előző olimpiákon is csapatunk általában az elméleti feladatok megoldásakor szerezte előnyét*, a mérés kevésbé ment. Ez ezen az olimpián is beigazolódott. A harmadik elméleti és a kísérleti feladat okozta a gyengébb szereplést.

Úgy tudom, hogy azt, hogy az Országos Középiskolai Tanulmányi Versenyen kísérleti verseny is van, a fizikai diákolimpia ösztönözte. Ez a nemzetközi mezőnyben idáig elégnek tűnt. Az idei olimpia tanulságaként levonhatjuk, hogy több súlyt kell fektetnünk a szabadabb, kötetlenebb feladatokra, amilyen a harmadik elméleti fel-

adat volt, és jóval többet kell foglalkoznunk a fizikai ismeretszerzés legfontosabb oldalával, a kísérletezéssel." (Tichy Géza, a magyar versenycsapat vezetője)

Az idézett levelekből kommentár nélkül is le lehet vonni a következtetéseket. Legyen szabad a leglényegesebbeket kiemelnem és némileg kiigazítanom.

Bebizonyosodott, hogy tanulóink a) rutint kívánó feladatokat könnyedén és kiemelkedően jól tudnak megoldani. b) Még a legkiválóbbaknál is hiányzik a gyakorlati, kísérletező készség. c) Hiányoznak elemi kémiai ismeretek, d) a szokottól eltérő problémák nehézséget okoznak, ha új gondolatot kívánnak.

Kiegészíthetők ezek a tapasztalatok a következőkkel:

1. A magyar elméleti iskola túlsúlya. Kétségkívül jelentős tényező ebben a matematikai iskola kiválósága is. A „kényelmesebb" elméleti kutatás nagy vonzereje mellett ebben az objektív feltételek hiánya játszik szerepet. Az egyetemeken sem alakult ki igazi kísérleti fizikai iskola.

Az előkészítőn csak rutinkísérletek elvégzésére van lehetőség. Az egyetem felszerelése szerény, a kísérletek összeállítása, ellenőrzése, az eredmények feldolgozása rendkívül időigényes feladat, óriási megterhelést ró az előkészítő egyetemi oktatókra, akik ezt tudományos munkájukat és családjukat elhanyagolva, lényegileg társadalmi munkában végzik. Az olimpia gyakorlati versenyét előkészítő egyetemi oktatók napokon át éjjel-nappal maguk készítették el a használt eszközöket 102 példányban, mert a szerény költségvetési keret laboránsok igénybevételét nem tette lehetővé!

2. Az eddigi olimpiákon túlsúlyban voltak a rutinfeladatok. Tanulóink ezeket könnyűszerrel oldották meg, sokkal gyengébb együttesek értek el jobb eredményt.

3. Az első olimpiák sikere után a magyar csapatnak kialakult jó hírneve volt. (Úgy, mint az iskolában: az első néhány ötös jegy már a következőket vonja maga után.) Ez a tekintély idehaza nem segített. Megjegyzem, hogy mi — ellentétben más vezetőkkel — egyetlen olimpián sem kértük a pontszámok bármiféle emelését, mindenkor kijelentettük, hogy teljes bizalommal vagyunk a bíráló bizottságok iránt.

Nézzünk általánosabb szempontokat.

Fizikaoktatásunkat vizsgálva tekintsünk vissza a múltra. Nem oly régen még az iskolai fizika alig jelentett többet, mint egyes jelenségek megismerését (rendszerint csak könyvből és igen kevés kísérlet vagy megfigyelés alapján), és törvények megtanulását. (L. hazai és külföldi szerzők cikkeit a Fizikai Szemlében) A törvények alkalmazására alig került sor. Ha a 30-as évek fizikatankönyveit nézzük, alig találunk bennük feladatot. Az Eötvös Versenyben szereplő feladatok mai szemmel nézve egészen primitívnek tűnnek fel. A változás 1945 után következett be. Nagy szerepe volt ebben főként Vermes Miklós kitűnő feladatgyűjteményeinek. (Az 1950-ben megjelent és rendkívül gyorsan elfogyott „Mechanikai példatár" ma is megérdemelne új kiadást!) A feladatokat fokozatosan átvették a tankönyvek, a felvételi vizsgák rákényszerítették a tanulókat a feladatmegoldás gyakorlására, újabb gyűjtemények mind nagyobb mértékben segítettek kész sémákkal. 1959-től a Középiskolai Matematikai Lapok közölt rendszeresen évente kereken 100 feladatot, a különféle versenyek is elszaporodtak. A feladatmegoldásban országos viszonylatban sikerült egy bizonyos rutint, az élgárdánál pedig egy magasabb színvonalat elérni. Távolról sem akarjuk azt mondani, hogy ezen a téren minden rendben lenne. Éppen az egységes egyetemi írásbeli felvételin derül ki, hogy a jelentkezők százai nem ismerik fel az egyenesvonalú egyenletes mozgásnál az úttörvényt vagy az áramköri feladatokban az Ohm törvényt stb. Korai volna általánosságban „feladatcentrikusságról" beszélni. Még igen sokat kell tenni annak érdekében, hogy a tanulók *átlaga* egy adott szituációt megértsen és a tanultakat arra az esetre alkalmazni tudja. A csupán feladatmegoldásra épített tanítás azonban elszakadhat a valóságtól, és egyoldalú túlzásba vihet, ha a krétafizika egy másik fajtájává válik. A tanuló nem a valóságot, hanem a „példát" látja maga előtt, nem a természettel, hanem a leegyszerűsített modellel foglalkozik. Nem kísérletez, megfigyel, következtet, hanem betanult eljárásokat alkalmaz. A megoldás? Több kísérlet, több gyakorlat. Mi szükséges? Eszköz, idő, hozzáértő tanár, óraszám, megfelelő felszerelés, technikai segítség. Merre tovább? Fizikus gondolkodásra nevelés, tanítás és a tanulás súlypontjának áthelyezése a kreatív gondolkodásra. Meg kell jegyeznünk, hogy eddig is voltak gondolkodtató feladatok (felhívhatom a figyelmet éppen az előbb említett Vermes-féle mechanikai feladatgyűjteményre, amelynek példái ma is komoly gondolkodásra serkentenek!), de ezek nagy része a módszerek elsajátítása folytán rutinfeladattá változott. Az elmélet és kísérlet szorosabb kapcsolata. Erre kitűnő példa éppen Vermes Miklós nívódíjas kis könyve, a „Fizikai kísérletek — fizikai feladatok" (Műszaki Kiadó), amelyet alig ismernek.

Ötleteket persze nem lehet napszámban termelni, és a közölt és begyakorolt ötlet, a megtanult „gondolkodtató feladat" már nem ötlet és nem feladat többé.

A gondolkodtató, kreatív tanulás és tanítás hiánya miatt nem lehet egyedül a fizikatanítást elmarasztalni. Sőt! Kémiatanításunk elmaradt a világszínvonal mögött, a legjobb tanulók sem ismerik egyszerű anyagok sajátos tulajdonságait, ami éppen az Olimpia gyakorlati feladatánál volt katasztrofális. A humán tárgyak tanítása pedig teljesen dogmatikus, vélemények, értékelések, bemagolásából áll, jegyzetek, tételsorok kidolgozására helyezi a súlyt, ami már sokszor a II. osztályban elkezdődik és az érettségin éri el tetőpontját.

Sajnos a tanulók sablonokban gondolkodnak, tételeket tanulnak. A középiskolának és elsősorban a gimnáziumnak önálló gondolkodásra, véleményalkotásra kellene nevelnie. Az érettségi szabályzataink már régen azt kívánják, hogy a jelölt arról tegyen tanúságot, a tanult anyag alapján önálló szintézisre képes. Az elnöknek erre kell figyelnie, ez jelenti az „érettséget". Mégis mikor nemrégiben az Eötvös Loránd Fizikai Társulat egy ankétot tartott a közös érettségi és felvételi feladatok problémáiról, a cél kifejtése után az első felszólaló azzal kezdte, hogy hogyan készítsenek elő vizsgát, ha a *tételeket* még meg sem kapták. Egy előkészítőn a hallgatók azzal fordultak hozzám, hogy ne magyarázzak, hanem adjam meg a *képletet*, amelybe helyettesíteni kell.

Múlt évi beszámolómat azzal zártam, hogy a következő — budapesti — Olimpia „demonstrálni fogja fizikatanításunk színvonalát és alkalmat ad összehasonlításra különböző országok legjobb fiataljainak, a tudomány jövő képviselőinek tudása között". Ha a most kialakult képből le akarjuk vonni a következtetést, akkor a rövid lejáratú és távlati teendők egész sora áll előttünk. Ezek közül kevésbé fontos és kisebb kört érint a jövő évi Olimpia előkészítése: a matematika mintájára több idő és több munka befektetése. Nem lehet takarékoskodni a vidéki tehetséges tanulók gyakoribb utaztatásával, a kiképzők (fiatal egyetemi oktatók, családdal, lakásproblémákkal) megfelelő díjazásával, anyagi bázis előteremtésével a mérő kísérletek lehetővé tételére legalább az egyetemi intézetekben, ahol az előkészítés folyik.

Szélesebb kört érint pl. a megfelelő kiadványok problémája. Míg matematikából évente több kitűnő tanulóköri füzet jelenik meg a Tankönyvkiadó Vállalat kiadásában — *a fizikai irodalom rendkívül szegényes*. Éveken át újra és újra kértem a tananyagot kiegészítő, színvonalas könyvek rendszeres kiadását a középiskolai ifjúság számára. A versenyfeladatok fizikából 1958-ig ill. 1964-ig (Eötvös Verseny, ill. Középiskolai Tanulmányi Verseny) jelentek meg, matematikából szinte a mai napig. Az olimpiai feladatok egyáltalán nem állnak rendelkezésre könyv alakban. A Középiskolai Matematikai Lapokban a Fizika Rovat terjedelme havonta 16 oldal (a matematika 32). Cikkek, érdekes mérések közlésére, az általános iskolai ifjúsággal való foglalkozásra nincs lehetőség a szerény terjedelem éppen csak a feladatok és megoldások közlésére elég. A fizika sajnos sokszor mostoha elbánásban részesül.

Tanszergyártásunk és az iskolák tanszerellátottsága változatlanul aggodalomra ad okot. Erre a Fizikai Szemle ismételten rámutatott. Különféle rendeletek előírták több ízben a tanulókísérleteket, a gyakorlati órákat, az érettségi vizsgán megkövetelendő kísérletet, de sajnos rendelettel nem lehet megoldani a kísérletezést. Ehhez

eszköz, képzett tanár, megfelelő helyiség (amit nem osztályteremnek használnak), technikai segéderő szükséges. Mindezt sokan és sokszor elmondták, a fizika azonban változatlanul mostoha gyermek maradt az iskolában. A tények: alacsony óraszám, az objektív feltételek hiánya.

Tudjuk, hogy nem versenyezhetünk a szovjet speciális iskolák heti 20 órás fizikaoktatásával. Nem építhetjük be a fizikaoktatás fejlesztésére szánt összegeket a honvédelmi költségvetésbe, mint az Egyesült Államokban történt, de néhány elsőrendű tennivaló a megvalósítás lehetőségei közé tartozik nálunk is. Ilyenek:

Jó olvasókönyvek a fizikához a tanulók kezében.

Több kísérlet, ehhez eszköz az iskolának.

Több és modernebb fizika.

Ha a katedrákon gondolkodni tudó tanárok ülnek, akkor a tanulók is fognak gondolkodni, és ismét jobb eredményt várhatunk a jövő olimpián.

A Természet Világa c. folyóirat májusi számában, az Olimpia előtt írt rövid cikkemet a következő mondattal zártam: „Reméljük, a verseny az eddigieknél is magasabb színvonalú lesz, és gazdag pedagógiai tanulságokkal jár!" Rajtunk múlik, hogy a beteljesedett jóslat második fele milyen mértékben fogja előre vinni fizikatanításunkat.

Kunfalvi Rezső

europhysics

Az Európai Fizikai Társaság III. Általános Konferenciája és Tanácsülése (1975. szept. 7—12) Bukarest

Az Európai Fizikai Társaság (EPS) Tanácsülését, az EPS harmadik általános konferenciájához kapcsolódva tartotta meg.

A Tanácsülésen a tanácsadó bizottságok és szakosztályok beszámolói illetve azok megvitatása után a tagdíj emelés kérdése került napirendre. Mivel a vita alapján látható volt, hogy a többség meg fogja szavazni, a mi küldöttségünk is megszavazta a 15%-os tagdíj emelést 1976. jan. 1-től, kikötve, hogy a többlet összeget forintban fizethessük (ugyanígy járt el a lengyel küldöttség is).

A Tanács határozott abban is, hogy következő ülése 1976. ápr. 5. és 8. között lesz Lipcsében. A negyedik általános konferencia vagy valahol Dél-Skandináviában (Malmö) vagy Angliában lesz 1978-ben, de a tárgyáról még nem történt döntés.

A Tanácsüléshez kapcsolódott a szocialista országok tanácstagjainak megbeszélése a konferencia idején. Itt Ursu professzor (Románia) jelölésében állapodtak meg az EPS elnöki tisztére. Röviden még két további kérdés is szóbakerült ezeken a megbeszéléseken. Az egyik, hogy a szocialista országok kifejezetten a NATO által szervezett tudományos iskolákra ne küldjenek fizikusokat (ez nem vonatkozik az olyanokra, amelyeket a NATO csak több más intézménnyel együtt támogat), a másik, hogy esetleg hasznos lenne az EPS szocialista tagjainak egy ún. „branch secretariat"-ot felállítani, ahol pl. a EPS kiadványok sokszorosításra kerülhetnének. Döntés nem történt, de az NDK kiküldöttei kijelentették, hogy ők tudnának vállalni egy ilyen feladatot.

Ami magát a konferenciát illeti, az mint ismeretes, lényegében az EPS és az európai fizikusok vándorgyűlése. A harmadik ilyen jellegű konferencia tárgyköre: „Energia és Fizika" jól volt megválasztva, végeredményben a fizika egyik ágában dolgozó fizikustól sincs távol. Így érthető, hogy mintegy 600 résztvevő gyűlt össze Bukarestbe elsősorban Európából, de voltak Európán kívüli (főleg amerikai) résztvevők is.

A konferencián délelőtt általában plenáris ülések folytak, délután pedig speciálisabb előadások öt pararell szekcióban. Esténként került sor a „Powell Memorial Lecture"-re (Weisskopf), az EPS Közgyűlésére és egy vitaülésre a társadalom és fizika kapcsolatáról. Az előadások közül szeretném kiemelni a Kapica akadémikusét (Szovjetunió), aki az energiasűrűség fogalmából kiindulva tekintette át a különböző energiaforrásokat, azt a következtetést vonva le, hogy a legreálisabb reményt a nukleáris energiába lehet vetni, akár a Nap, akár a geotermikus energia felhasználásánál olyan nagyok a nehézségek (főleg az energia szállítással és tárolással kapcsolatban). Ugyancsak kiemelkedően nagy sikerű volt Weisskopf professzor (USA) Powell emlék előadása, amely a tudomány és fizika teljesítményeiről és határairól szólt.

Az egész konferencia szervezése a nagy tömeg adta nehézségek ellenére jó volt. Külön ki kell emelni annak a Román Fizikai Centrumnak az impozáns voltát, új épületeit, kitűnő felszerelését, amely a konferenciánk otthonául szolgált. A centrum több hatalmas kutatóintézetet és a Bukaresti Egyetem Fizikai Fakultását is magába foglalja és a város központjától 13 km-re helyezkedik el (Magurele).

A konferencia a román államvezetés részéről különös figyelemben részesült. Fővédnöke maga az állam elnöke volt, aki személyesen is fogadta a vezető fizikusok küldöttségét. Üzenetét az ünnepélyes megnyitáson a miniszterelnök olvasta fel.

Végül meg kell említenem, hogy a román vendéglátók a magyar küldöttség vezetőit külön figyelemben részesítették sok gondjuk és teendőjük mellett is. A Román Atomenergia Bizottság külön megbeszélésre, intézetlátogatásra hívott meg bennünket és ebédet adott a tiszteletünkre.

(*Berényi Dénes*)

KÜLFÖLDÖN MEGRENDELHETŐ AZ ALÁBBI CÍMEKEN A FOLYÓIRAT:

ANGLIA:

THE DANUBIA BOOK COMPANY,
58, Chatsworth Road *LONDON NW2 4DD*

AUSZTRÁLIA:

COSMOS BOOK AND RECORD SHOP,
145 Acland St. *St. KILDA, Vic. 3182*
GLOBE AND CO.,
694—696 George St., *SYDNEY NSW 2000*

AUSZTRIA:

RUDOLF NOVÁK GmbH.,
Köllnerhofgasse 4., *A-1011 WIEN I.*,

BELGIUM:

„DU MONDE ENTIER" S. A.,
Rue du Midi 162 *B-1000 BRUXELLES*

BRAZÍLIA:

LIVRARIA D. LANDY LTDA.,
Rua 7 de Abril, Caixa Postal 7943.
01000 SAO PAULO

KANADA:

DÉLIBÁB FILM AND RECORD STUDIO
19, Prince Arthur Street West,
MONTREAL 130. Que.
PANNONIA BOOKS,
P.O. Box 1017 Postal Station „B"
TORONTO, Ontartio M5T 2T8
HUNGARIAN IKKA AND TRAVEL SERVICE,
1234 Granville Street, *VANCOUVER 2, B.C.*

DÁNIA:

HUNNIA BOOKS AND MUSIC,
Norrebrogade 182 I tv. *KOBENHAVN*

FINNORSZÁG:

AKATEEMINEN KIRJAKAUPPA,
Keskuskatu 2. *SF 00100 HELSINKI 10.*

FRANCIAORSZÁG:

SOCIÉTÉ BALATON,
12, Rue de la Grange Bateliere *75 PARIS IXe*

HOLLANDIA:

CLUB QUALITON,
Prinsenstraat 26. *AMSTERDAM*

JUGOSZLÁVIA:

FORUM,
Vojvode Misica broj 1. *NOVI SAD*

NORVÉGIA:

A/S NARVESENS LITTERATUR TJENESTE,
P.O. Box 6140 Etterstad *OSLO 6.*

NÉMET SZÖVETSÉGI KÖZTÁRSASÁG:

UJVÁRY — GRIFF,
8000 MÜNCHEN 81. Titurelstr. 2.
MUSICA HUNGARICA,
8 MÜNCHEN 40., Agnesstrasse 45

SVÁJC:

METROPOLITAN VERLAG,
Teichweg 16. *CH-4142 MÜNCHENSTEIN*

SVÉDORSZÁG:

A.B. NORDISKA BOKHANDELN,
Alströmergatan 22. *101 10 STOCKHOLM*

AMERIKAI EGYESÜLT ÁLLAMOK

CENTER OF HUNGARIAN LITERATURE
4418 — 16th Avenue *BROOKLYN, N.Y. 11204*
HUNGARIAN BOOKS AND RECORDS
11802 Buckeye Road *CLEVELAND, Ohio 44120*

VENEZUELA:

LOUIS TARCSAY,
Calle Iglesia Ed Villoria, Apt. 21-105. C. 24.
CARACAS

A szerkesztésért felel: Turiné Frank Zsuzsa
Szerkesztőség: Budapest V., Anker köz 1, Eötvös Loránd Fizikai Társulat. Távbeszélő: 227-040
A kiadásért felelős: Siklósi Norbert igazgató
Kiadja a Lapkiadó Vállalat, Budapest VII., Lenin körút 9—11. Levélcím: 1906. postafiók 223 Távbeszélő: 221-293
Terjeszti a Magyar Posta. Előfizethető bármely postahivatalnál, a kézbesítőknél, a Posta hírlapüzleteiben és a Posta Központi Hírlap Irodánál (KHI, 1900 Budapest V., József nádor tér 1.) közvetlenül vagy postautalványon, valamint átutalással a KHI 215-96162 pénzforgalmi jelzőszámlára
Előfizetés egy évre 72,—Ft; egyes szám ára 6,—Ft. Megjelenik havonta
76.3401 Akadémiai Nyomda Budapest V., Gerlóczy utca 2. — Felelős vezető: Bernát György

Index: 25.289

fizikai szemle

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat lapja



1976/10

A szerkesztőbizottság elnöke:

Marx György

A szerkesztésért felelős:

Turiné Frank Zsuzsa

A szerkesztőbizottság titkára:

Berényi Dénes

Szerkesztőbizottság:

Balázs Béla, Barlai Katalin, Barta György, Bozóky László, Csekő Árpád, Dede Miklós, Fehér István, Flórián Endre, Gaal István, Groma Géza, Haiman Ottó, Hoffmann Tibor, Holics László, Károlyházy Frigyes, Keszthelyi Lajos, Kovács István, Mihály László, Schanda János, Soós Károly, Szigeti György, Tóth Eszter, Valkó I. Péter, Vermes Miklós

Címképünk:

DNS szál elektronmikroszkópos képe, részlet (Dudás Brigitta cikkéhez). Készült az MTA Szegedi Biológiai Központjának elektronmikroszkóp laboratóriumában.

TARTALOMJEGYZÉK

Wigner Jenő: A szimmetriaelvek ötven esztendeje 361. old.
Dudás Brigitta: A genetika kolinearitási tétele 367. old.
Bíró Gábor: A fizika és a mérés 374. old.
Bölöni Péter: A hőmérséklet konfidencia tartománya ideális gázokban 377. old.
Jeszenszky Ferenc: A mérés problémája a kvantummechanikában 379. old.
Dézsi Zoltán—Dézsi Zoltánné: Az atomfizika és a filatélia 381. old.

A FIZIKA TANÍTÁSA

Varga Lajos: Az új országos fizika tanterv 384. old.
Bölönyi György: Fizikai távmérők 391. old.

ESEMÉNYEK 396. old.

VÉLEMÉNYEK

Isza Sándor: Egy hibás fogalomalkotás következménye egy versenyfeladat tanulsága 397. old.
Wiedemann László: Hozzászólás Isza Sándor cikkéhez 400. old.

СОДЕРЖАНИЕ

Е. Вигнер: Симметрии и законы сохранения
Г. Форгач: Теория катастроф
Б. Дудаш: Принцип коллинейности в генетике
Г. Биро: Физика и измерение
П. Белени: Область конфиденции температуры в идеальных газах
Ф. Есенский: Проблема измерения в квантовой механике

ПРЕПОДАВАНИЕ ФИЗИКИ

Л. Варга: Новый план обучения физике в элементарной школе
Дь. Белени: Физические датчики дального действия
Дь. Фаркаш: Методологические замечания к преподаванию основ кинематики и динамики во II. классе наших средних школ

СОБЫТИЯ

ОТЗЫВЫ И ВЫРАЖЕНИЯ МНЕНИЙ

INHALT

E. Wigner: Symmetrien und Erhaltungssätze
G. Forgács: Katastrophen-Theorie
B. Dudás: Der Kollinearitätssatz der Genetik
G. Biró: Physik und Messung
P. Bölöni: Das Konfidenz-Gebiet der Temperatur in idealen Gasen
F. Jeszenszky: Das Problem der Messung in der Quantenmechanik

UNTERRICHT DER PHYSIK

L. Varga: Der neue Physik-Lehrplan der Grundschule
Gy. Bölönyi: Physikalische Fernmessgeräte

EREIGNISSE

STELLUNGNAHMEN UND MEINUNGSÄUSSERUNGEN

CONTENTS

E. Wigner: Symmetries and conservation principles
G. Forgács: Catastrophe theory
B. Dudás: The collinearity principle of genetics
G. Biró: Physics and Measurement
P. Bölöni: The confidence range of temperature in ideal gases
F. Jeszenszky: The problem of measurement in quantum mechanics

THE TEACHING OF PHYSICS

L. Varga: The new physics curriculum of elementary school
Gy. Bölönyi: Physical remote measurement

EVENTS

OPINIONS

fizikai szemle

AZ EÖTVÖS LORÁND FIZIKAI TÁRSULAT LAPJA

Alapította Eötvös Loránd 1891-ben Mathematikai és Physikai Lapok néven

XXVI. évfolyam 10. szám 1976. október

A SZIMMETRIA-ELVEK ÖTVEN ESZTENDEJE

Wigner Jenő
Princeton

Bevezetés

Szimmetria- és invariancia-megfontolások — valamint a megmaradási tételek is — kétségtelenül már korán szerepet játszottak a fizikusok, így Galilei és Newton gondolkodásában, s valószínűleg még őelőttük is. Ezeket a megfontolásokat azonban nem tekintették különösen fontosaknak, és csak ritkán fogalmazták meg világosan. Newton úgy fogalmazta meg egyenleteit, hogy azok minden térirányt s a térben minden pontot egyenértékűnek hagytak meg. Amint ma mondjuk, invarianciát mutattak elforgatásokkal és eltolásokkal szemben. Ugyanez vonatkozik Newton gravitációs törvényére is. Nem sok értelme volt ezt a tényt hangsúlyozni és olyan természettörvények lehetőségét felvetni, amelyek alacsonyabb fokú szimmetriát mutatnak. Ami a megmaradási tételeket illeti, az energiatétel hasznos volt s a mechanikában azt már Galilei előtt ösztönösen felismerték.[2] Az impulzus és az impulzusmomentum megmaradásának tétele teljes általánosságában nem volt különösen hasznos, habár az utóbbi a centrális mozgás speciális esetében az egyik Kepler-törvényt adja. A századforduló körül — s még később — írott mechanikakönyvek legtöbbje nem említi az impulzusmomentum megmaradásának általános tételét.[3] Elég általánosan ismertnek kellett lennie, mert akik háromtest-problémával foglalkoztak — ahol hasznosnak mutatkozott — mint magától értetődő dolgot írták fel azt. Mindazonáltal nem szenteltek neki különös figyelmet.

Ez a helyzet — az egyenletek invarianciáját illetően — főként Einstein elméleteinek eredményeképpen gyökeresen megváltozott. Einstein ékesszóló világossággal mondotta ki a tér szimmetriájára — a térirányok s a különböző pontok egyenértékűségére — vonatkozó követelményeket. Ezenkívül módosított alakban visszahelyezte jogaiba a mozgó és nyugvó koordináta-rendszerek egyenértékűségét. Ami a megmaradási tételeket illeti, jelentőségük nyilvánvalóvá vált, mikor a Bohr-féle atommodell iránt támadt érdeklődés eredményeképpen az impulzusmomentum megmaradásának törvénye kiemelkedő fontosságra tett szert. Átéltem azokat az időket, s tudom, hogy e törvény és a többi megmaradási tétel iránt általános volt a bizalom. Alapos ok volt erre a bizalomra, minthogy Hammel már 1904-ben felismerte a megmaradási törvények, valamint a tér



Wigner Jenő hasonló címmel előadást tartott a Társulat és az MTA III. Osztálya meghívására Budapesten, 1976 aug. 11. — Az eredeti szöveg Megjelent: Proceeding of the National Academy of Sciences, Vol. 51, No. 5. (1964. május). A Társulat felkérésére Wigner Jenő emlékfát ültetett a balatonfüredi Tapolca-sétányon. 1977. aug. 16.

[1] G. Hamel Theoretische Mechanik (Stuttgart: B. G. Teubner, 1912) c. könyvében (130. o.) Jordanus de Nemore-t (1300) említ, mint aki felismerte annak lényeges vonásait, amit ma mechanikai energiának nevezünk, valamint Leonardo da Vinci-t, mint aki posztulálta a perpetum mobile lehetetlenségét.

[2] F. Cajori History of Physics (New York: Macmillan Company, 1929) c. könyve pontosan félsort szán rá (108. o.).

és az idő alapvető szimmetriáinak kapcsolatát.[5] Noha úttörő munkája — legalábbis a fizikusok között — gyakorlatilag ismeretlen volt, a megmaradási tételek iránt oly erős volt a bizalom, mintha eredményeit mindenki ismerte és nyilvánvalónak találta volna. Ez csak újabb példa arra, hogy a fizikus intuíciója erősebb, mint a tudása.

A századforduló óta a szimmetriákkal és a megmaradási tételekkel szemben elfoglalt álláspontunk majdnem teljes fordulatot tett. Kevés olyan dolgozatot írnak napjainkban a fizika alapvető kérdéseiről, amely ne hivatkoznék invariancia-követelményekre, és a megmaradási törvények s az invariancia-elvek kapcsolata elfogadottá vált, talán még a kelleténél általánosabban is.[6] Ezenkívül a szimmetria és az invariancia fogalmát új területre terjesztették ki, ahol gyökerei sokkal kevésbé szorosan kapcsolódnak a közvetlen tapasztalathoz és megfigyeléshez, mint a téridő-szimmetriák klasszikus területén. Ezért hasznos lehet, ha először megtárgyaljuk a jelenségek, a természettörvények és az invariancia-elvek viszonyát egymáshoz. Ez a viszony a klasszikus invariancia-elvek — ezeket geometriai elveknek fogjuk nevezni — s az új invariancia-elvek — ezeket dinamikai elveknek nevezzük majd — esetében nem teljesen azonos. Végül szeretném a szokásosnál elemibb nézőpontból áttekinteni a megmaradási tételek és az invariancia-elvek viszonyát.

Események, természettörvények, invariancia-elvek

E fogalmak viszonyának kérdése nem új; hosszú időn át foglalkoztatta az embereket, eleinte csaknem öntudatlanul. Talán nem érdektelen, ha azt most nagyobb tapasztalatunk és — azt reméljük — érettebb tudásunk fényében újra áttekintjük.

Absztrakt szempontból tekintve, a természettörvények viszonya az eseményekhez egyrészről, és a szimmetria-elvek viszonya a természettörvényekhez másrészről, nagyfokú hasonlóságot mutat. Hadd kezdjem az előbbivel, a természettörvények és az események viszonyával.

Ha tudnánk, mi lesz valamely bolygó helye tetszőlegesen adott időpontban, nem maradna semmi, amit a fizika törvényei még mondhatnának nekünk a bolygó mozgásáról. Ez általánosabban is igaz: ha tudásunk a világon mindenütt és minden időben bekövetkező eseményekről teljes volna, nem volna haszna a fizika — vagy bármely más tudomány — törvényeinek. Hadd tegyem itt azt a meglehetősen nyilvánvaló megállapítást, hogy a természettörvények azért hasznosak, mert nélkülük még kevesebbet tudnánk a világról. Ha már ismernők a bolygó helyzetét minden időben, a mozgástörvények szolgáltatta összefüggés a helykoordináták között nem volna hasznos, de azért érdekes maradna. Ámulatot s talán örömet keltene bennünk, noha új adatokat nem szolgáltatna. Talán, ha valaki a bolygó helyére vonatkozó eltérő adatokat tárna elénk, hatásosabban tudnánk neki ellentmondani, ha a helykoordinátákra vonatkozó közlései nem állnának összhangban a bolygómozgás törvényeivel. Ez természetesen feltételezi, hogy bízunk a bolygómozgásra vonatkozó természettörvényekben.

Fordítsuk most figyelmünket a szimmetria- vagy invariancia-elvek és a természettörvények viszonyára. Ha ismerünk valamely természettörvényt, mint például az elektrodinamika egyenleteit, ezen egyenletek invariancia-tulajdonságainak ismerete nem növeli az egyenletek tartalmát. Érdekes megjegyezni, hogy a korrelációk az egyenletek szerint bekövetkező események között ugyanazok, akár nyugvó, akár egyenletes mozgást végző megfigyelő szemléli azokat. Mindazonáltal, az egyenletek már maguk megadnak minden korrelációt az események között, s az egyenletek invarianciájára vonatkozó, előbb említett megjegyzés nem növeli meg a korrelációk számát és nem is változtatja meg tartalmukat.

Általánosabban szólva, ha ismernénk minden természettörvényt vagy a természet végső törvényét, e törvények invariancia-tulajdonságai nem nyújtanának számunkra új ismeretet. Vizsgálatuk bizonyos örömet s talán ámulatot keltene, noha új összefüggéseket nem szolgáltatnának. Talán, ha valaki más természettörvényt javasolna, hatásosabban tudnánk neki ellentmondani, ha a javasolt természettörvény nem állna összhangban invariancia-elvünkkel — feltéve, hogy bízunk az invariancia-elvben.

Nyilvánvaló, hogy az előbbi fejtegetés a természettörvények és az események, valamint a szimmetria- vagy invariancia-elvek és a természettörvények viszonyáról — igen változatos. Sok-sok oldalt lehetne írni mindkettőről. Amennyire meg tudom ítélni, az új vonatkozások, melyek ezeken az oldalakon elénk társulnának, nem rontanák el a két viszony között talált hasonlóságot — azaz: a természettörvények és az események, valamint az invariancia-elvek és a természettörvények viszonyának hasonlóságát. Inkább alátámasztanák ezt a hasonlóságot és megerősítenék, hogy az invariancia-elvek szerepe: megadni a természettörvények szerkezetét és az összefüggéseket közöttük éppúgy, amint a természettörvények megadják az események sorozatának szerkezetét s az összefüggéseket az események között.

Geometriai és dinamikai invariancia-elvek

Mi a különbség a régi és jól megalapozott invariancia-elvek, s az új, dinamikai invariancia-elvek között? A geometriai invariancia-elvek —

[5] G. Hamel, Z. Math. Phys. 50, 1 (1904); F. Engel, Ges. dr. Wiss. Göttingen, 270 (1916).

[6] Lásd a szerző cikkét: Progr. Theoret Phys., 11, 437 (1954); lásd még Y. Murai, Progr. Theoret, Phys., 11, 441 (1954); továbbá D. M. Greenberg újabb dolgozatát, Ann. Phys., 25, 290 (1963).

noha a természettörvények számára meghatározott szerkezetet írnak elő — maguknak az eseményeknek segítségével nyernek megfogalmazást. Az idő-eltolásinvariancia megfelelő módon megfogalmazva így hangzik: a korrelációk az események között csak az eseményeket elválasztó időközöktől függnek, de függetlenek az időponttól, melyben az első események bekövetkezik. Ha a t_1, t_2, t_3 időpontokban az előbb említett bolygó rendszer P_1, P_2, P_3 pontokban található, úgy ezeket a helyzeteket elfoglalhatná a $t_1 + t_2 + t_2 + t, t_3 + t$ időpontokban is, ahol t tetszőleges. Másrészről az új, dinamikai invariancia-elvek a természettörvényekre, vagy pontosabban speciális kölcsönhatás-típusokra vonatkoznak, nem korrelációkra az események között. Így ha azt mondjuk, hogy az elektromágneses kölcsönhatás mérték-invariáns, egy speciális természettörvényre utalunk, mely meghatározza a töltések keltette elektromágneses mezőt s az elektromágneses mező hatását a töltések mozgására.

Mindebből következik, hogy a dinamikát típusú invarianciák a speciális kölcsönhatás-típusok létezésén alapszanak. Mindnyájan olvastunk arról, hogy régen azt remélték, minden kölcsönhatás leszármaztatható a mechanikai kölcsönhatásokból. Néhányan még emlékszünk arra, hogy évszázadunk kezdetén az elektromágneses kölcsönhatásokat tekintették minden más kölcsönhatás forrásának. Így szükségessé vált a gravitációs kölcsönhatás kiküszöbölése, és sikerült is a gravitációs erőt másképpen, nem mint kölcsönhatást értelmezni. Ezzel szemben jelenleg négy vagy öt különböző kölcsönhatást ismerünk el. Ezek: a gravitációs, az elektromágneses, egy vagy két fajta erős (azaz nukleáris) kölcsönhatás, és bétabomlásért, müonbomlásért és más hasonló jelenségekért felelős gyenge kölcsönhatás. Így tehát feladtuk — legalábbis ideiglenesen — a reményt, hogy minden erőt egyetlen alapvető kölcsönhatásra vezessünk vissza. Azonkívül minden kölcsönhatáshoz tartozik egy-egy dinamikai invariancia-csoport, amilyen pl. az elektromágneses kölcsönhatás mérték-csoportja.

Ez tudásunk jelenlegi foka. Ne feledjük egyébként, hogy a kölcsönhatások problémája jelenleg is rejtély. Utiyama[7] gyümölcsöző gondolatokat fogalmazott meg arról, hogy miképpen találhatjuk ki magát a kölcsönhatást, ha a hozzátartozó csoportot ismerjük. Azonban nem tudjuk megokolni, miért felel meg egyik kölcsönhatás egyik csoportnak, egy másik egy másik csoportnak, hány ilyen csoport van, s így hányféle kölcsönhatás. A csoportok lényegesen különböznek egymástól, és nem ismerjük a különféle kölcsönhatásokat és a hozzájuk tartozó csoportok közötti viszonyt. Hasonlóképpen nem látjuk e csoportok kapcsolatát a geometriai szimmetria-csoporttal, mely utóbbi egy jól meghatározott, sok-sok év óta jól ismert csoport.

[7] R. Utiyama, Phys. Re., 101 1957 (1956); lásd még C. N. Yang és R. L. Mills, Phys. Rev., 96, 191 (1954).

Geometriai invarianciaelvek és megmaradási tételek

Minthogy jó terra congitá-n tartózkodni, amíg csak lehet, tekintsük át először a geometriai invariancia-elveket. A geometriai invariancia-csoportot először Poincaré ismerte fel, s ezért Poincaré-csoportnak[8] szeretném nevezni. Igazi értelmét és fontosságát csak Einstein tárta fel a speciális relativitáselméletben. A csoport tartalmazza először az eltolásokat a térben és az időben. Ez azt jelenti, hogy a korrelációk az események között ugyanolyanok mindenütt és minden időben, hogy a természettörvények — a korrelációk kompendiuma — ugyanazok, bármikor s bárhol állapították is meg azokat. Ha ez nem így volna, a természettörvények felfedezése valószínűleg túlhaladná az emberi elme képességeit.

Itt hangsúlyozni kell azt a tényt, hogy a szimmetria-törvények az események között fennálló korrelációkra s nem magukra az eseményekre vonatkoznak. Az események természetesen helyről helyre változnak. Ha azonban egy elhajított kő helyzetét megfigyeljük három különböző időpontban, e helyzetek között összefüggést találunk, s ez azonos lesz a Föld minden pontján.

A második szimmetria egyáltalán nem olyan nyilvánvaló, mint az első: ez minden térirány egyenértékűségét posztulálja. Ezt az elvet csak akkor lehetett felismerni, amikor megértették: a fel és a le különbségéért a Föld vonzása felelős. Más szavakkal — ellentétben azzal, amit az imént mondottunk — az események, melyek között a természettörvények korrelációkat állapítanak meg, nem az elhajított kő három helyzete, hanem az elhajított kő három helyzete a Földhöz képest.

A legutolsó szimmetria — a természettörvények függetlensége a mozgásállapottól, melyben a jelenséget megfigyeljük, míg ez a mozgás egyenletes — egyáltalán nem nyilvánvaló az elfogulatlan elme számára.[9] E szimmetria egyik következménye, hogy a természettörvények nem a testek sebességét határozzák meg, hanem gyorsulásukat: a sebesség a különböző sebességekkel mozgó koordináta-rendszerekben különböző; a gyorsulás azonos mindaddig, amíg a koordináta-rendszerek mozgása egyenletes. Az egyenletesen mozgó koordináta-rendszerek, valamint az egyenletesen mozgó és nyugvó koordináta-rendszerek egyenértékűségének elvét ennélfogva nem lehetett Newton második törvényének megszületése előtt felismerni; maga Newton azonnal felismerte. Az elvet átmenetileg bizonyos elektromágneses jelenségek

[8] H. Poincaré, Compt. Rend., 140, 1504 (1905); Rend. Circ. Mat. Palermo, 21, 129 (1906).

[9] Így Arisztotelész fizikája posztulálta, hogy a mozgás szükségképpen megköveteli a folytonosan ható okot. Eszerint minden test az abszolút nyugalom állapotába jutna, ha megszüntetnénk az okot, melytől sebességét nyeri. (Vö. pl. A. C. Crombie, Augustine to Galileo (London: Falcon Press, 1952), 82 vagy 244 o.). Ez nem lehet igaz egymáshoz képest mozgó koordinátarendszerekre. Ekkor azok a koordinátarendszerek amelyekre igaz, kitüntetett mozgásállapotban vannak.

eredményeképpen kétségbe vonták, de Einstein némileg módosított alakban visszahelyezte jogaiba.

Már említettem, hogy az energia, impulzus és impulzusmomentum megmaradási törvényei közvetlen következményei az imént felsorolt szimmetriáknak. Ez leginkább a kvantummechanikában nyilvánvaló, ahol e törvények közvetlenül következnek az elmélet kinematikájából anélkül, hogy bármiféle dinamikai törvényt — amilyen a Schrödinger-egyenlet — fel kellene használnunk. Ezt nyomban meg fogom mutatni. A helyzet sokkal bonyolultabb a klasszikus elméletben: a megmaradási tételek legegyszerűbb bizonyítása a klasszikus elméletben arra a megjegyzésre alapozható, hogy a klasszikus elmélet határesete a kvantumelméletnek. Ennek megfelelően bármely egyenlet, mely érvényes a kvantumelméletben (a h Planck-állandó tetszőleges értéke mellett), érvényes a $h = 0$ határesetben is. Ennek az okfejtésnek a nyomai felfedezhetők azokban az általános megfogalmazásokban is, amelyek a megmaradási tételek és a téridő-szimmetriák kapcsolatát mutatják klasszikus elméletben. A megmaradási tételek levezethetők elemi módszerekkel is, felhasználva a dinamikai egyenletet — azaz Newton második törvényét —, valamint azt a felvetést, mely szerint az erők a részecskék távolságától függő potenciából származtathatók. Minthogy a potenciál fogalma nem nagyon természetes, ez nem a szokásos eljárás. Mach pl. felteszi, hogy az erő, mely tetszőleges részecskére hat, olyan erők összege, amelyek mindegyike más részecskétől származik.[10] Ilyen feltevés burkoltan Newton harmadik törvényében is benn-foglaltatik, máskülönben az ellenhatás (reakcióerő) fogalma értelmetlen volna. Mach ezenkívül felteszi, hogy az erő csak a kölcsönhatásban álló pár helykoordinátáitól függ, sebességeiktől azonban nem. Ilyenféle feltevésre valóban szükség van a klasszikus elméletben.[11] Az imént említett feltevések alapján az impulzus megmaradásának tétele azonnal következik Newton harmadik törvényéből, és megfordítva is, az impulzusmegmaradáshoz szükséges a harmadik törvény. Mindezt már Newton felismerte. Az impulzusmomentum megmaradásának tétele szempontjából, melyet általános alakjában majdnem 60 évvel a Principia után Euler, Bernoulli és d'Arcy fedezett fel, a tér izotropiájának jelentősége nyilvánvaló. Ha valamely részecskepár között ható erő iránya nem egyeznék meg a két részecskét összekötő egyenes irányával, az erő nem volna invariáns az ezen egyenes körüli forgásokkal szemben. Ennélfogva az adott feltevések mellett csak centrális erők lehetségesek. Minthogy az ilyen erők nyomatéka — ha az erők ellentetten egyenlők — eltűnik, ebből következik az impulzusmomentum-törvény. Nem következnék, ha az erők három vagy több részecske helyzetétől függenének.

[10] E. Mach, The Science of Mechanics (Chicago: Open Court Publ. Co., különféle kiadások), 3. fejezet 3. szakasz.
[11] Lásd a 6. lábjegyzetet.

A kvantummechanikában — mint már korábban említettem — a megmaradási törvények már az alapvető kinematikai törvényekből következnek. A dolog lényege egyszerűen az, hogy az állapotok a kvantummechanikában egy absztrakt tér vektorai, a fizikai mennyiségek — a helyzetvektor, a sebesség stb. — pedig e vektorokra ható operátorok. Ennek alapján pl. a forgásinvarianciából következik, hogy bármely adott Φ állapothoz található egy másik Φ_α állapot mely a Z-tengely körül α szögű elforgatással nyert koordináta-rendszerben pontosan olyannak látszik, mint amilyennek Φ az eredeti rendszerben látszott. Azt az operátort, mely Φ-re alkalmazva Φ_α-t adja, jelöljük Z_α-val. Jelöljük továbbá azt az állapotot, melybe Φ a τ időköz alatt átmegy, $H_\tau\Phi$-vel (a viszonyokat vázlatosan mutatja az 1. ábra). Eszerint a forgásinvariancia folytán Φ_α ugyanezen időköz folyamán $H_\tau\Phi_\alpha$-állapotba megy át, mely a második koordináta-rendszerben pontosan olyannak látszik, mint amilyennek $H_\tau\Phi$ látszott az elsőben. Eszerint $H_\tau\Phi_\alpha$ megkapható $H_\tau\Phi$-ből, ha erre a Z_α operátort alkalmazzuk.

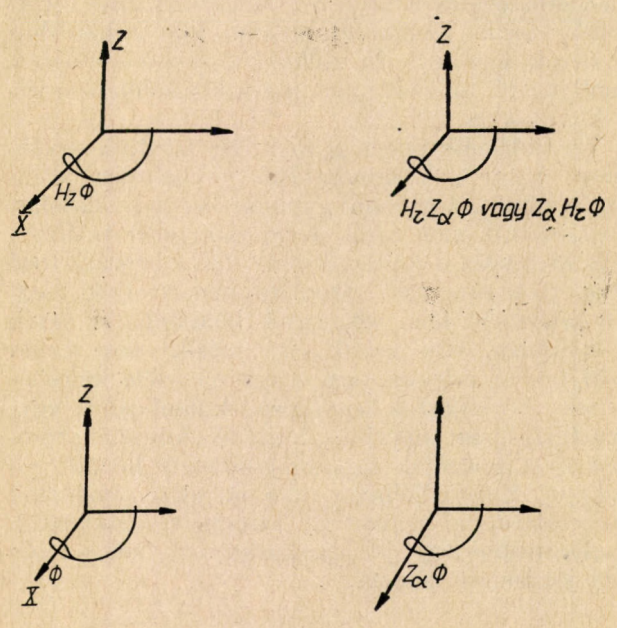
Ebből következik:

$$H_\tau Z_\alpha \Phi = Z_\alpha H \Phi, \tag{1}$$

s minthogy ez bármely Φ-re igaz, kapjuk:

$$HZ_\alpha = Z_{\alpha\tau} \tag{2}$$

A Z_α operátort tehát felcserélhető H_τ-val. Ez a feltétele annak, hogy Z_α-ra megmaradási törvény-álljon fenn. A Z-tengelyre vonatkoztatott impulzusmomentum $(Z_\alpha - 1)/\alpha$ határértéke végtelen kicsi α-ra $(\alpha \to 0)$. A többi megmaradási tétel ugyanúgy vezethető le. A dolognak az a lényege, hogy a transzformációs operátorok, vagy legalábbis az infinitezimálisak közülük, kettős szerepet játszanak, s azok maguk a megmaradó mennyiségek.



1. ábra

Ezzel befejezzük a geometriai invariancia-elvek tárgyalását. Az olvasó észre fogja venni, hogy a tükrözéseket — melyek inter alias a paritás fogalmához vezetnek el — nem említettem, és nem beszéltem arról, a látszólag sokkal általánosabb geometriai invariancia-elvről sem, amely az általános relativitás alapját képezi. Az előbbiek mellőzésének az az oka, hogy megfontolásaink végén a tükrözésoperátorokkal amúgy is foglalkoznom kell. Annak, hogy nem beszéltem az általános relativitáselmélet általános koordináta-transzformációval szemben mutatott invarianciáról, az az oka, hogy úgy vélem: az általános relativitáselmélet alapjául szolgáló invariancia nem geometriai, hanem dinamikai jellegű. Vegyük ezért szemügyre a dinamikai invariancia-elveket.

Dinamikai invariancia-elvek

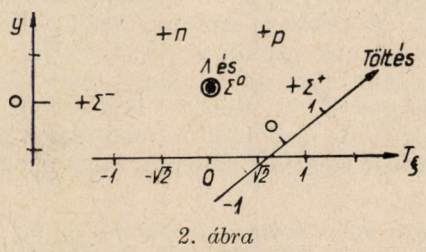
Amikor a dinamikai invariancia-elvekkel foglalkozunk, a terület, melyen tartózkodunk, nagyrészt terra incognita. Mindazonáltal, minthogy az ezen elvek továbbfejlesztésére tett kísérletek némelyike szellemes és sikeres, és minthogy jelenleg a dinamikai invariancia-elvek az érdeklődés középpontjában állnak, szeretnék ezekkel kapcsolatban néhány megjegyzést tenni. Kezdjük a legjobban ismert esettel: az elektromágneses kölcsönhatással.

A töltések és az elektromágneses mező kölcsönhatásának leírása céljából először új mennyiségeket vezetünk be az elektromágneses mező leírására, az ún. elektromágneses potenciálokat. Ezekből az elektromágneses térkomponensek könnyen kiszámíthatók, megfordítva azonban ez nem lehetséges. A potenciálokat a mező nem határozza meg egyértelműen: különböző potenciálok, melyek egymástól egy gradiensben különböznek, ugyanazt a mezőt adják. Ebből következik, hogy a potenciálok nem lehetnek mérhetők: csak olyan mennyiségek lehetnek mérhetők, amelyek invariánsak a potenciálokra önkényesen alkalmazható transzformációkkal szemben. Ez az invariancia nyilvánvalóan mesterkélt; hasonló ahhoz, amelyet úgy kaphatnánk, hogy bevezetnénk egyenleteinkbe egy kísérlet helykoordinátáit. Az egyenleteknek ekkor invariánsaknak kell lenniök a kísérlet koordinátáinak megváltoztatásával szemben. Érthetetlen, mire lehetne jó bevezetni egy kísérlet koordinátáit.

Ugyanígy áll a dolog a térerősségek helyett bevezetett potenciálokkal is mindaddig, amíg minden egyebet változatlanul hagyunk. A következő lépésben azonban azt követeljük — s ez a lépés a döntő —, hogy amikor az eredetivel azonos állapotot akarunk másképpen leírni, és a potenciálok valamely értékeiről áttérünk másik, azonos elektromágneses teret adó értékekre, azzal össze kell kapcsolnunk az anyagtér egy transzformációját. E két transzformáció kombinációját — egyik az elektromágneses potenciálokat, másik az anyagteret transzformálja — mértéktranszformációnak nevezik. Minthogy ez a fizikai tényállást változatlanul hagyja minden egyenletnek invariánsnak kell lennie vele szemben. Ez nem áll pl. a mozgásegyenletekre annak eredeti (kölcsönhatásmentes) alakjában. A mozgásegyenletek, ha azokat változatlanul hagynánk, azzal a képtelen tulajdonsággal rendelkeznének, hogy két helyzetből, melyek valamely kezdeti időpontban teljesen egyenértékűek, az idő folyamán két megkülönböztethető fizikai szituáció állna elő. A mozgásegyenleteket ennélfogva módosítanunk kell, s ez a legkönnyebben egy matematikai fogás segítségével: a Lagrange-függvény módosítása útján vihető keresztül. A legegyszerűbb módosítás, mely helyreállítja az invarianciát, az elektrodinamika egyenleteire vezet, s ezek összhangban vannak a tapasztalattal.

Mindenekelőtt szeretném még megjegyezni — anélkül, hogy kitérnék a részletekre —, hogy hasonló eljárás alkalmazható a gravitációs kölcsönhatás esetére is. Erre a lehetőségre már Utiyama utalt.[12] A szükségtelen komplikáció, melyet ebben az esetben be kell vezetnünk, a potenciálok helyett az általánosított koordináták. Az egyenleteknek invariánsaknak kell lenniök az általános relativitáselmélet koordináta-transzformációval szemben. Ez még nem változtatná meg az elmélet tartalmát, csupán hajlékonyabb nyelvezet bevezetését jelentené, melynek segítségével ugyanazon fizikai tényállás több egyenértékű leírása lenne megadható. De ezután posztuláljuk: az anyagmező is transzformálódjék a metrikus térrel együtt. Ebből megint az következik, hogy az egyenleteket invarianciájuk biztosítása érdekében módosítanunk kell. A legegyszerűbb módosítás — vagy az egyik a legegyszerűbbek közül — Einstein egyenleteire vezet.

Az általános relativitáselmélet invarianciájának az előzőkben megadott értelmezése azt nem geometriai invarianciának tekinti. Arra, hogy az általános relativitáselmélet invarianciája nem geometriai invariancia, már Fock szovjet fizikus rámutatott.[13] A viszonyokat kissé leegyszerűsítve azt mondhatjuk: geometriai invarianciák azt posztulálják, hogy két fizikailag különböző szituáció — amilyeneket például az 1. ábra mutat — az idő folyamán olyan szituációkba fejlődjék, amelyek ugyanolyan módon különböznek egymástól, mint a kezdőhelyzetek. Itt nem ezzel az esettel állunk szemben: csupán azt posztuláljuk, hogy ugyanazon szituáció két különböző leírása az idő folyamán két olyan leírásba fejlődjék, amelyek



2. ábra

[12] Lásd a 7. lábjegyzetet.

[13] V. Fock, The Theory of Space, Time and Gravitation (New York: Pergamon Press, 1959). Lásd ezenkívül: A. Kretschmann, Ann Phys. 53, 575 (1917).

ugyancsak azonos fizikai szituációt írnak le. A hasonlóság az elektromágneses potenciálok esetével nyilvánvaló.

Sajnos, a többi kölcsönhatás esetében más a helyzet. Az erős kölcsönhatások közül a gyengébbikről igen keveset tudunk. Az erős, valamint a gyenge kölcsönhatás csoportja mindenekelőtt sokkal kisebb, mint a mértékcsoport vagy az általános koordináta-transzformációk csoportja[14]. A mértékcsoport vagy az általános transzformáció-csoport végtelen sok generátora helyett ezeknek véges számú — nyolc — generátoruk van. Mindamellett ezek elégségesek ahhoz, hogy nagymértékben meghatározzák a kölcsönhatás alakját, lehetővé teszik továbbá néhány, a spektroszkópia szabályaihoz hasonló tétel levezetését, melyek közelítő összefüggéseket adnak meg reakciósebességek, valamint energiák — azaz tömegek — között. A 2. ábra nehéz tömegek alkotta oktuplettet mutat, melynek tagjait egymással a kölcsönhatás szimmetriacsoportjának legegyszerűbb olyan nem triviális ábrázolása kapcsolja össze, amely ekvivalens a komplex-konjugáltjával.

További különbség egyrészről az elektromágnesség és a gravitáció invariancia-csoportja, s másrészről legalábbis az erős kölcsönhatás invariancia-csoportja között, hogy az előbbiek operációi érvényes szimmetria-operációk maradnak még ekkor is, ha tekintetbe vesszük a többi fajta kölcsönhatás létét. Másrészt a többi kölcsönhatás „megsérti" az erős kölcsönhatás szimmetriáját, azaz az erős kölcsönhatás csoportjának operációi csak akkor érvényes szimmetria-operációk, ha a többi fajta kölcsönhatás figyelmen kívül hagyható. A szimmetria-csoport minden esetben segít meghatározni a kölcsönhatás operátorát. Míg azonban az elektromágneses és gravitációs kölcsönhatások csoportjával szemben minden kölcsönhatás invariáns, az erős kölcsönhatás csoportjával szemben csak maga az erős kölcsönhatás invariáns.

Mint már láttuk, a geometriai szimmetria-csoportok operációi megmaradási tételeket vonnak maguk után. Felmerül az a kérdés, hogy ugyanez igaz-e a dinamikai szimmetria-csoportok operációira is. Ismét úgy látszik, hogy különbségek vannak a különböző dinamikai invariancia-csoportok között. Általánosan vallott nézet, hogy az elektromos töltés megmaradásának törvénye a mértékinvariancia — azaz: az elektromágneses kölcsönhatás csoportja — következményének tekinthető. Másrészről azonban csak feltevésekbe bocsátkozhatunk azokat a megmaradási tételeket illetően, amelyeket az általános relativitás dinamikai csoportjával lehetne kapcsolatba hozni. Ami a barion- és leptonmegmaradás törvényeit illeti, itt ismét ésszerű feltenni, hogy azok az erős és gyenge kölcsönhatás csoportjai segítségével levezethetők.[15]

Ha ez igaz, ez azt jelentené, hogy az e kölcsönhatásokhoz tartozó csoportokat valójában még nem ismertük fel. Ez utóbbi kijelentés alátámasztására két érv hozható fel. Először is a szóban forgó megmaradási törvényeket[16] mindeddig nem sikerült levezetni ezen kölcsönhatások szimmetria tulajdonságaiból, és nem valószínű, hogy azokat le lehetne vezetni belőlük.[17] Másodszor a kérdéses szimmetria-tulajdonságok nem szigorúak, hanem más kölcsönhatások megsértik azokat. Nem világos, miképpen következhetnének szigorú megmaradási törvények közelítő szimmetriákból; már pedig minden jel arra mutat, hogy a barion- és a leptonmegmaradás törvénye szigorú.[18] Ez ismét emlékeztet bennünket arra, hogy elgondolásaink a dinamikai invariancia-elvekről korántsem oly szilárdan megalapozottak, mint a geometria invariancia-elvekről vallott felfogásunk.

Szeretnék végül néhány megjegyzést tenni egy olyan elvre vonatkozóan, amelyet habozás nélkül nevezek szimmetria-elvnek és amely átmenetet képez a geometriai és a dinamikai elvek között. Ez az elv a keresztezési összefüggésekben nyert kifejezést.[19] Vegyük szemügyre valamely

$$A + B + \ldots \rightarrow X + Y \ldots \qquad (3)$$

ütközés valószínűségi amplitúdóját. Ez függvénye lesz azoknak az invariánsoknak, amelyek a beeső és a kibocsátott részecskék impulzus-négyesvektoraiból képezhetők. Az időtükrözés-invarianciából — azon tükrözési elvek egyikéből, amelyeket nem tárgyaltam — következik, hogy (3) amplitúdója igen egyszerű módon meghatározza az

$$X + Y + \ldots \rightarrow A + B + \ldots \qquad (4)$$

inverz reakció amplitúdóját is. Ha minden sebességet ellentetté változtatunk, továbbá felcseréljük a múltat és a jövőt (ami az időtükrözés definí-

[14] Az erős kölcsönhatásokat illetően vö. Y. Ne'eman, Nucl. Phys., 26, 222 (1961) és M. Gell-Mann, Phys. Rev., 125, 1067 (1962). A gyenge kölcsönhatásokra vonatkozóan: R. P. Feynman és M. Gel-Mann, Phys. Rev. 109, 193 (1958) és E. C. G. Sudarshan és R. F. Nuovo Cimento, 7, 649 (1958) és G. S. Gerstein és Ja. B. Zeldovic, 229, 698 (1955).

[15] A barionmegmaradás törvénye és az erős kölcsönhatás esetére ezt a gondolatot a szerző vetette fel, Proc. Am. Phil. Soc., 93, 521 (1949) és Proc. Nat. Acad. Sci. 38, 449 (1952). A barionmegmaradás törvényét először E. C. G. Stueckelberg posztulálta, Helv. Phys. Acta, 11, 299 (1938).

[16] Ezen és más megmaradási tételek kísérleti igazolását illetően lásd G. Feinberg és M. Goldhaber, Proc. Nat. Acad. Sci., 45, 130 (1959). A leptonmegmaradás törvényét Marx Gy. javasolta, Acta Phys. Hung., 3, 55 (1953); továbbá Ja. B. Zeldovics, OCCP, 91, 1317 (1953) és E. J. Konopinski és H. M. Mahmoud, Éhys. Rev., 92, 1045 (1953). Határozott kifejezést, úgy látszik, T. D. Lee és C. N. Yang dolgozatában nyert, Phys. Rev., 105, 1671 (1957). Lásd még Fermi észrevételét, melyet C. N. Yang és J. Tiomno említ, Phys. Rev., 79, 497 (1950).

[17] Ami a barionmegmaradást és az erős kölcsönhatást illeti, erre J. J. Sakurai mutatott rá igen érdekes cikkében. Ann. Phys., 11, 1 (1960). A leptonokkal kapcsolatban lásd Marx Gy., Z. Naturforsch., 9a, 1051 (1954).

[18] Lásd a 15. lábjegyzetet.

[19] M. L. Goldberger, Phys. Rev., 99, 979 (1955); M. Gell-Mann és M. L. Goldberger, Phys., Rev., 96, 1433 (1954). Lásd M. L. Goldberger és K. M. Watson, Collision Theory (New York: John Wiley and Sons, 1964), 10. fejezet.

ciója) úgy a (4) reakció (3)-ba megy át; így a két folyamat amplitúdója lényegében megegyezik. Hasonlóképpen ha A antirészecskéjét $\bar{A}$-sal, B-ét $\bar{B}$-sal jelöljük sít., és szemügyre vesszük az

$$\bar{A} + \bar{B} + \ldots \rightarrow \bar{X} + \bar{Y} + \ldots \qquad (5)$$

reakciót, ennek amplitúdóját közvetlenül megadja (3) amplitúdója, minthogy — Lee és Yang értelmezése szerint — az (5) reakció (3)-ból tértükrözéssel nyerhető. Az

$$\bar{X} + \bar{Y} + \ldots \rightarrow \bar{A} + \bar{B} + \ldots \qquad (6)$$

reakció amplitúdó hasonlóképpen nyerhetők. A (3), (4), (5) és (6) reakciók amplitúdói között fennálló összefüggések geometriai invariancia-elvek következményei.

De tovább is mehetünk. A keresztezési összefüggések megmondják, hogyan kell kiszámítani pl.

$$\bar{X} + B + \ldots \rightarrow \bar{A} + Y + \ldots \qquad (7)$$

amplitúdóját (3) amplitúdóinak rendszeréből. Kétségtelen, hogy ez a számítás vagy eredménye nem mondható egyszerűnek. A 63 reakció amplitúdóját mint a (3)-ban részt vevő részecskék impulzusaiból képezett invariánsok analitikus függvényeit kell vizsgálnunk, s ezt az analitikus függvényt ki kell terjesztenünk a változók olyan értékeire, amelyeknek a (3) reakcióban nincs fizikai jelentésük, de amelyek megadják (7) amplitúdóját. Nyilvánvaló, hogy több más reakcióamplitúdó van, mely hasonló módon megkapható; ezek mind (3) — vagy valamelyik másik reakció — amplitúdójának analitikus folytatása útján nyerhetők. Így A és X felcserélése helyett, mely (7)-re vezet, felcserélhettük volna $\bar{A}$-t és Y-t is.

A keresztezési összefüggések rendelkeznek a geometriai invariancia-elvek két tulajdonságával: a kölcsönhatás-típusok mindegyikére vonatkoznak, és — így véljük legtöbben — érvényességüknek nincs határa. Másrészről, noha megfogalmazhatók az események segítségével, megfogalmazásuk előfeltétele bizonyos természettörvények — valamelyik említett reakció amplitúdójára vonatkozó matematikai, pontosabban analitikus kifejezés — megállapítása. Talán remélhetjük, hogy a keresztezési összefüggések segítenek majd kapcsolatot létesíteni a geometriai és dinamikai invariancia-elvek között, melyek között jelenleg nem látható kapcsolat.

A GENETIKA KOLINEARITÁSI TÉTELE

Dudás Brigitta
JATE Genetikai Tanszéki Csoport

A DNS-ben előforduló 4 bázis és a fehérjéket felépítő 20 aminosav egymáshoz való viszonyának kérdését először Gamow, az ismert elméleti fizikus vetette fel 1954-ben. Az ekkor már elfogadott „egy gén — egy enzim" hipotézis a gén és a fehérje közti kapcsolatot tükrözte, de a DNS szerkezet és a fehérje szerkezet közti összefüggésre, az akkori ismeretek birtokában, még nem adhatott magyarázatot. Ehhez még két „segéd" hipotézisre, illetve azok igazolására volt szükség. Mindkettő Crick nevéhez fűződik. Az egyik az ún. szekvencia hipotézis, a másik pedig a genetikai kód 3 betűs, nem átfedő, vesszőmentes jellegének feltételezése volt. (Lásd a „Genetikai analízis" című cikket.) Az 1958-ban ismertetett szekvencia-hipotézis szerint a DNS a polipeptid-lánc aminosav-szekvenciáját határozza meg, és ez a primér szerkezet egyértelműen megszabja a molekula térbeli szerkezetét is. A szekvencia-hipotézis helyességét Anfinsen és munkatársai igazolták oly módon, hogy meghatározott térszerkezetű, funkcióképes fehérjemolekulát fonálszerűvé alakítottak, és ez a „fonál" (polipeptidlánc) spontán, egy és csakis egy aktív térszerkezetet vett fel, s ez megegyezett az eredeti térszerkezettel. A DNS molekula a genetikai és biofizikai vizsgálatok szerint lineáris szerkezetű, amelyben az elmélet szerint az információt a bázishármasok (triplettek) minősége és sorrendje jelenti; a fehérjemolekula primér szerkezetére ugyancsak igaz, hogy lineáris, amelyben az egyetlen specifikus elem (amely azonban szükséges és elegendő a térszerkezet kialakításához) az aminosavak minősége és sorrendje. A már említett kód-hipotézis szerint az aminosav sorrendet a DNS határozza meg. Ezek szerint a két lineáris molekula között az egyetlen elképzelhető viszony a kolinearitás, ami tehát azt jelenti, hogy a fehérjék primér szerkezete, az aminosav-sorrend megfelel a DNS-ben levő nukleotid-sorrendnek. A direkt kísérleti igazolás nehézsége éppen abban rejlik, hogy megköveteli mind a nukleotid-sorrend, mind az aminosav-sorrend pontos megismerését. A kolinearitási elv alapján igaz

ha a DNS $A\ B\ C\ D\ E$ nukleotid-sorrendje
$\alpha\ \beta\ \gamma\ \delta\ \varepsilon$ aminosav-sorrendet határoz meg,

és mutációval $A\ B\ C^*D\ E$ változás következik be, akkor a primér szerkezet, az aminosav sorrend szintén jellemezhető változással.
$\alpha\ \beta\ \gamma^*\delta\ \varepsilon$

A gén szerkezete (nukleotid-sorrendje) a genetika indirekt módszereivel megközelíthető, a végeredmény azonban nem a közvetlen nukleotid-sorrend, hanem ennek vetülete, a géntérkép. A géntérkép nem más, mint a mutációk („genetikai markerek") lineáris sorrendje és távolsága. A géntérkép rendkívüli jelentősége abban rejlik, hogy gyakorlatilag

Előadás az ELFT-ban: „Genetikai iskola fizikusoknak", Szeged, 1976. január.

az egyetlen lehetőség a gén nukleotid-sorrendjének jellemzésére, mivel a direkt kémiai, biokémiai meghatározásnál összehasonlíthatatlanul gyorsabban szolgáltat kielégítő és elégséges információt. A géngéntermék (DNS-fehérje) kolinearitásának igazolása csak úgy oldható meg, ha figyelembe vesszük a géntérképet is, tehát az igazolás két lépésben végezhető el:

I. A kromoszóma, illetve a gén és a genetikai térkép kolinearitásának bizonyítása,
II. A géntérkép és a géntermék kolinearitásának bizonyítása.
Ha mindkettő igaznak bizonyul, akkor igaz az is, hogy
III. A gén és géntermék kolineáris.

Vizsgáljuk meg először a kolinearitási tétel I. pontját, tehát azt, hogy a genetikai térkép a valóságnak megfelelően tükrözi-e a gének kromoszómán elfoglalt tényleges helyzetét — a fizikai valóságot.

A bizonyítást először a muslica (Drosophila melanogaster) lárvájának nyálmirigy sejtjeiben található óriáskromoszóma tette lehetővé. Ez ugyanis olyan nagy méretű, hogy fénymikroszkóp alatt is rendkívül finom részletei figyelhetők meg. Egy sajátos sejtosztódási típus (az endomitózis) következtében, az egyes osztódások után a kromoszómát alkotó DNS szálak (a kromatida fonalak) együtt maradnak, így a 10 osztódás után kialakuló óriáskromoszóma majdnem 100-szor olyan vastag és 1024-szer annyi DNS-t tartalmaz, mint a Drosophila egyéb sejtjeiben levő kromoszómák. Az egyes kromatida fonalak, amelyek a kromoszómán végigfutó, szigorú szerkezetbe rendezett egy-egy DNS molekulát képviselnek, parallel lefutásúak. Egyes részeik erőteljesebb, tömöttebb térszerkezetbe rendeződnek, ezeket kromoméreknek nevezzük. A kromomér tehát DNS-ben gazdagabb, ezért specifikus festékkel erősebben festődik. A mikroszkóp látómezejében az egy síkba rendeződött kromomérek a kromoszóma hossztengelyére merőleges sávoknak látszanak — megkülönböztethetünk tehát sávokat (band) és összekötő szakaszokat (interband). (1. ábra.)

A sávmintázat jellemző az adott kromoszómára, ez az ún. citológiai térkép, ami a kromoszóma egyfajta fizikai jellemzésének tekinthető. A Drosophila óriáskromoszómáján kb. 5000 sáv ismerhető fel, ugyanakkor független becslések alapján a cisztronok száma is kb. 5000. Ez a korreláció vezetett az „egy sáv — egy cisztron" feltételezéshez, ami a genetikai és citológiai térkép összehasonlításával igazolható vagy cáfolható. A különböző kromoszómaszerkezeti átrendeződések, aberrációk (deléció, transzlokáció, inverzió stb.) fénymikroszkópban is jól látható és a sávok ismeretében teljes biztonsággal behatárolható a citológiai térképen. Ha egy ilyen kromoszóma-rendellenesség kapcsolatba hozható egy mutáns fenotípussal — tehát genetikailag térképezhető — lehetőség nyílik a citológiai térkép és a genetikai térkép összehasonlítására.



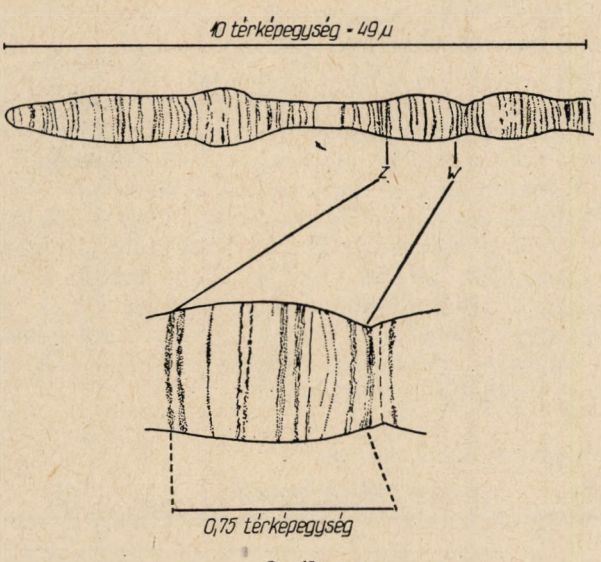
1. ábra

A kolinearitási tétel I. pontjának igazolását egy konkrét példán kövessük végig: Judd és munkatársai által 1972-ben közzétett kísérlet, a Drosophila *X* óriáskromoszóma egy igen rövid szakaszának — egy régiójának — vizsgálatát ismertette. Munkájuk menete a következő általános „genetikai gyakorlatot" követte:

1. A régió telítése mutációkkal — olyan nagyszámú pontmutáns izolálása, amellyel feltételezhetően a vizsgált régió valamennyi cisztronja jelölhető.
2. A pontmutánsok csoportosítása komplementációval — cisztronokba sorolás (lásd a Géncisztron c. cikket).
3. Az egyes cisztronokat reprezentáló pontmutációk genetikai térképezése ismert deléciós mutánsok segítségével — cisztronok sorrendjének megállapítása (lásd a Genetikai analízis c. cikket).
4. Az egyes cisztronokat képviselő pontmutánsok két- és hárompontos genetikai térképezése — cisztronok sorrendje és relatív távolsága (lásd a Genetikai analízis c. cikket).
Az 1., 2., 3. és 4. munkafázis célja a genetikai térkép elkészítése volt.
5. A genetikai térkép és a deléciós mutánsok citológiai térképének összehasonlítása.

A vizsgált kromoszóma-régió az *X* kromoszóma *z-w* régiója volt, amely a teljes kromoszómának kb. századrésze. (2. ábra.)

A pontmutációkat normális hím egyedek kezelésével kémiai úton (pl. etil-metán-szulfonát) és röntgen sugárzással hozták létre. A hím egyedek „érdekes mutáns spermiumait" (*X**) — ahol a * a mutációt jelöli — a következő módon „válogatták ki": a mutagén hatásnak kitett hímeket (♂) olyan nőstényekkel (♀) keresztezték, amelyek *balanszer — X* kromoszómát hordoznak — ezáltal az utód nőstényekben az apától és az anyától örökölt *X* kromoszómák között a rekombináció kizárt (lásd a „Genetikai analízis" c. cikket). A mutáció tehát „nem kerülhet át" más kromoszómára, az eredeti állapot rögzített. A következő lépés a *balanszer — X/X** ♀ keresztezése olyan speciális ♂-mel, hogy „kiválogatható" legyen mindazon *X** kromoszóma, amely a *z-w* régióban tartalmaz mutációt. A speciális hímek egyetlen *X* kromoszómájában a *z-w* régió hiányzik *(X-del.zw)*; ugyanakkor a hiányzó részt az *Y* kromoszómára „ragasztották: a *z-w* régió az *Y* kromoszómára



2. ábra

transzlokált'' *(Y-zw)*. A *balanszer — X/X** nőstényeket egyenként keresztezve *X-del.zw/Y-zw* hímmel, a ,,kényszerházasságokból'' született utódok a következők lehetnek (megjegyezve, hogy az egyes kategóriák *a*, *b*, c_1, c_2, *d* fenotípusuk alapján felismerhetők): (3. ábra.)

a) balanszer-*X*/*X*-del.*zw* ♀
b) balanszer-*X*/*Y-zw* ♂
} számunkra érdektelen

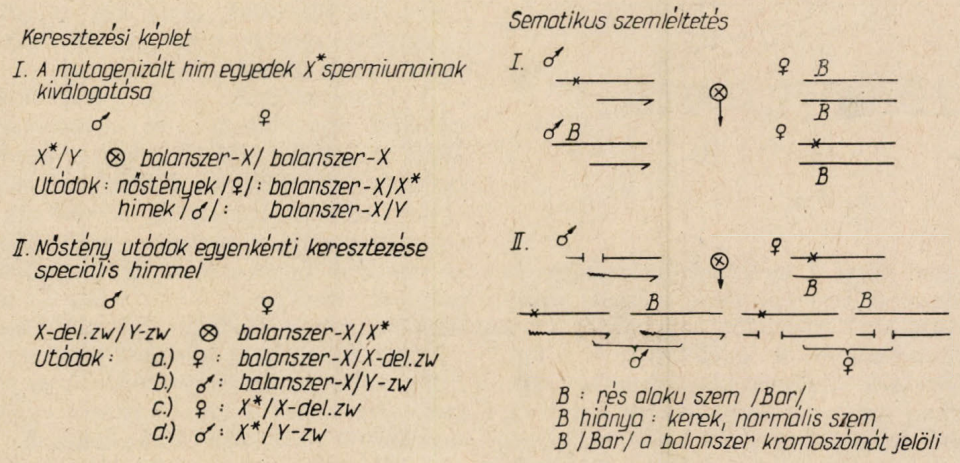
c) *X**/*X*-del.*zw* ♀: ha a mutáció(*) a *z-w* régióban keletkezett két eset lehetséges:
c_1: (*) recesszív, de nem halálos — az egyed fenotípusa mutáns,
c_2: (*) halálos — az egyed meg sem születik. Ekkor a keresztezésben az utódok között csak feleannyi ♀ egyedet találunk, mint ♂ egyedet (normálisan a nemek aránya 1:1) és ezek mind az ,,a'' kategória fenotípusát mutatják.

d) *X**/*Y-zw* ♂: csak akkor normálisak, ha a mutáció (*) a *z-w* régióban keletkezett. Jelentőségüket belátjuk, ha ,,*c*'' kategória nőstényeivel hasonlítjuk össze — ha a (*) halálos mutáció, tehát ,,c_2'' nőstények hiányoznak, a mutáns kromoszóma ezekben a hím egyedekben található meg, és fenntartható a további generációban.

Mivel az ,,érdekes'' mutáns spermiumok ritkák, elkülönítésük, egyedi kiválogatásuk és elszaporításuk épp olyan reménytelen feladat lett volna, mint Hamupipőkének a lencse válogatása a hamuból. Akkor galambok, Juddéknak pedig a balanszer-*X* kromoszómás nőstény és a speciális hím segített. A genetikai ,,kromoszóma-válogatással'' 121 pontmutánst szelektáltak ki a számukra érdekes *z-w* régióban. A pontmutánsokat komplementációval cisztronokba sorolták. Ezután a már említett genetikai módszerekkel — keresztezésekkel — megállapították a *z-w* régió finom felbontású genetikai térképét — a cisztronok egyértelmű, lineáris sorrendjét. A genetikai térkép ismeretében pontosan megmondható, hogy a *z-w* régiót érintő deléciós mutánsokban mely cisztronok hiányoznak. Az ugyanezen deléciós mutánsok citológiai térképe elárulta azt, hogy a *z-w* régió mely sávjai hiányoznak. A genetikai és citológiai jellemzés (térkép, cisztronok, sávok) összevetéséből pedig kiderült, hogy a citológiai térkép egy sávja a genetikai térkép egy cisztronjának felel meg. A citológiai térképen a sávok sorrendje azonos a cisztronok sorrendjével a genetikai térképen. (4. ábra.)

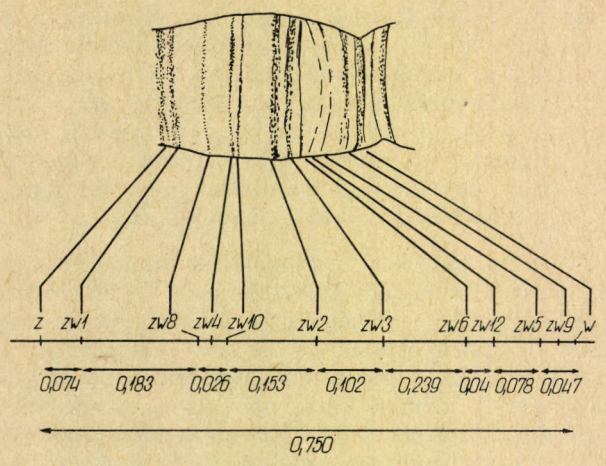
Ez az ,,egy sáv — egy cisztron'' eredmény azonban nem volt ellentmondásmentes, hiszen egy sáv DNS tartalma legalább hússzor annyi, mint amennyi szükséges lenne egy átlagos méretű polipeptid lánc kódolásához. Az ,,átlagos méretű cisztron'' kb. 1000 bázispár.

Hasonló vizsgálatokat végeztek a Drosophila teljes *X* kromoszómáján Dobzhansky és munka-



A balanszer kromoszóma szerepe: speciális szerkezetével kizárja a crossing over kialakulását, így biztosítja az eredeti kromoszóma integritásának fennmaradását

3. ábra

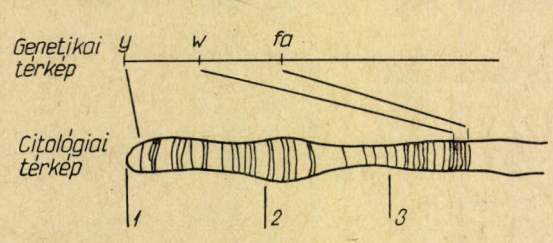


4. ábra

társai. A sávmintázat alapján azonosítható mutációk citológiai térképét a genetikai térképpel összevetve a következő eredményeket kapták:

1. A genetikai és citológiai térképen a mutációk sorrendje azonos,
2. a mutációk relatív távolsága a két térképen igen különböző; pl. a *y-w* mutációk között a citológiai térképen 75 sáv található, míg a *w-fa* mutációk között 5, ugyanakkor a genetikai térképen a *y-w* és a *w-fa* távolság kb. azonos,
3. a crossing over a centromeron környékén erősen gátolt, ezért ez a rész a genetikai térképen aránytalanul kis távolsággal jellemezhető.

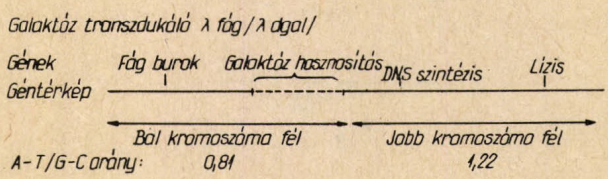
A távolság-arányokban tapasztalt ellentmondás azonban nem okvetlenül jelenti azt, hogy a DNS molekula mentén mért tényleges távolságok is aránytalanok lennének, mivel az egyes sávokba „bezsúfolt" DNS szálak hosszúsága között óriási különbségek lehetnek.



5. ábra

A kolinearitási tétel I. részének helyessége és általános érvénye a Drosophilánál sokkal primitívebb élőlényen, az Escherichia coli baktérium λ fágjának kromoszómáján is igazolható. A λ fág, amely a molekuláris biológia klasszikus organizmusa, elsősorban arról nevezetes, hogy egyetlen, 55 000 bázispár hosszúságú DNS molekulája ma az élővilág legjobban ismert kromoszómája, genetikailag és fizikailag egyaránt. Az igen részletes genetikai térképet a „Gén — cisztron" c. cikkben ismertetett fágkeresztezési módszerrel állapították meg. A fág-kromoszóma fizikai jellemzésének több útja is ismeretes, ezek egyike azon alapszik, hogy a sűrűség a DNS molekula mentén nem egyenletes. A „nehezebb" és „könnyebb" szakaszok váltakoznak, ezek sorrendjének megállapítása nem más, mint a lineáris molekula fizikai jellemzése.

Konkrét példán illusztrálva a fentieket: előállítottak egy olyan λ fág mutánst, amelyik néhány saját génje helyett az E. coli baktérium galaktóz felhasználást biztosító génjeit (gal) tartalmazta: galaktóz transzdukáló λ fág, röviden λdgal. A genetikai analízis azt mutatta, hogy a gal gének a genetikai térkép bal oldalán helyezkednek el, a 6. ábrán látható módon:



6. ábra

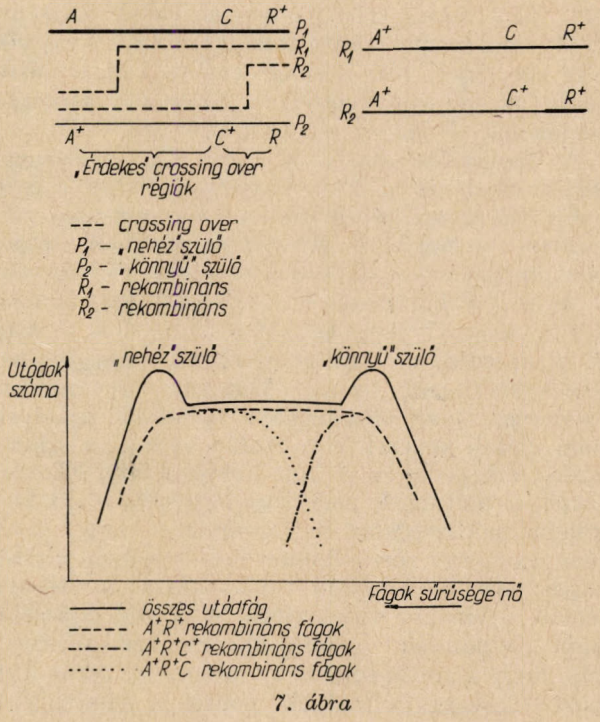
Hidrodinamikai nyírással a λdgal kromoszóma két egyenlő félre törhető és a két fél CsCl-os grádiens ultracentrifugálással elválasztható, mivel sűrűségük nem azonos. Az elválasztott fél molekulákat olyan E. coli baktériumba juttatták, amelynek galaktóz hasznosítási génjei károsodtak, így ezt a cukrot nem volt képes hasznosítani (gal$^-$). A gal$^-$ baktérium galaktóz hasznosítási képessége akkor és csak akkor volt megfigyelhető, ha azokba a nagyobb sűrűségű kromoszóma felet juttatták be. Ez a kísérlet tehát azt bizonyította, hogy a genetikai térképezés helyesen tükrözi a valóságot, mivel genetikai és fizikai módszerrel egyaránt a kromoszóma, illetve a géntérkép egyik feléhez rendelhetők a galaktóz gének. A sűrűbb kromoszóma fél ezek szerint megegyezik a genetikai térkép bal felével, „bal karjával". A kromoszóma fizikai darabolása hidrodinamikai nyírással még tovább finomítható: negyedelés, nyolcadolás stb. Az egyes darabok genetikai tartalma minden vizsgálható esetben megegyezett azzal, ami a genetikai térkép alapján várható volt.

A kromoszómák egyes területeinek sűrűségnövelése úgy oldható meg mesterségesen, hogy a DNS molekulát felépítő egyes atomokat nehéz izotópra cseréljük ki. Következő példánkat egy olyan kísérletsorozatból merítettük, amelynek elsődleges célja a genetikai rekombináció mechanizmusával kapcsolatos, de kitűnően illusztrálja a kolinearitási tételt is. Ez a munka a molekuláris biológia egyik csillogó egyéniségéhez, F. Stahl nevéhez fűződik. A kísérleti rendszer ezúttal is a λ fág volt. A fág géntérképének egyik végén helyezkedik el az A gén, a másik végén az R gén, mindkettő működése létfontosságú. A regulátor gén a C gén, ennek működése nem esszenciális; ez közbülső helyet foglal el: az $A-R$ távolságot kb. 3:1 arányban osztja a géntérképen. A kísérlet a következő volt: $A-C-R^+$ fágot ^{13}C és ^{15}N

nehéz izotópokat tartalmazó táptalajban szaporították el, így a fág DNS molekula sűrűsége megnőtt. Ezt a „nehéz" fágot keresztezték egy „könnyű", tehát szokásos atomokat tartalmazó $A^+ - C^+ - R$ mutánssal, mégpedig olyan közegben, amely kizárólag könnyű atomokat tartalmazott, másrészt pedig olyan körülményeket biztosítottak, amikor a fág DNS replikációja kizárt. A majdani utódfágok súlya, így átlagos sűrűsége kizárólag a szüleiktől kapott DNS molekulák sűrűségétől függ — hiszen a DNS-t burkoló fehérjeköpeny egységesen könnyű atomokból épül fel. A továbbiakban sűrűség alatt az egész fág átlagos sűrűségét értjük. A kísérlet genetikailag egy hárompontos keresztezés, amelyben az egyes szülői kromoszómák fizikailag is jelölve vannak. Így az eredmény genetikailag (rekombináció alapján) és fizikailag (sűrűség alapján) egyaránt kiértékelhető. A fágkeresztezés termékeinek, az utódfágoknak a sűrűségeloszlását CsCl grádiensben ultracentrifugálással állapították meg. Az utódpopuláció a „könnyű" és a „nehéz" fág sűrűsége között folytonos eloszlást mutatott. Az egyes utódfágok sűrűsége a CsCl grádiensben elfoglalt helyzetük alapján leolvasható, és ebből DNS-ük összetétele kiszámítható. Ezután megállapították az ismert sűrűségű egyedek genotípusát. Kiválogatva pl. az A^+R^+ rekombináns utódokat — figyelmen kívül hagyva a C/C^+ allélpárt — megfigyelhető, hogy a fágok sűrűsége szinte bármely értéket felvehet a két extrém — szülői — sűrűség között, éspedig nagyjából egyforma valószínűséggel. Ha megvizsgáljuk az A^+R^+ egyedek között a C és C^+ egyedek megoszlását, azt tapasztaljuk, hogy az $A^+R^+C^+$ rekombináns egyedek sűrűségeloszlása a „könnyű" szülőéhez áll közelebb, az A^+R^+C rekombináns egyedek sűrűségeloszlása pedig a nehezebb szülő fele tolódik el. A 7. ábrán látható a kísérlet kissé sematikus ábrázolása.

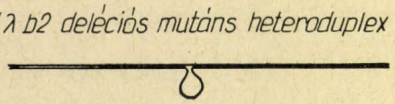
Mivel a rendszerben DNS replikáció nincs, „átmeneti" sűrűségű fág csakis a „könnyű" és a „nehéz" DNS kombinációjából keletkezhetett. A fenti kísérletből a 7. ábra alapján leszűrhetjük, hogy a rekombináció gyakorisága valóban egyenesen arányos a fizikai távolsággal, mivel a C és a C^+ görbe alatti terület kb. úgy aránylik egymáshoz, mint 3:1, ami megegyezik a géntérképen mért távolságarányokkal. A rekombináns egyedek sűrűségének egyenletes megoszlásából pedig azt a lényeges következtetést szűrhetjük le, hogy a crossing over valószínűsége — rekombináns egyedek keletkezése — a kromoszóma bármely pontán kb. azonos. Ez a kísérlet önmagában is alátámasztja a „távolságfüggő" genetikai térképezési módszer alapelvének helyességét, a crossing over gyakoriság és a távolság közötti egyenes arányosságot (lásd a „Genetikai analízis" c. cikket).

A kolinearitási tétel I. pontjának legmeggyőzőbb bizonyítékát a részletes géntérkép és az ún. heteroduplex elemzés adta. A λ fág nagyszámú deléciós és deléció-inszerciós mutánsát izolálták. (A deléció — mint említettük — a fágkromoszóma hosszabb-rövidebb szakaszának elvesztését jelenti, a deléció-inszerció pedig azt, hogy a kromoszóma hosszabb-rövidebb szakasza idegen DNS-re cserélődik ki.) A részletes genetikai térkép ismeretében, fágkeresztezésekkel megállapítható, hogy a térkép mely területe hiányzik vagy cserélődött ki egy adott deléciós, deléció-inszerció mutánsban (a részletes leírást lásd a „Genetikai analízis" c. cikkben). A heteroduplex elemzés, amely a kromoszóma fizikai jellemzését jelenti, a következő módon történik: kb. 100 °C-ra melegítve a fág kromoszóma, a DNS kettős csavar két szála elválik egymástól, mivel az összetartó H-hídak felbomlanak. Az egymásnak megfelelő — komplementer — szálak elválaszthatók egymástól, jelöljük ezeket „+", illetve „—" szálnak. Ha egy deléciós mutáns „+" szálát egy vad típusú „—" szállal összekeverünk, és fokozatosan lehűtünk, helyreáll az eredeti kettős csavar szerkezet (DNS — DNS hibridizálás). Mivel a deléciós mutánsban hiányzik a DNS egy darabja, a vad típusú szál ezen darabja nem vehet részt a kettős csavar kialakításában. A szálnak ez a része egyfonalas hurokként elkülönül. A hurok kromoszómális helyzete és hossza elektronmikroszkópos felvételt készítve pontosan meghatározható és megmérhető. A feladat ezután nem egyéb, mint eme fizikai mérés és a géntérkép összevetése. Belátható, hogy heteroduplex képzéshez nem okvetlenül fontos a komplementer szálak elkülönítése, mivel két különböző DNS kettős csavar keveréke a fenti eljárást követve 50% hibrid és 25—25% eredeti kettős csavart ad. A deléció-inszerciós mutánsokból és a vad típusból képzett heteroduplex annyiban tér el az előzőtől, hogy a deléció-inszerció területén, a nukleotid sorrendek különbözősége miatt a két DNS szál nem képezhet kettős csavart. Mindez az elektronmikroszkópos felvételen egy két



7. ábra

ágra szakadó, majd újra egyesülő folyóhoz hasonlít. Az ilyen, két egyszeres fonálból álló képletet szaknyelven „buboréknak" nevezzük. A buborék elhelyezkedése és hossza szintén pontosan meghatározható és összevethető a genetikai térképpel. (8. ábra.)



λ b2 : a λ fág kromoszómájának b2 szakasza hiányzik



λ imm^{434}: a λ fág C génjét a 434 jelzésű fág C génjével cserélték ki

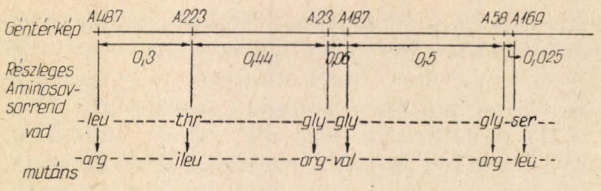
8. ábra

A fenti kísérleti adatokból láthatjuk, hogy a kolinearitási tétel I. része, a géntérkép és a kromoszóma megfelelése elfogadható. A kromoszóma esetén a géntérkép arányos is, míg más esetben is igazolható az, hogy a mutációk sorrendje a géntérképen megegyezik azok tényleges fizikai sorrendjével a kromoszómán.

A szűkebb értelemben vett kolinearitási elv a géntérkép és a géntermék kolinearitását jelenti. Ennek igazolása csak viszonylag későn sikerült, mert a kutatók többsége az akkor már genetikailag nagyon jól ismert T4rII rendszeren próbálkozott, de a gén termékének izolálása nem sikerült. Két másik gén pontos elemzése azonban 1964-ben lehetővé tette a tétel igazolását. Az egyik a T4 fág „fejét" felépítő fehérje génje volt, a másik pedig az E. coli baktérium triptofán-szintetáz enzimének *A* láncát meghatározó gén.

A bizonyítás alapja a Crick-féle szekvencia hipotézisnek az a következménye, hogy a gén nukleotid sorrendjében bekövetkező mutációs változások a megfelelő fehérje (géntermék) adott pontján egy-egy aminosav kicserélődését okozzák.

Az E. coli baktérium triptofán-szintetáz enzime két könnyen elválasztható *A* és *B* láncból — *A* és *B* polipeptid — áll, amelyeknek önmagukban enzimaktivitásuk nincs. Yanofsky és munkacsoportja olyan mutánsokat izoláltak, amelyek nem voltak képesek a triptofán aminosav szintézisére, mégpedig az *A* lánc hibája miatt. Elkészítették a mutánsok genetikai térképét, majd biokémiai módszerekkel meghatározták, hogy az *A* lánc aminosav sorrendjében hol és milyen eltérés tapasztalható a hibátlan — vad típusú — enzimből izolált *A* lánchoz viszonyítva. A kétféle eljárással kapott eredményt egymás alá írva azt tapasztalták, hogy a mutánsokban az aminosav sorrendben bekövetkezett változások pontosan tükrözik a



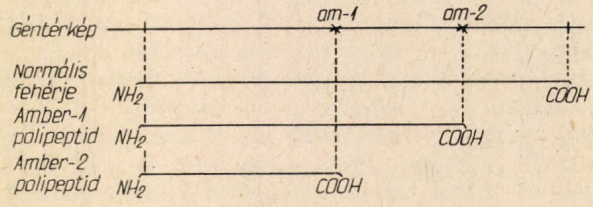
9. ábra

génben bekövetkezett változást, tehát a gén és a polipeptid között kolinearitási viszony áll fenn. (9. ábra.)

Meg kell jegyeznünk azonban, hogy a bizonyítás gyengéje az, hogy a genetikai munka pontossága messze elmaradt a biokémiai jellemzés pontossága mögött.

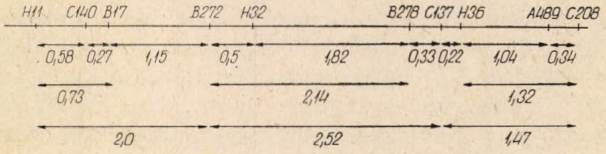
A T4 fág feji fehérjéjén végzett munkát éppen az jellemzi, hogy genetikai módszerei a biokémiai munkához közel álló, finom felbontást tesznek lehetővé.

Brenner és munkatársai a T4 fág ún. „amber" mutánsait izolálták, és ezek közül kiválasztottak 15 mutánst, amelyekben a fág feji fehérjéje változott meg. A „Genetikai analízis" c. cikkben részletesen szó esik az amber mutánsokról és életben tartásukról, itt csak annyit kell megjegyeznünk, hogy az amber kód a polipeptid szintézis „stop" jele, így az amber mutánsokban (am) a normálisnál rövidebb polipeptid lánc szintetizálódik (am polipeptid). (10. ábra.) Az am polipeptid láncban az N-terminális aminosav-vég változatlan, a rövidülés mindig a C-terminális véget érinti.



10. ábra

Az am mutáns fágok keresztezésével elkészítették a feji fehérje génjének preciz genetikai térképét:



11. ábra

Ezután a géntermék analízise következett. A fágot olyan közegben szaporították, amely ^{14}C-vel és ^{35}S-vel jelölt aminosavakat tartalmazott. A feji fehérjét izolálták, majd tripszines, illetve kimotripszines emésztésnek vetették alá. A tripszin a lizin és az arginin aminosavak, a kimotripszin

pedig az aromás aminosavak után képes elhasítani a peptid kötést. Az emésztés után kapott fragmentumokat nagyfeszültségű papírionforézissel elválasztották egymástól, majd összehasonlították a kiválasztott 10 mutáns és a vad típusú fág fehérjéjéből kapott fragmentum mintázatot — amit a fragmentumok száma és minősége definiál. Ez alapján a következő képet kapták:

Mutáns / Fragment	H16	C140	B17	B272	H32	B278	C137	H36	A489	C208	vad
His6c	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+
TyrC2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	+
TryT2	0	0	0	0	0	0	0	0	+	+	+
ProT2a	0	0	0	0	0	0	0	+	+	+	+
TryT6	0	0	0	0	0	0	+	+	+	+	+
TyrC12b	0	0	0	0	0	+	+	+	+	+	+
HisT7c	0	0	0	0	+	+	+	+	+	+	+
Cys	0	0	0	+	+	+	+	+	+	+	+

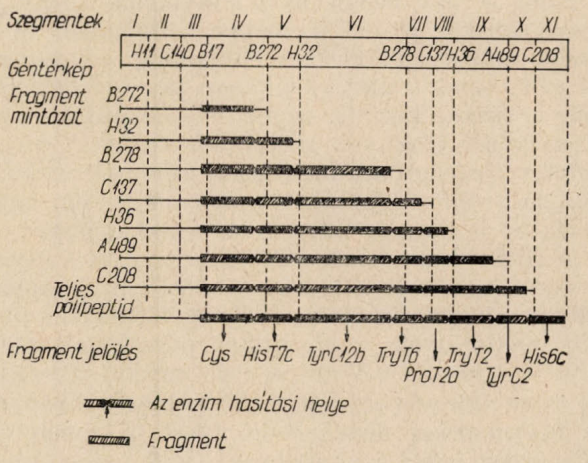
0 - a fragment hiányzik
\+ - a fragment jelen van

12. ábra

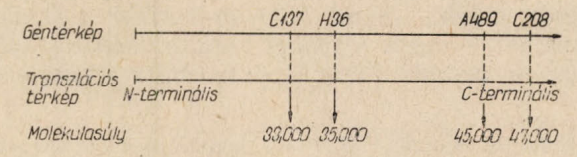
Ezek szerint az am mutánsok a feji fehérjének, mindig csak bizonyos részét produkálják. A fragmentumok alapján a mutánsok sorba állíthatók, amelynek első eleme csak egy fragmentumot, a második elem az elsőre jellemzőt és még egyet, a harmadik elem az első kettőt és még egyet, és így tovább, amíg csak el nem jutunk a vad típusú fehérjéhez. Egy fragmentum a polipeptid-lánc egy szeletét határozza meg, és a mutánsok ezen szeletek alapján is sorba állíthatók. Ha a gén és a polipeptid-lánc kolineáris, akkor a genetikai térképet összehasonlítva az am polipeptidek (elemek) fragmentum-mintázatával, azt kell tapasztalnunk, hogy a kettő pontosan megfelel egymásnak. Hosszabb am polipeptid mindig több fragmentumot tartalmaz, és ezek között mindig megtalálhatók a rövidebb am polipeptidekre jellemző fragmentumok. A géntérképen pedig az egyik „rögzített" szélső ponttól annál távolabb helyezkedik el az am mutáció, minél hosszabb a rá jellemző am polipeptid. Ha megnézzük a 13. ábrát, látjuk, hogy a fragmentum-sorrend pontosan egyezik a genetikai sorrenddel, tehát a kolinearitási tétel II. része is bizonyított.

Ennek a munkának a további finomítását végezték el 1973-ban. Ekkor már tudták, hogy a T4 fág feji fehérje szintézisét a 23 jelzésű gén határozza meg, amely első lépésben egy P23 jelölésű, 60 000 molekulasúlyú polipeptidet határoz meg, majd ebből további 7 gén közreműködésével alakul ki a végleges, P23* jelzésű feji fehérje. A P23* molekulasúlya már csak 50 000, ami úgy alakul ki, hogy a molekula C-terminális végről lehasad egy kb. 100 aminosav hosszúságú peptid. Izolálták a teljes P23, P23* polipeptidet és az amber mutánsokban keletkező P23 fragmentumokat, amelyeket előzőleg ugyanúgy izotóppal jelöltek, mint az előző munkában. Gondosan tisztították ezeket, majd tripszines emésztésnek vetették alá, ezután molekulasúly szerint elválasztották az egyes fragmentumokat. A fragmentumok molekulasúlyának összegezésével a teljes polipeptid-lánc molekulasúlya is megmondható. Az adatok alapján felállítottak egy ún. transzlációs térképet, ahol az egyes am peptideket a fehérjemolekula N-terminálisától kezdődően a molekulasúly alapján állították sorrendbe. A vizsgált mutánsok rekombinációs térképét és a transzlációs térképet összevetve (14. ábra) azt találjuk, hogy a kolinearitás nemcsak a sorrendre, hanem a géntérkép relatív távolságaira is igaz.

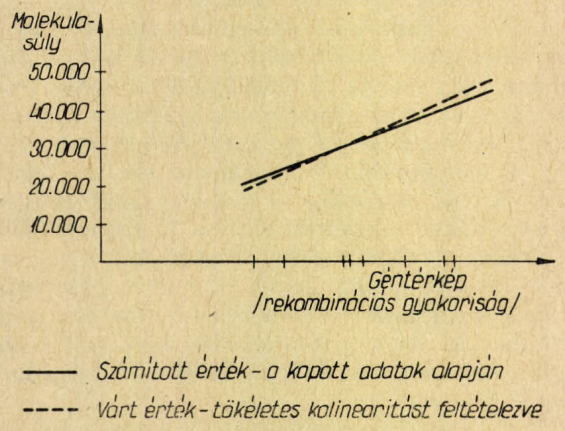
Ebből kiindulva megállapítható a rekombináció és a távolság kvantitatív összefüggése. Mivel egy aminosav átlagos molekulasúlya kb. 100, az am peptidek molekulasúly különbségéből leolvasható az aminosavak számának különbsége. A hárombetűs genetikai kódból nyilvánvalóan következik, hogy szorzással meghatározható az am mutánsokat definiáló egyes mutációk közti nukleotidok száma. Pl. kiválasztottak két mutánst, a C137 és a H36 jelzésűt, amelyek között a rekombinációs gyakoriság $2{,}2 \cdot 10^{-3}$, az am peptidjeik közötti molekulasúly különbség 2000, ami kb. 20 aminosavnak felel meg. Ekkor az egyetlen aminosavra eső rekombinációs gyakoriság $2{,}2 \cdot 10^{-3}/20$, tehát a DNS-ben két szomszédos bázispár közt a rekombinációgyakoriság kb. $4 \cdot 10^{-5}$. A kapott adatok és az elméletileg várt értékek igen jó korrelációt mutatnak:



13. ábra



14. ábra



15. ábra

A 15. ábra alapján a géntérkép méretei és a géntermék méretei között nemcsak kolinearitás, hanem egyenes arányosság is megfigyelhető.

Meg kell jegyeznünk: „feltétlen" bizalmunk oka, hogy bízunk abban, hogy a 23 gén, a λ fág és a Drosophila X kromoszómája az „egész" élővilágot reprezentálja.

A kolinearitási tétel I. és II. részéből egyértelműen következő III. pontot csak a legutóbbi években igazolták, amikor lehetővé vált DNS molekulák (izolált gének) nukleotid sorrendjének biokémiai meghatározása; a genetikai térképnek mint közvetítő elemnek a kiküszöbölése. Ennek a direkt módszernek az eredményei is minden kétséget kizáróan igazolták a géntérkép és a nukleotidsorrend megfelelését, tehát a kolinearitási tétel helyességét.

A FIZIKA ÉS A MÉRÉS

Biró Gábor
BME Fizikai Intézet

Közismert tény, hogy a fizika „mérő-tudomány". Még élesebben fogalmazva: azáltal vált önálló tudománnyá, hogy sikerült a *mérést* a természet-megismerésének a szolgálatába állítani. Azt szoktuk mondani, hogy a fizika a filozófiából a reneszánsz idején, az újkor elején azon az úton vált ki, hogy meghonosodott a természet kísérleti vallatása, létrejött a kísérletezés módszere. A kísérletezés célja a fizikában mindig kvantitatív összefüggések megtalálása; a kísérletezésnek a fizikában tehát szükségszerű, lényegi eleme a mérés.

Nem is azt vélem bizonyítandónak, hogy a mérésnek középponti a szerepe a fizikában — a fizika születésétől kezdve napjainkig —, hanem az előadásban a mérés fizikában játszott szerepének a fizikai kutatás egyéb mozzanatához való viszonyáról szeretnék szólni, illetve arról, hogy néhány történeti szituációban a mérés szerepének eltúlzása vált uralkodóvá és mint minden egyoldalúság ez is negatív következményekkel járt.

A fizikai kutatásnak nem egyetlen útja a kísérletezés. A matematika mint eszköz, szintén apparátusa a fizikai kutatásnak. És itt nemcsak a mérési eredmények matematikai összefoglalásáról, általánosításáról van szó; a matematikai dedukció új ismeretek szerzésének is módszere a fizikában. A matematikai dedukcióval nyert új ismeretek ellenőrzése ismét a kísérletezés. De a matematikai általánosítással szerzett eredményeket nemcsak méréssel ellenőrizni, hanem fizikailag *értelmezni* is kell. Ha Galileitől Heisenbergig sok változáson is ment keresztül a fizikai kutatás — mind a méréstechnika, mind a matematikai technika vonalán — mégis a fizikai kutatás módszertanában van maradandóság is, és ez éppen a kísérletezés, matematikai általánosítás, fizikai értelmezés mozzanatok megléte, kapcsolatuk, egymásra utaltságuk.

A kísérleti vizsgálat — ezen belül a mérés — mindig mozzanata a fizikai kutatásnak. De különböző tudománytörténeti szituációkban a mérés szerepe nem azonos. Az előadásban két olyan tudománytörténeti időszakot szeretnék rekonstruálni, melyekben a mérésnek kiemelkedően fontos szerep jutott a kutatás összfolyamatán belül. És szeretnők megmutatni, hogy mindkét ilyen korszak után olyan periódus következett be, amelyben eltúlzott hangsúlyt kapott a fizikai kutatás egyéb mozzanatával szemben a mérés, olyan eltúlzott hangsúlyt, ami negatív következményekre vezetett.

Az egyik felelevenítendő tudománytörténeti időszak az újkor eleje, a mai értelemben vett fizika kialakulásának időszaka, a másik pedig a klasszikus fizika hatókörének áttörése, a modern fizika létrejöttének korszaka.

Galilei, illetve Newton életművének fő vonala a skolasztika tudománya ellen irányul. A skolasztika, mint legfőbb ellenfél elleni harcukat meghatározza koruk ismeretszintje és az ezzel együtt adott kutatási eszközök lehetőségei. Természetesen alkotó kutatók számára mind a kor ismeretanyaga, mind kutatási eszköztára csak a kiindulási alap, amelyeket éppen a nagy alkotók fejlesztettek tovább.

Galilei életművének legmódszeresebben kidolgozott része a dinamika. Az arisztoteleszi mozgástan bírálata képezi kutatásai kiindulópontját. Logikailag feltárva az arisztoteleszi állítások ellentmondásosságát: kísérletezni kezd. Kísérletezés és matematikai hipotézisalkotás egymás korrigálásával ismeri fel az esés törvényét.

Hipotézisei során Galilei az állandó sebességnövekedést állandó erőhatásnak tulajdonítja. De akkor nem az erőhatás oka vagy a mozgás oka

Elhangzott az MTESZ Mérés és mérték az emberi művelődésben című, 1976 árpilisában tartott nemzetközi konferencián.

irányában kutat tovább, hanem az esés további törvényszerűségeit keresi. Tudatos módszertani elve nyilvánul meg ebben Galileinek. Nevezetesen Galilei a miért kérdésfeltevés helyett a *hogyan*ra helyezi a hangsúlyt. Nem a mérés szerepét hangsúlyozza túl, nem *csak a leírást* elismerő egyoldalúság ez nála. Hanem: Galilei egész munkássága a skolasztika ellen irányul. A *miért* kérdésfeltevés a skolasztika jellemzője abban a korban. Nemcsak annyiban, amennyiben az a *mi célból*t jelenti; hanem még a *mi okból* kérdésfeltevést is diszkreditálta a skolasztika, mert rejtett hatásokat, rejtett tulajdonságokat tételezett fel. Amikor Galilei tudatosan a *miért*et a *hogyan*nal cseréli fel, akkor ezzel a módszertani elvvel is határozottan a skolasztika misztifikációi ellen fordul.

Ha felidézzük azt az utat, ahogy Newton pl. az általános tömegvonzás törvény felfedezéséhez eljutott, akkor Galileiéhez egészen hasonló kutatásmódszertant találhatunk. Ismeretes, hogy Newton éppen a gravitációval kapcsolatban mondta ki híres hypoteses non fingo tételét.

Szigorúan véve hipotéziseket azonban nemcsak az általános tömegvonzás törvény kimondásának útja tartalmaz, hanem maga az általános törvény is csak hipotézis, legalábbis addig, amíg Cavendish földi kísérletek segítségével ki nem számítja a benne szereplő állandó értékét, amely speciális esetként magába foglalja a Galilei-féle eséstörvény konstansát éppúgy, mint a Kepler törvényekben szereplő állandót. A Cavendish kísérletre azonban csak egy évszázaddal később kerül sor.

Newton nem tartotta magát ahhoz, hogy őrizkedni kell a hipotézisektől. Azonban az adott korba helyezve a tanácsot, megérthetjük indítékait. Néhány évtizede még a skolasztikus-egyházi dogmák teljes mértékben uralták a fejeket. (Mellesleg szólva nemcsak átvitt értelemben, hanem az inkvizíciós terror értelmében is!) Vagyis a skolasztikus misztifikációkkal szemben volt módszertani elv Newton tézise. Mintegy körülhatárolta a tudományos megismerés körét, korlátozva azt a kísérletileg vizsgálhatóra.

Nem értünk egyet azokkal, akik Newton hipotézisellenes magatartását vitáktól való személyes félelmével magyarázzák, de azokkal sem, akik a korabeli angol társadalomnak a feudális és a polgári erők közti kompromisszumos helyzetével hozzák túl szoros kapcsolatba.

Véleményünk szerint a természettudományok történetében mind a feldezők *személyes* tulajdonságai, mind a felfedezés korának *társadalmi* helyzete csak áttételesen játszanak szerepet. Newton esetében is a hipotézisellenesség a tudomány által elért szintből fakad, a *kor* hipotézisellenességének része. A *tudományos közszellem* spekuláció ellenességét bizonyítja pl. a Royal Society — Hooke által fogalmazott — alapszabályzat-tervezete (1663). E szerint a R. S. feladata: kísérletek révén tökéletesíteni a tudást, a természet jelenségei. tekintetében, nem avatkozva bele a teológiába, metafizikába, erkölcstanba, politikába. . .

A spekuláció-ellenes közszellemet jól jellemzi, hogy a kitűnő kísérletező Boyle annyira nem törődött már a kísérletekből levonható következtetésekkel sem, hogy az azóta Boyle—Mariotte törvény néven ismert összefüggést tulajdonképpen tanítványa (R. Toenley) találta meg. Mint Boyle maga mondja: a kísérletek mellett hozott elméletekről az a hódító jut eszébe, aki a hadjáratból fáradtságos utakon nemcsak aranyat, ezüstöt, elefántcsontot, hanem majmokat és pávákat is hozott magával. E kor természettudományos módszertanára vonatkozik Bacon aforizmája: „Nem szárnyakra van szüksége az emberi képzeletnek, hanem inkább ólomnehezékre, hogy béklyóba verje röptét és nekilendüléseit." Éppen Baconra és Boylera pedig maga Newton többször hivatkozik első optikai műveiben.

Az elmondottak tükrében érthető meg az is, miért hangsúlyozza Newton oly sokszor, hogy az erőt nem fizikai magyarázatnak, hanem a mozgásváltozás oka matematikai leírásának tekinti.

Összefoglalva: Galilei tudatosan elveti a mozgásváltozás oka irányába haladó kutatást, a miért helyett a hogyanra teszi a hangsúlyt; Newton az erőt nem fizikai magyarázatnak, hanem matematikai leírásnak tekinti.

A kísérleti kimutathatóság, a mérhetőség annak a kritériuma náluk, hogy mi tartozik a tudomány, a fizika hatáskörébe. De mindezeket a kutatói deklarációkat tényleges kutatásmódszertanuk csak igen részlegesen fedi. Sem Galilei, sem Newton nem lehet meg a valóságos kutatási folyamatban hipotézisek, meg nem mért mennyiségekre vonatkozó feltételezések nélkül. A mérhetőség hangsúlyozása mind Galileinél, mind Newtonnál a skolasztikus misztifikációk ellen irányul.

A newtoni fizika azonban már a 18. sz.-ban a magukat newtonianusoknak vallók kezében, Newton érveléseinek a látszólagos továbbvitelével, szögesen a newtoni felfogással ellentétes irányba merevül meg.

A newtonianusoknak már nem a skolasztika az ellenfele, hanem a kartezianizmus. Történetileg éppen a kartezianusok Newton elleni támadása során alakul ki a newtonianusok buzgó tábora.

Newton a mérési adatokban és lényegében csak azokban bízva és félve a skolasztikus rejtett tulajdonságok feltételezésétől — mai kifejezéssel élve — fenomenologikusan fogja fel pl. az általános tömegvonzás törvényét. Az erő és konkréten a gravitációs erő mibenlétére vonatkozóan tartózkodik az állásfoglalástól. Mint például a Bentleyhez írt 2. leveléből kiderül, Newton tiltakozik az ellen, hogy Bentley neki tulajdonítsa azt az állítást, hogy az anyagba eredetileg betáplált tulajdonság lenne a gravitáció. Azt pedig, hogy a gravitáció távolba hasson, közvetítő nélkül, vákuumon át, olyan abszurdításnak tartja, hogy alig hiszi, hogy valaha valaki elfogadná ezt a nézetet.

Ugyanakkor a newtonianusok, akik — a kartezianizmussal szemben — határozottan empiristáknak, a mérő-fizika híveinek és szélsőségesen annak tekintik magukat: kétszeres értelemben is

objektivizálják a newtoni erőfelfogást: önálló objektív létezőnek tekintik az erőt, ami csak matematikai leírás Newtonnál; és objektivizálják a hatásterjedés mechanizmusra vonatkozó newtoni feltételezés hiányát, mint a hatásterjedés hiányát. És így jutnak el a távolhatás, a pillanatszerűen, közvetítő nélküli hatásterjedés feltételezéséhez.

A newtonianusok a kartezianus modellekkel szemben, mint nem mérhető mennyiségek feltételezése ellen vitatkoznak. Szélsőséges célkitűzésük önmaga ellentétébe csap át: a gravitáció náluk az anyag feltételezett őstulajdonsága lesz és a távolhatás feltételezése ugyanúgy nem-mérhető modell, mint a kartezianus örvényelmélet.

A távolhatás, mint anyagi közvetítő nélküli hatásterjedés, negatív tárgyi modell, idealisztikus tendenciájú modell. A távolhatás koncepció pedig hosszú évtizedekre uralkodó álláspont lesz a fizikában. A Faraday—Maxwell-féle elektromágnesség tan kidolgozása után is csak nehezen tör utat a fizikában a közelhatás koncepció.

Az eddigiekben áttekintett történeti út logikai szkémája körülbelül a következő. A filozófiától, a skolasztikus filozófiától önállósuló fizika legfőbb új kutatási eszköze a kísérletezés, a mérés. A 18. sz.-i tanítványok szerint olyannyira csak a mérési eredményekben szabad bízni, hogy ha a mérési eredmények nem tartalmaznak állítást pl. a hatásterjedés mechanizmusáról, akkor a hatásterjedésnek nincs is mechanizmusa: távolbahatás van.

A másik tudománytörténeti szituáció — amit a mérés aspektusából — rekonstruálni szándékozunk: a klasszikus fizika hatókörének áttörése, a modern fizika kialakulásának időszaka.

A 19. sz. végére a klasszikus newtoni fizika kész, lezárt rendszernek tűnt. Bár már a klasszikus keretek közt jelentkezett a newtoni rendszer bírálata — gondolunk elsősorban Mach fellépésére, — de ezek a bírálatok is termékeny talajra a tudományban csak akkor találtak, amikor rendre felmerültek a klasszikus fizikával nem értelmezhető kísérleti tények.

A klasszikus fizika általánosítási szintjét áttörő századforduló korabeli kísérleti tények új elméleti szint megalkotására inspirálnak. A relativításelmélet, de még inkább a kvantumelmélet döntő szakítást jelent a klasszikus fizikával. A kvantumelmélet ad hoc feltevések (kvantáltság — Planck, Einstein, Bohr), merész analógiák (de Broglie) matematikai általánosításaként (Schrödinger, Heisenberg) születik meg. Bohr sikeres, de érthetetlen kvantumfeltételeitől a még sikeresebb, de még kevésbé érthető operátor- és mátrixkalkulusig olyan út vezet, amely követelően előírja a nagyhatóképességű, de fizikai tartalmában tisztázatlan matematikai apparátus állandó kísérleti ellenőrzését. A fizikatörténet ezen időszakában — nem utolsósorban a machizmus hatása alatt — minden korábbinál átfogóbban válik uralkodóvá a fenomenológizmus. A fizikai kutatásnak szinte mottójává válik, hogy „csak az létezik, ami mérhető". Ez az állítás csak első pillanatban tűnik korrektnek. Ha következetesen értelmezzük, teljes tagadását jelenti a hipotézis-alkotásnak; mert amit nem tudunk mérni, annak a létezése nem tehető fel. Jóllehet a kvantumelmélet kialakulásához vezető út sem mentes a modellalkotástól, a közvetlenül nem mérhető mennyiségekre vonatkozó feltételezésektől (gondoljunk akár Planckra, akár Bohr klasszikus kvantumelméletére, akár de Broglie anyaghullámelméletére). A hipotetikus modell alkotás a klasszikus fizika — közfelfogás szerint — elévült hagyatékaként mégis lomtárba kerül. Pontosabban szólva ez a mérés szerepét túlértékelő fenomenológiai irányzat csak a tárgyi modellekre vonatkozó hipotéziseket ítéli el, a matematikai modelleket nem. A matematikai leírást (matematikai általánosítást) elismerő, a tárgyi modellt tagadó koncepció, ha a tárgyi modell tagadására helyezi a hangsúlyt, akkor szubjektív idealizmushoz vezetett. Ugyanez a koncepció, ha a matematikai modell elismerését helyezi előtérbe, akkor a matematika szerepének ismeretelméletileg téves felfogását eredményezi. Éspedig egy olyan típusú objektív idealizmust, amely a matematikai apparátust, a matematikát tekinti a dolgok, a világ végső lényegének. A történelem logikája létre is hozta ezt a felfogást, mégpedig a kvantummechanika túlhaladási kísérleteivel kapcsolatban.

A kvantummechanika bizonyos divergencia problémái, valamint a felhalmozott új tényanyag (többször 10 elemi részecske és ezek kölcsönös átalakulásai egymásba) új szintézis létrehozását sürgetik. Az új szintézis még nincs meg. De az ezen új elméleti szint felé törő kutatások matematikai apparátusát sok, a korábbi időszakban (egy-két évtizede) még a szubjektív idealista tendenciájú fenomenológia hatása alatt álló kutató az említett objektív idealista módon fogja fel. Hogy csak a legkiemelkedőbbet említsük: Heisenberg az anyagegyenletét a platoni filozófiai vonal igazolásának tekinti. A fizika legújabb fejlődésmenetével kapcsolatos objektív idealista interpretációk is a mérés, a matematikai leírás és fizikai értelmezés viszonyának nem kellően tisztázott problémájában gyökereznek.

A kvantummechanika interpretációja körüli viták nem egyszerűen ideológiai viták, hanem a fizikán belüli tisztázatlan kérdések vitája is. A kvantumelmélet — de más vonatkozásban a relativításelmélet is — megszületése pillanatától kezdve összefonódott negatív ismeretelméleti ballasztokkal. Amelyekben épp azt a határvonalat lehetett nehezen meghúzni, hogy meddig tart ezekben a fizikai probléma és hol kezdődik a filozófiai kérdés.

Véleményünk szerint a fizikai kutatás módszertanában a mai napig sem tekinthető tisztázottnak a kísérletezés — matematikai dedukció — fizikai értelmezés egymáshoz való viszonya. Az előadásban két történeti korszakra vonatkozóan igyekeztem megmutatni, hogy létezhet a fizikában a mérés szerepének olyan túlértékelése, amely negatív

következményekkel járhat. És ez nem egy fizikán kívüli kutatás módszertani-ismeretelméleti probléma, hanem a fizika fejlődésének ügye is. Gondolunk itt elsősorban arra a tudománytörténeti szituációra, amelyben ma él a fizika: nevezetesen a részecskefizika területén minden bizonnyal új szintézis megszületésének a küszöbén állunk. Ebben a helyzetben a fizikai kutatás fő mozzanatai egymáshoz való viszonyának az elemzése, a módszer ontológiailag helyes értékelése talán azt jelenthetné, hogy az új elméleti szint negatív ideológiai ballasztok nélkül születik meg. Idevonatkozó történeti elemzések talán a jövőt is szolgálhatnák.

A HŐMÉRSÉKLET KONFIDENCIA TARTOMÁNYA IDEÁLIS GÁZBAN

Bölöni Péter
Országos Mérésügyi Hivatal

Egy rendszer termodinamikai állapotát az úgynevezett állapotjelzők határozzák meg. Ilyenek például a rendszer térfogata, a nyomása, a hőmérséklete, a rendszer anyagmennyisége, belső energiája stb. [1] Az állapotjelzők egy részének mechanikai jelentése is van, mint például az energiának, vagy a térfogatnak. Az állapotjelzők másik része — amelyek nem makroszkopikus esetben nem értelmezhetők — statisztikus jellegű mennyiségek, mint például az entropia. [2]

A statisztikus jellegű állapotjelzők, éppen statisztikus jellegükből és definíciójukból adódóan, várható értékek, illetve átlagértékek és így nem tekinthetők elvileg tetszőleges pontossággal meghatározható és időben állandó értékeknek. Egy gáz sűrűsége például kis ΔV térfogatelemekben, a makroszkopikusan értelmezett $\varrho = m/v$ sűrűséghez képest állandóan változik. Ha a ΔV térfogatingadozása itt $\sqrt{n}$ [3]. A többi statisztikus jellemző közül példaként az entropia fluktuációja

$$\overline{(\Delta S)^2} = kCp$$

(ahol k a Boltzmann állandó Cp pedig a fajhő állandó nyomáson) a hőmérséklet fluktuációja pedig

$$\overline{(\Delta T)^2} \frac{kT^2}{C_v} \qquad 1)$$

ahol T a hőmérséklet, C_v pedig a fajhő állandó térfogaton. A statisztikus jellemzők ezen fluktuációk nagyságánál pontosabban értelmezhetők.

Az egyatomos gázok hőmérsékletére egy másik, a definícióból adódó pontossági, vagy értelmezhetőségi korlát, egy matematikai statisztikai konfidenciaintervallum is meghatározható.

A T hőmérsékletű gázban egy szabadsági fokra átlagosan $kT/2$ energia jut. Mivel jelen esetben az egyatomos „molekulák" csak transzlációs mozgást végezhetnek és egy molekula három szabadságfokkal rendelkezik, a molekulák energiája átlagosan $3\,kT/2$. Ez az energia a molekula mozgási energiájának átlagértéke, azaz

$$\frac{1}{2} m\overline{V^2} = \frac{3}{2} kT \qquad 2)$$

ahol m a gázmolekulák tömege, $\overline{v^2}$ pedig sebességnégyzetük átlagértéke. [4]

A gáz T hőmérsékletét a gázmolekulák sebessége határozza meg [8]. Ha ez a sebesség nagyobb, a gáz hőmérséklete magasabb. A kinetikus gázelmélet szerint a hőmérséklet a 2) képletből

$$T = \frac{m\overline{V^2}}{3k} \qquad 3)$$

A molekulák sebességnégyzetének átlagértéke $\overline{V^2}$ matematikai statisztikai szempontból egy átlagérték és így, mint minden átlagértékhez $\overline{V^2}$-hoz is tartozik egy konfidenciaintervallum, $\Delta(\overline{V^2})$.

A molekulák sebességnégyzetének éppen megvalósuló átlagértéke, a sebességnégyzet várható értéke körül, $M(V^2)$ körül $\Delta(\overline{V^2})$ értékkel fog ingadozni. $\Delta(\overline{V^2})$-ot meghatározva a hőmérsékletre adódó konfidenciaintervallum

$$\Delta T = \frac{m}{3k} \Delta(\overline{V^2}) \qquad 4)$$

A $\Delta(\overline{V^2})$ mennyiség meghatározható például a molekulák sebességeloszlását leíró Maxwell eloszlásból.

Annak valószínűsége, hogy egy molekula sebessége a V és $V + dV$ sebességtartományba essen, a Maxwell eloszlás mint sűrűség függvény alapján

$$\varrho(V) = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi\, kT}\right)^{\frac{3}{2}} V^2\, e^{-\frac{mV^2}{2kT}} \qquad 5)$$

vagy

$$\frac{1}{V_0} = \left(\frac{m}{2kT}\right)^{\frac{1}{2}} - \mathrm{t} \qquad 6)$$

helyettesítve

$$\varrho(V) = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \frac{V^2}{V_0^3} e^{-\frac{V^2}{V_0^2}} \qquad 7)$$

A molekulák sebességnégyzetének sűrűségfüggvénye a Maxwell eloszlásból határozható meg. Legyen u a molekulák sebességének négyzete, azaz $u = V^2$ (és $u_0 = V_0^2$). A sebességnégyzet sűrűségfüggvénye legyen $g(u)$. Mivel a V molekulasebesség valószínűségi változó, így annak függvénye $u = f(V)$ is valószínűségi változó. A V

Elhangzott az MTESZ Mérés és mérték az emberi művelődésben című, 1976 májusában tartott nemzetközi konferencián.

valószínűségi változó $u = f(V)$ függvényének $g(u)$ sűrűségfüggvénye [5], [6]:

$$g(u) = \left(\frac{d}{du} f^{-1}(u)\right) \varrho(f(V)) \qquad 8)$$

ahol $f^{-1}(u)$ az $u = f(V)$ függvény inverze.

Ennek alapján

$$g(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{u_0} \sqrt{\frac{u}{u_0}} e^{-\frac{u}{u_0}} \qquad 9)$$

A molekulák sebességnégyzetének várható értéke a várható érték általános definíciója

$$M(u) = \int_{-\infty}^{\infty} u\, g(u)\, du \qquad 10)$$

alapján figyelembe véve, hogy u csak pozitív lehet,

$$M(u) = \int_{0}^{\infty} u \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{u_0} \sqrt{\frac{u}{u_0}} e^{-\frac{u}{u_0}} du \qquad 11)$$

$$M(u) = \frac{3}{2} u_0 \qquad 12)$$

A sebességnégyzet második momentuma — szórásnégyzete — a sebességnégyzet sűrűségfüggvényének és várható értékének ismeretében

$$\delta^2(u) = \int_{-\infty}^{\infty} [u - M(u)]^2 g(u)\, du \qquad 13)$$

általános összefüggéssel számítható [5], [6]. Ebben az esetben

$$\delta^2(u) = \int_{0}^{\infty} \left(u - \frac{3}{2} u_0\right)^2 \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{u_0} \sqrt{\frac{u}{u_0}}\, e^{-\frac{u}{u_0}} du \qquad 14)$$

Az integrálást elvégezve

$$\delta^2(u) = \frac{3}{2} u_0^2 \qquad 15)$$

n számú molekula esetén az egyes molekulák sebességnégyzetei rendre $u_1, u_2, \ldots u_i, \ldots u_n$. Az i-ik molekula sebességnégyzetének várható értéke $M(u_i)$, szórásnégyzete $\delta^2(u_i)$. Az n molekula sebességnégyzetének (közös) várható értéke

$$M_n(u) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} M(u_i) \qquad 16)$$

Az egyes $M(u_i)$ várható értékek azonosak, így

$$M_n(u) = M(u) \qquad 17)$$

Mivel az $u_1, u_2, \ldots u_i, \ldots u_n$ valószínűségi változók egymástól függetlenek és azonos eloszlásúak, a valószínűségszámítás központi határeloszlástétele értelmében együttes eloszlásfüggvényük a normális eloszlás. Ebben az esetben azonban a közös várható érték $M_n(u)$ szórásnégyzete az $\delta^2(u)$ egyedi szórásnégyzetek n-ed része

$$\delta_n^2(u) = \frac{\delta^2(u)}{n} \qquad 18)$$

A 18)-ba $\delta^2(u)$ és u_0 értékeit behelyettesítve kapjuk, hogy

$$\delta_n(u) = \sqrt{\frac{3}{2n}} \frac{2kT}{m} \qquad 19)$$

$\delta_n(u)$-nak a 19) képlet által meghatározott értékét a 4)-be írva

$$\Delta T = T \sqrt{\frac{3}{2n}} \qquad 20)$$

adódik.

Az egyatomos gáz hőmérsékletének bizonytalansága tehát egyenesen arányos a gáz hőmérsékletével és fordítva arányos a rendszerben levő atomok számának négyzetgyökével. Ez a bizonytalanság sok nagyságrenddel kisebb a hőmérsékletmérés terén elérhető legnagyobb mérési pontosságnál. Például 1 liter, 1300 K hőmérsékletű légköri nyomású gáz hőmérsékletének bizonytalansága $2{,}25 \cdot 10^{-10}$ K. 1 liter, 300 K hőmérsékletű 10^{-6} mm Hg nyomású gáz hőmérsékletének bizonytalansága pedig $4{,}18 \cdot 10^{-5}$ K.

IRODALOM

1. Gombás Pál, Kisdi Dávid: Bevezetés az elméleti fizikába I és II, Akadémiai Kiadó, Budapest 1971; 563.
2. L. Landau, E. Lifsic: Sztatiszticseszkaja fizika, Goszudartsztvennoe Izdatyelsztvo Tehniko-teoreticseszkaja Literaturü, Moszkva 1951; 49—50, 364—365.
3. Simonyi Károly: Villamosságtan II. Akadémiai Kiadó, Budapest 1957; 261—262.
4. Antal János: Fizika I. Tankönyvkiadó, Budapest 1966; 24—25.
5. Vince István: Matematikai statisztika ipari alkalmazásokkal. Műszaki Könyvkiadó, Budapest 1968; 46—47, 31—32.
6. Dr. Reimann József: Valószínűségszámítás. A matematikai statisztika elemei. Tankönyvkiadó, Budapest 1971; 56, 61—62, 70—71.
7. Budó Ágoston: Kísérleti fizika I. Tankönyvkiadó, Budapest 1968.
8. Gombás Pál: Fizika mérnökök számára. Akadémiai Kiadó, Budapest 1971; 155.

A MÉRÉS PROBLÉMÁJA A KVANTUM-MECHANIKÁBAN

Jeszenszky Ferenc
Magyar Tudományos Akadémia Központi Hivatala

A kvantummechanika kialakulása, ami egész fizikai világképünk gyökeres átalakulásához vezetett, egy teljesen ártalmatlannak tűnő probléma megoldásával kezdődött.

Közismert tény, hogy a melegített testek elektromágneses sugárzást bocsátanak ki. Alacsonyabb melegítési hőmérsékleten kizárólag hősugárzást — vagyis viszonylag alacsony frekvenciájú elektromágneses hullámokat —; magasabb melegítési hőmérsékleteken viszont a sugárzás egy része látható fény — vagyis magasabb frekvenciájú elektromágneses hullámok — formájában jelentkezik.

A fizikus számára a fenti jelenségnek — a hőmérsékleti sugárzásnak — a problémája a következő kérdésben fogalmazható meg: Adott melegítési hőmérsékleten a kibocsátott sugárzás energiája hogyan oszlik meg a különböző frekvenciájú hullámok között, más szavakkal: mi a hőmérsékleti sugárzás spektriális eloszlása?

A XIX. század végén a fizika abban a helyzetben volt, hogy a kérdést mind kísérletileg, mind elméletileg meg tudta válaszolni. A baj csak az volt, hogy az elméletileg levezetett eloszlásfüggvény egyáltalán nem egyezett meg a kísérleti úton nyert eloszlásfüggvénnyel, sőt: következményeiben képtelenségekre vezetett.

A botrányos helyzetből 1900-ban Max Planck találta meg a kivezető utat. Planck elvetette azt az addig általánosan elfogadott feltételezést, miszerint a sugárzó test energialeadása folytonos, és feltételezte, hogy az energialeadás diszkrét, a sugárzás frekvenciájával arányos energiájú „kvantum"-okban történik. (Az arányossági tényező az ún. Planck-állandó $h = 6{,}62 \cdot 10^{-7}$ ergsec). Ezzel a kiindulással Plancknak sikerült elméleti úton egy olyan eloszlásfüggvényt levezetnie, amely teljes összhangban van a kísérleti tapasztalatokkal.

A XX. század első két évtizedében ezután megsokasodtak azok a kísérleti eredmények, amelyek mind az energia kvantumos jellegére utaltak. Elég, ha a fényelektromos jelenségre, a szilárd anyagok fajhőjének hőmérsékletfüggésére, valamint az atomok vonalas színképére utalunk. A későbbi kutatások arra is rámutattak, hogy nemcsak az energia, hanem más fizikai mennyiségek (pl. az impulzusmomentum) is lehetnek kvantumos jellegűek.

Nem célunk most, hogy a kvantumhipotézis fejlődéstörténetét végigkísérjük. Összefoglalásul csak annyit kell mondanunk: a kísérleti eredményekből arra a következtetésre kell jutnunk, hogy az atomfizikában szereplő fizikai mennyiségek változása sok esetben nem folytonos, és így e mennyiségek csak bizonyos kiválasztott (diszkrét) értékeket vesznek fel. A fizikai mennyiségeknek ez a kvantáltsága a klasszikus fizika számára idegen, újszerű, és a klasszikus fizikán túlmenő törvények fennállására utal.

(Nem közvetlenül előadásom tárgyához tartozik, azonban konferenciánk témaköréhez kapcsolódva közbevetőleg megjegyzem, hogy a fizikai mennyiségek diszkrét értékeinek különbsége általában igen kicsi. Az elmúlt évszázadok fizikája ezeket az értékeket nem tudta megkülönböztetni egymástól. A mérés- és műszertechnika fejlődése csak a XX. század kezdete óta tette lehetővé ilyen kis különbségek mérését.)

Az elméleti fizika hosszú ideig viaskodott azzal a feladattal, hogy megalkosson egy olyan egységes elméletet, amely alkalmas a kvantumos jelenségek ellentmondásmentes és maradéktalan leírására. Végül az új elmélet — a kvantummechanika — megalkotására a 20-as években került sor, elsősorban a közelmúltban elhunyt Heisenberg erőfeszítéseinek eredményeképpen.

Semmiképpen sem vállalkozhatunk arra, hogy a kvantummechanikának akárcsak az alapgondolatait ismertessük. Csak arra szorítkozhatunk, hogy bemutassuk a kvantummechanika néhány olyan eredményét, amelyeknek a mérés problematikájával kapcsolatban jelentősége van.

Az egyik ilyen eredmény, hogy bizonyos fizikai mennyiségek párokba sorolhatók. Ileyn párok például egy fizikai rendszer energiája és az idő, vagy egy fizikai rendszer impulzusa és helye.

Egy másik ilyen eredmény az, hogy ilyen fizikai mennyiségpárok egyidejűleg nem mérhetők tetszőleges pontossággal.

A mérési pontosságok között kvantitatív összefüggés áll fenn. Ha a párba foglalt fizikai mennyiségeket p-vel, illetve q-val jelöljük, akkor a szórásaik között a következő a kapcsolat:

$$D(p) \cdot D(q) \geq \frac{h}{4\pi}.$$

Látjuk tehát, hogy ha az egyik mennyiség szórását csökkenteni igyekszünk, a másik mennyiség szórása növekszik. Szórásmentes mérési eredményhez csak akkor juthatunk, ha a „pármennyiség" szórása végtelen naggyá válik.

Hogy amit mondottunk, példával is megvilágítsuk, egy atom energiaállapotát csak akkor tudjuk pontosan meghatározni — de akkor viszont teljes pontossággal —, ha stacionárius állapotban van. Ekkor ugyanis az időkoordináta $-\infty$ és $+\infty$ között bármi lehet. Nem stacionárius állapotban viszont, amikor a mérés időpontja már nem közömbös, az energiaállapot szórásmentesen nem határozható meg.

Hasonló megfontolások végezhetők egy elektron helyével és impulzusával kapcsolatban is.

Elhangzott az MTESZ Mérés és mérték az emberi művelődésben című, 1976 áprilisában tartott nemzetközi konferencián.

Megjegyezzük, hogy ez a probléma a klasszikus vagy makrofizikában nem merült fel, hiszen ott — h rendkívül kis értéke következtében — a szórásértékek elhanyagolhatóak. (Ha pl. egy 5 g tömegű golyó helyét 1 m pontossággal adjuk meg, a sebesség szórása 10^{-24} cm s^{-1}.)

A mikroobjektumok világában a fenti tényállás azonban nem elhanyagolható következményekhez vezet.

Vegyünk például egy protonból és elektronból álló fizikai rendszert (hidrogénatomot). Kíséreljük meg az elektron helyének megmérését. Ez a mérés *elvileg* nem végezhető el szórásmentesen. Megállapítható egy bizonyos statisztikus eloszlás, azonban azt, hogy egy adott hidrogénatom elektronja hol található, előre nem lehet megmondani. Határozatlan. Ezt úgy is megfogalmazhatjuk, hogy a fizikai rendszerek kvantummechanikai leírása nem teljes, és elvileg sem tehető teljessé.

Ez a szituáció éles ellentétben van azzal, amelyben például az égi mechanika van. A Naprendszer állapotára teljes leírás adható, évszázadokkal előre jelezhetők például a Nap- és Holdfogyatkozások időpontjai.

Hangsúlyozni szeretném, hogy a kvantummechanikai leírás nem teljes volta logikai szükségszerűséggel következik a szórások között fennálló, az előbbiekben említett összefüggésből — az ún. Heisenberg-féle határozatlansági relációból — a határozatlansági reláció pedig ugyancsak logikai szükségszerűséggel következik az egyes fizikai mennyiségek kvantálságának a tapasztalat által sokszorosan alátámasztott tényéből. Tehát nem várhatjuk, hogy valamilyen új felfedezés — elsősorban a mérési módszerek tökéletesítése terén — megváltozathatja ezt a szituációt. (Hogy egy durva analógiát mondjunk: a geodéziában a mérési módszerek tökéletesítésétől sokat várhatunk, de egyet biztosan nem: annak bebizonyítását, hogy a Föld nem gömbszerű, hanem egy sík korong.)

Az előállított szituáció igen kényes. Végeredményben arról van szó, hogy elvileg lehetetlenné vált az, amit a tudomány ideális céljának tekintettek: a jelenségek bekövetkezésének maradéktalan előrejelzése. Hangsúlyoznunk kell, hogy *elvileg*, hiszen *gyakorlatilag* az előrejelzés számtalan esetben megoldatlan feladat.

Hogyan értelmezzük az előállott szituációt?

Az egyik értelmezési irányzat éppen a mérési folyamat elemzéséből indul ki. Azt állítja, hogy a mikrofizikai rendszerekben tulajdonképpen minden fizikai mennyiség egyértelműen és pontosan meghatározott értékkel rendelkezik. Azonban amikor mérést hajtunk végre, akkor azt tesszük, hogy a mérendő objektumot egy másik fizikai rendszerrel kölcsönhatásba hozzuk.

Tekintsünk egy konkrét példát. Ha mikroszkóp segítségével akarjuk egy tárgy helyzetét meghatározni, azt annál nagyobb pontossággal tehetjük meg, minél rövidebb a használt fény hullámhossza, vagyis minél nagyobb a frekvenciája. Ekkor azonban viszonylag nagy lesz a fény energiája. A nagyenergiájú fény viszont „meglöki" a mérendő tárgyat, és ezzel az impulzusát megváltoztatja, tehát a tárgy elmodul, ezzel a helyzete megváltozik. Azt viszont, hogy miként változik meg, nem tudjuk, mivel az impulzus megváltozása ezzel a módszerrel nem mérhető.

A kölcsönhatás tehát szükségszerűen a mérendő objektum állapotának megváltozásához vezet, mégpedig statisztikus, tehát részleteiben ellenőrizhetetlen módon, innen ered az előrejelzés bizonytalansága.

A fenti értelmezésnek az a hibája, hogy olyan fizikai mennyiségek létezését tételezi fel, amelyek elvileg nem mérhetők.

Ezért ma már azt az álláspontot foglaljuk el, hogy a statisztikus bizonytalanságot a mikroobjektumok belső, lényegi tulajdonságának tekintjük. Ennek részletezése túlhaladja mind a kvantummechanikai méréselmélet, mindpedig általában a fizika problémakörét.

A fizika eljut annak megállapításához, hogy a mikroobjektumok belső meghatározatlansága: tény; ennek értelmezése azonban már csak a filozófiai általánosítás szintjén végezhető el.

Ezen a területen az utolsó szó még nincs kimondva; a különböző próbálkozások közül még egyik sem adott megnyugtató és általánosan elfogadott megoldást.

A magam részéről arra a megoldásra hajlok, hogy az anyagnak strukturális összefüggésekből kiszakított (vagy csak igen laza struktúrákhoz kötődő) darabkáiban — és az elkülönítve vizsgált mikroobjektumok ilyenek — az anyag önmozgása kaotikus meghatározatlanságban nyilvánul meg; a meghatározottságot éppen a struktúrákba való szerveződés adja meg (gondoljunk itt akár élettelen — makrofizikai —, akár élő — biológiai — struktúrákra); a világfolyamat egészének meghatározottsága pedig csak a világ egészének strukturáltságából — a legmagasabb fokú (mondhatjuk: kozmikus) strukturáltságból — érthető meg.

Mindezek következtében a mérést nem tekinthetjük egy olyan folyamatnak, amely mintegy megzavarja a fizikai rendszer állapotát, hanem azt mondjuk, hogy a mérési folyamat a fizikai rendszernek egy bizonyos kölcsönhatásban tanúsított magatartásáról ad felvilágosítást.

A kvantummechanikai mérés korábbi interpretációja olyan hamis következtetéseknek adott tápot, miszerint a mérés megakadályozza, hogy valójában megismerjük a mikrofizikai rendszereket. A helyes interpretáció azonban eloszlatta ezeket a félreértéseket, és visszaállította a mérésnek, mint a fizikai megismerés lényeges mozzanatának a tekintélyét.

AZ ATOMFIZIKA ÉS A FILATELIA

Dézsi Zoltán, Dézsi Zoltánné
KLTE gyakorló gimnázium
DOTE Kardiológia Klinika

A bélyeg nem csak a postai küldemények egyszerű bérmentesítését szolgálja hanem igen széleskörű elterjedésénél és képszerűségénél fogva tág lehetőséget teremt a kibocsátó országok számára az információk széleskörű terjesztésére, a fontosabb események megörökítésére. A kiadott bélyegek és az ehhez kapcsolódó filateliai dokumentumok lehetővé teszik majdnem minden történelmi esemény, technikai fejlődés bemutatását igen változatos szempontok szerint. A következőkben az atomfizika történetét követjük — nem törekedve teljességre — a megjelent bélyegek felhasználásával.

Az anyag atomos szerkezetének gondolatát a hindu filozófusokig illetve a régi görög iskoláig vezethetjük vissza. Időszámításunk előtt az V. században *Demokritosz (i. e. 460—370)* 1 sz. kép görög filozófus kísérelte meg az anyag különböző sűrűségének értelmezését. Elmélete szerint az elemek tovább nem osztható kis egységekből épülnek fel, amelyet a görög „atomos" szóból atomnak nevezett el. Demokritosz gondolatát a későbbi filozófusok nagyrésze elvetette s mintegy 2000 év után *René Descartes (1596—1650)* 2 sz. kép elevenítette fel. (Emlékére kiadott bélyege híres művének címe szerepel, amelyet téves címmel is kiadtak 3 sz. kép.) Az anyag atomos szerkezetére vonatkozó elméletek a VIII. századig főleg filozófiai jellegűek. A metafizikus atomelméletből a kivezető utat a kémiai kutatások fejlődése jelentette. A XVIII. század folyamán *Antoine Laurent Lavoisier (1743—1794)* 4 sz. kép tömegmegmaradási tétele forradalmasítja a kémiát. *John Dalton (1766—1844), Gay Lussac (1778—1850)* 5 sz. kép majd *Amadeo Avogadro (1776—1856)* 6 sz. kép munkássága alapján az anyag atomos szerkezetére vonatkozó ismeretek lehetővé teszik, hogy *Jakob Berzelius (1779—1848)* 7 sz. kép 1819-ben öt elemet atomsúlyuk szerint rendezve táblázatba foglaljon és feltételezze, az elemek különböző mennyiségben negatív és pozitív elektromosságot tartalmaznak.

Dimitrij Mengyelejev (1834—1907) 8 sz. kép 1869-ben az eddig ismert elemeket meghatározott rendszer szerint táblázatba foglalja, megalkotva az első periódusos rendszert. Periódusos rendszeréből eddig nem ismert elemek létezését tételezi fel.

A XIX. század második felében *Wilhelm Conrad Röntgen (1845—1923)* a ritkított gázakban történő kisülések vizsgálata közben 1895-ben felfedezi a röntgen-sugarakat. 9 sz. kép. Munkásságáért 1901-ben Nobel-díjat kap. A felfedezés forradalmasítja az egész tudományos kutatást. Lázas munka indul meg új, eddig még nem ismert sugárzások felfedezésére. 1896-ban *Henri Becquerel (1852—1908)* 10 sz. kép felfedezi az uránsó új-típusú sugárzását. Felfedezésével kezdetét veszi az atomfizika új fejezete a természetes radioaktivitás, amely az atom fogalmának átalakuását vonja maga után. A felfedezés *Marie Curie—Marie Sklodowska (1867—1934)* 11 sz. kép lengyel származású kutatót — aki a Sorbonne egyetemen tanul — hatalmas munkára ösztönzi. Férjével *Pierre Curie (1859—1906)* 12 sz. kép hosszas fárasztó munka után 1898 júliusában egy új radioaktív elemet állítanak elő, amelyet Marie Curie hazájáról poloniumnak neveznek el. Még ez évben újabb radioaktív elemet állítanak elő, a rádiumot. 1903-ban munkásságukért Becquerrel-el Nobel dijat kapnak. Munkájukhoz nyersanyag gyanánt a Jachymov-ból származó szurokércből az üvegiparhoz szükséges uránsó előállítása után visszamaradó üledéket használták fel. 13 sz. kép. Vizsgálatokat végeznek arra vonatkozóan, hogy milyen hatással van a rádium sugárzása az élő szervezetre. A gyógyító eljárást, amely a rádium sugárzását használja fel Curie-therápiának nevezik 14 sz. ábra. Pierre Curie 1906-ban bekövetkezett tragikus halála után M. Curie tovább folytatja a munkát. Azon kivételes egyéniségek közé tartozott akiknek két különböző tudományág területén végzett kimagasló munkásságáért két alkalommal ítélték oda a Nobel díjat 15 sz. kép. A rádiumból kilépő sugárzás vizsgálatával, alkalmazásával számos kutató, kutatócsoport foglalkozott. Kiemekedö munkásságot végzett *Ernst Rutherford (1871—1937)* 16 sz. kép, szórási kísérletei alapján megalkotja a Rutherford-féle atommodellt. Első alkalommal hoz létre mesterséges magátalakítást. Az atom szerkezetére vonatkozó kutatásaiért 1908-ban Nobel díjat kap 17 sz. kép. Rutherford vizsgálatai rámutattak, hogy az atommag átalakításához nagy energiájú bombázó részecskére van szükség. 1931-ben R. J. van de Graaf (1901—1975) a megosztógép elvét továbbfejlesztve elkészíti a róla elnevezett generátort, amelynek tökéletesített formáját a nyomásgenerátor szemlélteti a 18 sz. kép. 1913-ban Charles Thomson Wilson (1869—1959) kifejleszti a ködkamrát. 1927-ben munkásságáért Nobel díjat kap. Ködkamra és buborékkamra pályanyomokat szemléltet a 19. sz. bélyeg. *Niels Bohr (1885—1962)* 20 sz. kép 1913-ban kidolgozza a Bohr-féle atommodellt, magyarázatot ad a hidrogén spektrumvonalainak keletkezésére. 1932-ben J. Cadwick (1891—) felfedezi a neutront, 1935-ben Nobel díjat kap. A neutron felfedezésével lehetőség nyílik semleges részecskével történő atommagbombázásra. Nagyenergiájú neutronok előállítására kidolgozzák a neutrongenerátorokat. 21 sz. kép. 1932-ben *Ernst Orlando*




DISCOURS DE LA METHODE


DISCOURS SUR LA METHODE

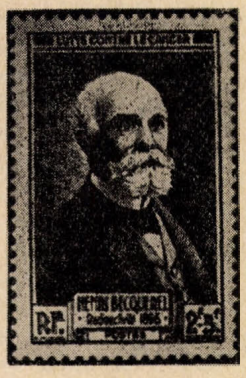



10f
GAY-LUSSAC
3f


AMEDEO AVOGADRO
POSTE ITALIANE L.25


BERZELIUS 10
SVERIGE


СТОЛЕТИЕ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ЗАКОНА
Д.И.МЕНДЕЛЕЕВА
6к


HENRI BECQUEREL


LATINO Y 1º EUROPEO DE RADIOLOGIA - BARCELONA 1967
VIII CONGRESO
50
ESPAÑA


60h


MARIA SKŁODOWSKA
60 gr POLSKA


UNION INTERNATIONALE CONTRE LE CANCER


20
1867-1934
ORI FORT MARIE CURIE


MARIA SKŁODOWSKA CURIE
NAGRODY NOBLA 1903, 1911
100 ROCZNICA URODZIN
60 GR POLSKA

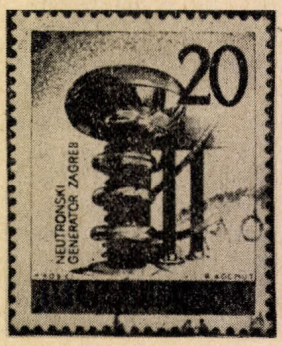

1871-1937
ЭРНЕСТ РЕЗЕРФОРД
6к


SVERIGE 35


15
ЈУГОСЛАВИЈА


ORGANISATION EUROPÉENNE
CERN GENÈVE
50
RECHERCHE NUCLÉAIRE

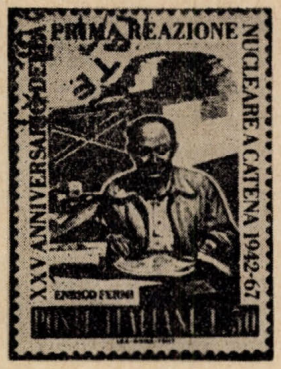

NIELS BOHRS ATOMTEORI
35


20
NEUTRONSKI GENERATOR ZAGREB

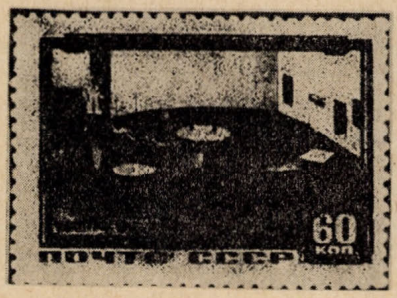

20




15

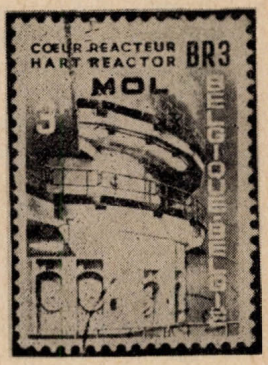

PRIMA REAZIONE NUCLEARE A CATENA
XXV ANNIVERSARIO
ENRICO FERMI


800


60
КОП.




Egyesített Atomkutató Intézet
Dubna 1956-1966
60
MAGYAR POSTA


COEUR REACTEUR
HART REACTOR
BR3
MOL

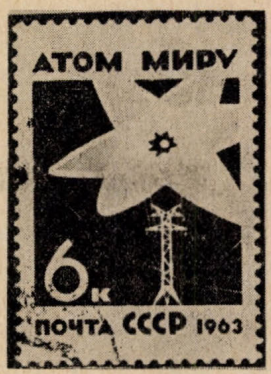

7+3


15+5
1966
NIPPON


REPUBLIQUE FRANCAISE
070


DIA
15


ПОЧТА
СССР
20к
1970
АТОМНАЯ ПОДВОДНАЯ ЛОДКА
„ЛЕНИНСКИЙ КОМСОМОЛ"


АТОМ МИРУ
6к
ПОЧТА СССР 1963


THE INVENTIVENESS OF MAN SHALL BE
ATOMS FOR PEACE
UNITED STATES POSTAGE 3c

Lawrance (1901—1958) új elven alapuló részecskegyorsítót készít a Berkeley egyetemen, amely ciklotron néven vált ismertté 22 sz. kép. Munkásságáért 1939-ben Nobel díjat kap. A neutron felfedezésével rohamosan haladunk egy új, az atomenergia felszabadításának korszaka felé.

1934-ben *Irene Curie (1895—1956)* és férje *Frederick Joliot-Curie (1900—1958)* 23 sz. kép az alumíniumnak alfa sugarakkal történő bombázása útján felfedezik az első mesterséges radioaktív elemet, a foszfor-32-es izotópját. 1938-ban *Ottó Hahn (1879—1968)* és *Fritz Strassman (1902—)* felfedezik az urán atommag hasadását. A felfedezés 25. évfordulójára kiadott bélyegen a maghasadásnál az atommáglyában fellépő fényjelenséget (Cserenkov-sugárzást) szemlélteti 24 sz. kép. Az 1940-es évek elején *Enrico Fermi (1901—1954)* 25 sz. kép vezetésével Chicago-ban elkészül az első atommáglya. 1954. július 16-án felrobbantják az első kísérleti atombombát az Alamagordo sivatag fölött. Néhány héttel később 1945. augusztus 6-án Nagasaki, augusztus 9-én Hirosima felett robban az atombomba. Az atombomba áldozatainak emlékére Japánban bélyeget adnak ki 26 sz. kép.

Az első atommáglya felépítése után igen sok országban építenek atommáglyákat, a felszabaduló energia hasznosítása révén kialakulnak az atomerőművek. Az atomerőművek az energiaszolgáltatáson kívül mesterséges radioaktív izotópokat is termelnek. 27—30 sz. kép. Az atommáglyában termelt radioaktív izotópok egyrészt eredményesen használják fel a gyógyászatban. A Japánban kiadott bélyeg a rosszindulatú daganatok kezelésére használt modern besugárzó berendezést szemlélteti 31, 32 sz. kép. Az atomenergiát rövid idő múlva tengeralattjárók, hajók meghajtására használják fel 33 34 sz. kép.

A kutatások továbbfejlesztésére nemzetközi összefogás jön létre. Az atomenergia békés célú felhasználására 1955-ben Genf-ben nemzetközi konferencia jön létre, első elnöke az indiai származású H. J. Bhabha (1909—1966) 35 sz. kép fizikus professzor. Demokritosz korától az atomenergia felszabadításával az ember lényegében azon fáradozott, hogy hatalmába kerítse a természet ezen energiaforrását. Soddy a radiumról tartott előadásainak befejezésekor mondta: „Alapos a reményünk, hogy eljön az a nap amelyen az ember tetszése szerint fordíthatja majd saját céljaira az energiának azokat a forrásait, a melyeket a természet olyan féltékenyen rejteget előle a jövő számára." Az atomenergia békés célú felhasználását számos bélyeg népszerűsíti. 36, 37 sz. kép.

IRODALOM

C. H. Luntz: Medicamundi 1969 *14* 49.
E. J. Burge: Physics Education 1971 *6* 38, 357
L'esbace: Lollini bélyegkatalógus 1974.

A FIZIKA TANÍTÁSA

AZ ÚJ ORSZÁGOS FIZIKA TANTERV

Varga Lajos
OPI

Általános iskola

A pedagógiai sajtóból köztudott, hogy a hetvenes évek második felében új tantervek lépnek életbe valamennyi iskolatípusban. Az általános iskolában 1978-ban kezdődik meg az új tantervek, köztük a fizika új tantervének bevezetése. Az alábbiakban erről a tantervről adunk ismertetést a helyszabta korlátok között.

Az Oktatási Minisztérium az Országos Pedagógiai Intézetre bízta a tantervek kidolgozását. Időközben felkérte a Magyar Tudományos Akadémiát, hogy nyújtson segítséget a közoktatás távlati fejlesztéséhez. E felkérés alapján az Akadémia létrehozta az Elnökségi Közoktatási Bizottságot, melynek keretében albizottságok működtek; köztük a Természettudományi Albizottság is Marx György akadémikus elnökletével. A Természettudományi Albizottság az eredeti OM felkérésnél többre is vállalkozott; tanítási kísérleteket indított, amelyek eddig főleg az alsó tagozaton (természetismeret) és a gimnáziumban (anyagszerkezet) hoztak sok értékes eredményt, tapasztalatot. Az alsó tagozati kísérletek tapasztalatait már az 1978-ban életbelépő tantervben figyelembe lehetett venni. Az Albizottság felső tagozati és gimnáziumi kísérletei hosszabb távúak, inkább a 90-es évekre irányulnak (1). Ezek főbb tendenciái is érvényre jutottak azonban az új tantervben az Albizottsággal folytatott megbeszélés és egyeztetés következtében.

Egy-egy tantárgy tantervét az OM megbízatásnak megfelelően az OPI illetékes tanszéke készítette. Ehhez a munkához a tanszékek ún. tantárgyi tantervi bizottságokat hoztak létre, zömmel gyakorló tanárokból.

A fizika tantervek közül az általános iskolai tanterv kidolgozásához igen nagy segítséget kaptunk a tanárképző főiskolák Fizika Szakbizottságától és az általa létrehozott tantervi kutatócsoporttól, mely a szakbizottság elnökének, Kövesdi Pál tanszékvez. főisk. tanár irányításával működött, és konkrét, részletes tantervi javaslatot is kidolgozott mindhárom osztály számára.

A tanterv főbb új vonásai

Pedagógiai szempontból igen fontos vonásuk az új terveknek, hogy a nevelésközpontúságot kívánják megvalósítani, és ennek rendelnek alá minden egyebet (tehát például a tananyag, a módszerek kiválasztását, a követelmények megállapítását is). Maga az elv nem új, a megelőző és a jelenlegi tantervek is törekedtek a megvalósítására, csak nem sok eredménnyel, mert főleg a tananyag kiválasztásában az oktatásközpontúság és a szakmai igények lehető legteljesebb mennyiségi kielégítése jutott érvényre. (Alapjában véve ez vezetett a túlterheléshez és a tananyagcsökkentés elrendeléséhez.)

Újszerű a tantervekben, hogy a jelenleginél nagyobb mozgási teret biztosítanak a tanár számára. Jelenleg úgyszólván csak a tanítási módszerek megválasztásában van teljes szabadsága a tanárnak, a tantervben feltüntetett tananyag azonban teljes mértékben kötelező a számára; annak legfeljebb csak egy osztályon belüli sorrendjén változtathat, de a tartalmán nem. Az új tanterv lehetővé teszi, hogy a módszertani szabadság mellett a tananyag egy részét is a tanár válassza meg a legjobb belátása szerint. A tananyagnak ehhez a részéhez csupán ajánlásokat ad a tanterv. Ily módon a tanterv két kategóriában tünteti fel a tananyagot: minden tanár és tanuló számára kötelező témák *(törzsanyag)* és a tanár számára ajánlott témák *(kiegészítő anyag)*. Az OM elő-

írása szerint minden tantervet úgy kell elkészíteni, hogy a törzs- és a kiegészítő anyag aránya kb. 2:1 legyen. Fontos korlátozás a kiegészítő anyagra vonatkozóan, hogy csak akkor dolgozhat fel a tanár bármiféle kiegészítő témát, ha az osztály megfelelő szinten elsajátította a törzsanyagot. Ez a korlátozás a tanulók túlterhelését kívánja megelőzni (nem szabad, hogy az új tanterv újabb túlterhelés forrása legyen).

Igen fontos új vonásként kell még megemlíteni, hogy az új tantervek a jelenleginél részletesebben, konkrétebben tartalmazzák a követelményeket. A részletes követelményrendszer nemcsak a nem szakos tanár (fizikát tanító nem fizika szakos tanár) igénye, hanem a szakos tanáré is. Korábban a tanár teljesen a saját belátására volt bízva e téren, mivel a jelenlegi tanterv nem nyújt eléggé konkrét eligazítást a követelmények vonatkozásában, és máshonnan sem kapott a tanár használható útmutatást (a középiskoláktól jövő visszajelzés ugyanis szinte kizárólag csak summás elmarasztalás, ami legfeljebb csak a tanulói terhelés általános növelésének irányában hatott). A követelményrendszer hiánya megmutatkozott például abban is, hogy ugyanazon osztályzat mögött nagyon eltérő tanulói felkészültség lehetett, tanártól, iskolától függően. Néhány éve van már a jelenlegi tantervhez is részletes követelményrendszer (2), és a követelmények teljesülésének megállapítását segítő feladat-lapgyűjtemény (3). Ezek egyben tapasztalati alapként szolgálnak az új tantervhez.

Az új tanterv továbbra is nagy súlyt fektet a tanulók saját tapasztalatszerzésére, kísérletezésére. Az alkalmazó jellegű tanulói kísérletek (az ún. fizikai gyakorlatok) megtartásán és igényesebbé tételén túl fokozni kívánja az ismeretszerzés fázisába iktatott tanulói kísérletezést. A konkrét megvalósítás elsősorban az új, munkáltató tankönyvre hárul. A kísérletező munkáltatás tankönyvi megvalósításához a jelenlegi munkafüzetekkel (4), valamint a tantervi előmunkálatok során készített és kipróbált munkáltató tankönyvvel (5) szerzett tapasztalatokra tudunk támaszkodni.

Szakmai szempontból a szemléletmód változása jelenti elsősorban az újat a tantervben. Arra törekedik az új tanterv, hogy a jelenleginél dinamikusabb szemléletet adjon, és jobban előtérbe helyezze az átfogóbb fogalmakat, elveket (pl. kölcsönhatás, megmaradási elvek).

A konkrét tartalom szempontjából nincsen lényeges eltérés az eddigi általános iskolai fizika tantervekhez viszonyítva. Jóformán csak az erőtér fogalma, az impulzus és megmaradása tekinthető kifejezetten újnak általános iskolai viszonylatban.

Annál jelentősebb viszont a strukturális eltérés az eddigi általános iskolai fizika tantervekhez képest, és éppen ez volt a legvitatottabb kérdés a tantervi viták során.

Az OPI fizika tanszékén a tanterv kidolgozásában három kiindulási alapra támaszkodtunk elsősorban: az oktatáslélektani kutatások újabb eredményeire (főleg Piaget kutatásaira); a tanulók fizikai előismereteire, vagyis hogy mit tudnak fizikából a fizika tantárgyszerű tanulásának kezdetén (6., 7., 8., 9.) és a fizikatanításunk jelenlegi eredményességére, amit statisztikailag reprezentatív mintákon és egymástól függetlenül mért meg az OPI fizika tanszéke (10) és a JATE egyik kutatócsoportja (11). Mindezeknek a figyelembe vételével kialakított tananyag-struktúrát terjesztettük a tantervi viták elé, amelyekről részletesebben is beszámol A Fizika Tanítása 1976. 2. száma (12). A viták sorát a MTA EKB Természettudományi Albizottságával folytatott egyeztetés zárta le. A végül így kialakult tantervet tehát olyannak tekinthetjük, amelyet minden kompetens fórum elfogadott.

Az óraterv

Minden tantervi reform esetén az óraterv a legvitatottabb kérdés. Az OPI, társadalmi szervek (köztük természettudományi egyesületek, elsősorban az Eötvös Loránd Fizikai Társulat), a MTA Elnökségi Közoktatási Biz. javaslata alapján végülis a következő óraterv született meg a természettudományi, technikai tantárgyakra vonatkozóan. Köztudott, hogy ez az óraterv nem váltott ki osztatlan helyeslést. A tanterveket azonban természetesen eszerint az óraterv szerint kellett elkészíteni.

tantárgy/oszt.	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
Környezetism.	2	2	2	3	3	—	—	—
Földrajz	—	—	—	—	—	2	2	2
Fizika	—	—	—	—	—	2	2	2
Kémia	—	—	—	—	—	—	2	2
Biológia	—	—	—	—	—	2	2	2
Technika	1	1	2	2	2	2	1,5	1,5
Fakultatív ó.	—	—	—	—	—	—	2	2

Az óratervből is látható, hogy a fizikának az 1—5. osztály környezetismeret tantárgyába tömörített természetismeretre kell épülnie. Ez a természettudományi bázis az utóbbi években örvendetesen megerősödött, elsősorban az MTA EKB Természettudományi Albizottságának tevékenysége folytán. A 6. osztályban előkészítő szerepet is el kell látnia a fizikának a kémia számára. Igen fontos még a jó szinkron a technika tantárggyal, főleg a 6. és a 7. osztályban.

A tananyag

Az új tantervek mindegyike a következő fő fejezeteket tartalmazza: cél és feladatok (a tantárgy egészére); feladatok, tananyag, órafelosztás, követelmények (osztályonként); javaslatok, útmutatások; eszközök. Helyszűke miatt ezen a helyen csak a tananyagot ismertetjük a tanterv egészéből.

6. Osztály

I. Kölcsönhatás, erő, mozgás (kb. 14 óra)

Törzsanyag

Kölcsönhatások. Konkrét példák a fizikai kölcsönhatásokra a fizika különböző témaköreiből (köztük a mágneses és az elektrosztatikus vonzás és taszítás is).

A magára hagyott test mozgásának megfigyelése. Az egyenesvonalú egyenletes mozgás.

A nyugalmi állapot és a mozgásállapot. A testek tehetetlensége. A tömeg. A tömeg jele, mértékegységei.

A mozgásállapot megváltozásában megnyilvánuló kölcsönhatások. Az erő mint a mozgásállapot megváltozásában megnyilvánuló kölcsönhatás mértéke. Erő ellenerő. Az erő ábrázolása nyíllal.

Erőfajták. Kölcsönhatás az egymással érintkező testek között: izomerő, súly, súrlódási erő, közegellenállási erő, rugalmassági erő. Kölcsönhatás egymással nem érintkező testek között: gravitációs erő, magnetosztatikus és elektrosztatikus erő.

Összefüggés az erő, a test tömege és a mozgásállapot megváltoztatása között (kvalitatíven).

Alakváltozás az erő hatására. A rugós erőmérő. Az erő jele, mértékegysége (N), mérése.

A testek súlya és tömege.

Egyenlő térfogatú testek tömegének összehasonlítása. A sűrűség mint az anyag egyik jellemzője. A sűrűség jele, kiszámítása, mértékegységei.

Kiegészítő anyag

Példák nem fizikai kölcsönhatásokra. Az égitestek mozgása. A rakéta működési elve. Az űrkutatás főbb állomásai. A test súlyának változása a Földön, ugyanazon test súlya más égitesteken. A súlytalanság.

A tömeg kiszámítása a sűrűségből és a térfogatból. A térfogat kiszámítása a sűrűségből és a tömegből.

II. Az energia és a munka (kb. 12 óra)

Törzsanyag

Kölcsönhatások energetikai vizsgálata a fizika különböző területeiről vett példákon. Az energia általános fogalma. Energiafajták.

Az energia átalakulása, megmaradása.

A mechanikai energiaváltozás mértéke; a munka fogalma kvalitatíven. A mechanikai munka jele, kiszámítása, mértékegysége.

Mechanikai energiaváltozások a gyakorlatban.

Kiegészítő anyag

Az erő kiszámítása a munkából és az útból. Az út kiszámítása a munkából és az erőből.

III. Hőjelenségek (kb. 14 óra)

Törzsanyag

A Brown-mozgás, a diffúzió. Részecskék rendszertelen mozgása. A testek korpuszkuláris felépítettsége. A belső energia értelmezése.

A súrlódási munka. Felmelegedés súrlódás következtében.

A hőmérséklet mint a belső energia jelzője. A belső energia megváltozása súrlódási és termikus kölcsönhatás esetén. Az égés, égéshő, fűtőérték.

A hővezetés, hőáramlás és hősugárzás mint energiaátadás.

Hőmérséklet-kiegyenlítődés. A fajhő.

Testek méretváltozása hőmérsékletváltozáskor. A hőmérsékletmérés elvi alapjai. Gyakorlati vonatkozások.

A halmazállapotok és leírásuk részecskemodell alapján.

Halmazállapot-változások.

Az első főtétel.

Kiegészítő anyag

A hőmérő készítésének története. A Kelvin skála.

Anyagok különböző tulajdonságainak megváltozása hőmérsékletváltozáskor. Az energiagazdálkodás problémái.

7. Osztály

I. Az elektromos áram (kb. 18 óra)

Törzsanyag

Az elektromossággal kapcsolatos alapvető balesetmegelőzési tudnivalók.

Az elektromos töltés és feszültség. Az elektromos áram. A szabad elektron.

Az elektromos áramkör. Vezetők és szigetelők.

Fogyasztók soros és párhuzamos kapcsolása.

Kapcsoló az áramkörben; elemi, logikai problémák.

A galvánelemek.

Az áramkör energetikai vizsgálata. Elektromos energiaforrások. A fogyasztó mint energiaátalakító.

A feszültség mérése, alapvető méréstechnikai jártasságok.

Változtatható ellenállás az áramkörben.

Az áramerősség mérése, alapvető méréstechnikai jártasságok.

A feszültség és az áramerősség vizsgálata azonos fogyasztó esetén. Ohm törvénye.

Az elektromos ellenállás, jele, kiszámítása, mértékegysége.

Az ellenállás és az áramerősség közti összefüggés vizsgálata azonos feszültség esetén.

A feszültség kiszámítása az ellenállásból és az áramerősségből. Az áramerősség kiszámítása az ellenállásból és a feszültségből.

Kiegészítő anyag

Fogyasztók és kapcsolók soros és párhuzamos kapcsolásával modellezhető technikai problémák.

A Volta-elem és a Leclanché-elem szerkezete.

Az áramforrás feszültsége és a rákapcsolt fogyasztók kivezetésein mért feszültségek közti összefüggés vizsgálata. A főágban és a mellékágakban mért áramerősségek közti összefüggés vizsgálata.

II. Egyensúly folyadékokban és gázokban (kb. 10 óra)

Törzsanyag

A nyomóerő hatásainak megfigyelése. A nyomás, jele, kiszámítása, mértékegységei.

A hidrosztatikai nyomás kísérleti vizsgálata.

Közlekedő edények.

Hajszálcsövesség.

Felhajtóerő a folyadékban, Archimédész törvénye. Folyadékban levő testre ható erők egyensúlya.

A levegő sztatikai nyomása. Felhajtóerő a levegőben.

Kiegészítő anyag

A nyomóerő kiszámítása a nyomásból és a nyomott felületből. A nyomott felület kiszámítása a nyomásból és a nyomóerőből.

A hidrosztatikai nyomás kiszámítása.

Gázok összenyomhatósága. Zárt térben levő gáz nyomásának és térfogatának összefüggése állandó hőmérsékleten (kvalitatíven).

Nyomáskülönbségen alapuló eszközök.

A magaslégköri és mélytengeri kutatások.

III. Mechanikai és hőerőgépek. A teljesítmény és a hatásfok (kb. 12 óra)

Törzsanyag

Az erő irányának és nagyságának megváltoztatása. Egyszerű gépek.

A forgatónyomaték, jele, kiszámítása, mértékegységei.

Az egyensúly feltétele emelőn.

A lejtő. Az egyensúlyhoz szükséges erő mérése, függése a hajlásszögtől (kvalitatíven).

A mechanikai energia szállítása; meghajtások. Erőgépek.

Hőerőgépek. A gőzturbina és a belső égésű motorok működésének fizikai alapjai.

A teljesítmény, jele, kiszámítása, mértékegységei.

A munka kiszámítása a teljesítményből és az időből; az idő kiszámítása a teljesítményből és a munkából.

A hatásfok, kiszámítása.

Kiegészítő anyag

A hengerkerék, az álló- és a mozgó csiga. Csigasor.

Az ék és a csavar. A lejtőszerű egyszerű gépek alkalmazásai.

A kétütemű robbanómotor működése.

A teljesítmény kiszámítása az erőből, útból és időből, ill. a sebességből és erőből.

8. Osztály

I. A testek mozgása (kb. 13 óra)

Törzsanyag

A hely és a mozgás relativitása.

A mozgások kvalitatív áttekintése. A sebességváltozás, a gyorsulás (kvalitatíven).

Az egyenesvonalú egyenletes mozgás, mennyiségi leírása.

A tehetetlenség törvénye. Az inerciarendszer alapgondolata.

A mozgásmennyiség. A mozgásmennyiség megmaradása ütközéskor.

A változó mozgás. Mozgás a súrlódási erő és a közegellenállási erő hatásakor.

A szabadesés, az állandó gyorsulás.

A körmozgás, a rezgőmozgás, a hullámmozgás, a hang kvalitatív dinamikai leírása.

Kiegészítő anyag

A Nap és más égitestek mozgása a Földhöz rögzített vonatkoztatási rendszerben. A Naprendszer, a bolygók mozgása a Naphoz rögzített vonatkoztatási rendszerben.

A mozgásmennyiség megváltozása és az erőlökés.

A gáz nyomásának értelmezése.

A közegellenállást befolyásoló tényezők.

Energiaterjedés rezgőmozgás és hullámmozgás esetén.

II. Fényjelenségek (kb. 8 óra)

Törzsanyag

A fénnyel kapcsolatos kölcsönhatási példák. A fény mint energiahordozó.

A fényforrások. A fény egyenesvonalú terjedése. A fény sebessége.

A fény visszaverődése. Párhuzamos fénynyaláb visszaverődése síktükörről, domború és homorú tükörről. A gyújtópont és a gyújtótávolság.

Tárgyak képe síktükörben, domború és homorú tükörben. A tükör által létrehozott kép tulajdonságai.

Fénytörés jelenségének megfigyelése levegő és víz határfelületén, párhuzamos falu üveglemezen, prizmán. Párhuzamos fénynyaláb áthaladása domború és homorú lencsén. A domború lencse gyújtótávolsága.

A domború lencse képalkotásai. A domború lencse főbb alkalmazási területei.

A fény felbontása prizmával. A szivárvány. A testek színe.

Kiegészítő anyag

Távolságok a világűrben.

A síktükör technikai alkalmazásai.

Gömbtükrök és lencsék képalkotásainak megszerkesztése.

Gyakorlati tudnivalók a vetítőgép és a fényképezőgép használatával kapcsolatban. A mozgófilm.

Az emberi szem. A szemüveg.

A mikroszkóp, a távcső.

Az ultraibolya és az infravörös sugárzás.

III. Az elektromos áram és hatásai (kb. 17 óra)

Törzsanyag

Vezető ellenállását meghatározó tényezők (hossz, keresztmetszet, anyag, hőmérséklet).

Sorosan kapcsolt fogyasztók eredő ellenállása (kvantitatíven), párhuzamosan kapcsolt fogyasztók eredő ellenállása (kvalitatíven).

Fogyasztók teljesítményének kiszámítása a feszültségből és az áramerősségből. Az elektromos fogyasztókon feltüntetett adatok értelmezése.

Elektromos fogyasztó által végzett munka kiszámítása.

Az elektromos áram hőhatása. Elektromos melegítő eszközök működésének fizikai alapjai, energetikai értelmezése. A fejlődő hő kiszámítása.

Az elektromos áram mágneses hatása. Az elektromágnes. Az áram mágneses hatásán alapuló eszközök: relé, elektromos mérőeszközök.

Kiegészítő anyag

A fajlagos ellenállás.

A feszültség eloszlása sorbakapcsolt fogyasztókon.

A fogyasztásmérő.

Az izzólámpa története.

Az áram mágneses hatásán alapuló eszközök: csengő, automata biztosító, egyenáramú motor.

IV. Az indukció és a váltakozó áram (kb. 10 óra)

Törzsanyag

Az indukált áram és feszültség. Az indukált feszültséget befolyásoló tényezők (kvalitatíven).

A váltakozó áram, előállítása.

A transzformátor, alkalmazása.

Kiegészítő anyag

Faraday munkássága. Az indukált áram iránya.

A szikrainduktor és az Ottó-motorok gyújtóberendezése.

Elektromos energiaátvitel. A háromfázisú vezetékrendszerrel kapcsolatos tudnivalók.

A mikrofon, a telefon, a magnetofon működésének fizikai alapjai.

Váltakozó elektromágneses tér kialakulása, az elektromágneses energia terjedése. Az elektromágneses sugárzások áttekintése.

A rádió, a televízió és velük kapcsolatos gyakorlati tudnivalók.

Az új tanterv előzetes kipróbálása, bevezetése

A tantervezet kipróbálása az 1975/76. tanévben folyt 10 osztályban (13). A végleges tanterv és az új tankönyv kipróbálása az 1976/77. tanévben kezdődött meg 15 hatodik osztályban. Az új tankönyvet a Juhász Gyula Tanárképző Főiskola fizika tanszékének munkaközössége készíti. Az első megfogalmazást sokszorosított formában, tankönyvpótló jegyzetként kapják meg a tanulók. E jegyzet elkészítése és a tanterv kipróbálása az OM és a MTA Köznevelési Bizottságának égisze alatt folyik.

Az új fizikatanterv 1978-ban lép életbe a 6. osztályban.

Hivatkozott irodalom:

1. A Magyar Tudományos Akadémia Állásfoglalásai és Ajánlásai a Távlati Műveltség Tartalmára és az Iskolai Nevelőtevékenység Fejlesztésére. (MTA, Bp. 1976.) 109—182. lapok
2. *Gergely P.—Mezei M.—Varga L.—Zátonyi S.:* Követelményrendszer. Általános iskola. Fizika 6—8. osztály. (Tankönyvkiadó, Bp. 1975)
3. *Gergely P.—Mezei M.—Varga L.—Zátonyi S.:* Témaközi és témazáró feladatlapok. Fizikai 6.,7., 8. osztály (Tankönyvkiadó, Bp. 1974)
4. *Varga L.:* Munkafüzet a tanulói kísérletekhez. Fizika 6., 7., 8. osztály (Tankönyvkiadó, Bp. 1973, 1974, 1975)
5. *Pápai Gy.-né—Smidéliusz Zs.—Zátonyi S.:* Fizika az általános iskolák 8. osztálya számára. Kísérleti tankönyv (OPI, Bp. 1974)
6. *Pápai Gy.-né:* A tanulók mechanikai előismereteinek vizsgálata (A Fizika Tanítása, 1973, 6. sz.)
7. *Tóth K.:* A tanulók hőtani előismeretei. (A Fizika Tanítása, 1974, 1. sz.)
8. *Zázonyi S.:* Általános iskolai tanulók előismereteinek vizsgálata. (Pedagógiai Szemle, 1975, 9. sz.)
9. *Zátonyi S.:* A tanulók elektromosságtani előismereteinek vizsgálata. (A Fizika Tanítása, 1973, 5. sz.)
10. *Varga L.—Zátonyi S.:* Az általános iskolai témazáró feladatlapokkal végzett vizsgálat eredményei I—III. (A Fizika Tanítása, 1974, 4—5. sz. és 1975, 1. sz.)
11. *Veidner J.:* Standardizált témazáró tesztek. Fizika, általános iskola 6. osztály. (JATE Pedagógiai Tanszéke, Szeged 1975)
12. *Varga L.—Zátonyi S.:* A tantervi javaslatra beérkezett véleményekből. (A Fizika Tanítása, 1976, 2. sz.)
13. *Zátonyi S.:* Az általános iskolai tantervtervezet kipróbálásának tapasztalataiból. (A Fizika Tanítása, 1976, 3. sz.)

Gimnázium

A gimnáziumi új fizika tanterv kidolgozásának körülményeire vonatkozóan utalunk az általános iskolai új fizika tantervről megjelent ismertető bevezető részére. A gimnáziumi tanterv is az OPI-ban készült, tantervi munkabizottság közreműködésével, és ugyanazokon a bírálatokon ment keresztül mint az általános iskolai. A gimnáziumi tanterv tervezetének vitáit, bírálatait szintén a MTA Elnökségi Közoktatási Bizottságának Természettudományi Albizottságával folytatott egyeztetés zárta le. Ennek az egyeztetésnek a során az Albizottság képviselői a részletekre vonatkozó javaslatokon túl teljes tervezetet is átnyújtottak a II. osztály tananyagára (Dede Miklós és Holics László munkája). Ezt a tervezetet szinte változtatás nélkül átvettük, mivel megfelelt a megelőző társadalmi bírálatok főbb kívánságainak és a saját fölfogásunkat is jól tükrözte.

A tanterv főbb új vonásai

Pedagógiai szempontból a gimnáziumi tantervben is ugyanazok a törekvések érvényesülnek mint az általános iskolaiban; a tananyag súlyozása (kiegészítő anyag, törzsanyag) is ugyanaz.

Szakmai szempontból az I. és a IV. osztály tananyagában található a legtöbb újítás.

Az I. osztály tananyaga a maga egészében új, mivel a gimnáziumban eddig nem tanítottunk fizikát az I. osztályban. Az I. osztály tananyagának kialakításában a következő főbb szempontokat tartottuk szem előtt.

A tapasztalat szerint eléggé számottevő különbségek vannak az I. osztályba érkező tanulók fizika- és matematikatudása között. Ezzel még hosszabb ideig számolnunk kell. Tehát az I. osztályos fizikának be kell töltenie az egy szintre hozás feladatát is.

Az I. osztályban nyújtott matematikai képzés (az általános iskolai előzményekkel együtt) nem teszi lehetővé, hogy komolyabb (a négy alapműveleten és az elsőfokú egyenlet rendezésén túlmenő) igényeket támaszthassunk a fizikai jelenségek matematikai leírásában.

Minthogy az I—IV. osztályban a fizika összes óraszáma változatlan maradt, és mivel nem látjuk járható útnak, hogy a jelenlegi (tehát a tananyagcsökkentés következtében redukált) tananyagot érdemlegesen tovább csökkentsük, ezért olyan fejezeteket kell feldolgoznunk az I. osztályban, amelyek érdemleges tehermentesítést jelentenek a II.—IV. osztály szempontjából.

További, és nem utolsó szempont, hogy amennyire csak lehet, már az I. osztályban segítenünk kell a rokon tantárgyakat, elsősorban a kémiát.

Több változat megvitatása után végülis az látszott a leginkább járható útnak, hogy súllyal hőtani és egy szerényebb elektrosztatikai fejezet kerüljön az I. osztály tananyagába. (Ezt követően hőtani jelenségekre már csak a IV. osztályban térünk vissza, de statisztikus fizikai alapon, az elektromosságtan pedig a III. osztályban folytatódik és fejeződik be.) Lényeges különbség az eddigiekhez viszonyítva, hogy az I. osztályba tett fizikai fejezeteket anyagszerkezeti megközelítésben (lényegében golyómodell alapján) dolgozzuk fel.

A II. osztály tananyaga teljes egészében mechanika. A III. osztályban van az elektromosságtan, a IV. osztály tananyagában pedig újdonság a Statisztikus fizika elemei és a Szilárdtestfizika elemei c. fejezet. (Az utóbbiba kerültek a félvezetők.)

A fizika gimnáziumi új tantervének megítéléséhez igen fontos tudnunk a következőket. A gimnázium eddig egyértelműen a továbbtanulásra volt beállítódva. Ennek következtében a gimnáziumi érettségi bizonyítványnak nem sok hasznát vették azok a tanulók, akik nem tanulhattak tovább. (Többek között ennek következtében jár ma több tanuló szakközépiskolába mint gimnáziumba.) A gimnázium mostani reformjával el szeretné érni az Oktatási Minisztérium, hogy a tovább nem tanuló gyerekek számára a jelenleginél több gyakorlati haszna legyen a gimnáziumnak, vagyis hogy kapjanak ezek a tanulók valamilyen gyakorlati képzést, amennyire a gimnáziumban ez egyáltalán lehetséges. E két cél (a továbbtanulás és az érettségi utáni munkábaállás segítésének) elérését szolgálja a fakultatív rendszer bevezetése a gimnáziumban. Kissé leegyszerűsített fogalmazásban ez azt jelenti, hogy minden tanuló kap egy egységes alapképzést minden tantárgyban és négy éven keresztül. Emellett a III. és a IV. osztályban még további időkeretben (heti 7 ill. 9 órában) kap felkészítést a továbbtanulásra vagy valamilyen gyakorlati pályára a saját választása szerint.

Az alább ismertetésre kerülő fizika tananyag az alapképzésbe tartozó tananyag, vagyis amit minden tanulónak tanulnia kell (az ún. mindenki fizikája). A továbbtanulni szándékozók ezen túl még heti kb. 2 ill. 3 órában tanulhatnak fizikát a III. ill. a IV. osztályban.

Az óraterv

A fentebbiek után az óratervhez csupán annyi megjegyzés kívánkozik még, hogy a II. osztályban látható heti 2 fakultatív óra általános pályaorientálásra fordítódik. Továbbá egy a fizikára vonatkozó megjegyzés: az I. és a II. osztály tananyagát és tanítási módszereit úgy kell kialakítanunk, hogy minél több tanuló válassza fakultatívan is a fizikát a III. és a IV. osztályban; ez létkérdéssé is válhat a számunkra.

	I.	II.	III.	IV.
Matematika	5	4	3	3
Földrajz	3	2	—	—
Fizika	2	2	3	3
Kémia	2	4	—	—
Biológia	—	—	4	2
Technika	2	2	—	—
Fakultatív órák	—	2	7	9

A TANANYAG

I. osztály

I. Bevezetés

(kb. 2 óra)

A természet megismerési módszerei: megfigyelés, kísérlet, modellalkotás.

A gáz, a folyadék és a szilárd anyag eddig megismert tulajdonságai.

II. Mechanikai és termikus kölcsönhatások

(kb. 32 óra)

Törzsanyag

1. Gáz és állapotváltozásai

Brown-mozgás, diffúzió. Az ideális gáz kinetikai modellje, a Brown-mozgás, a diffúzió, a nyomás kvalitatív értelmezése.

Állapotváltozás állandó térfogaton, a nyomásváltozás energetikai értelmezése a kinetikai modell alapján, a gáz belső energiája, a fajhő, az izochor állapotváltozás energiamérlege. A nyomás és a hőmérsékletváltozás közti összefüggés.

Állapotváltozás állandó nyomáson, a térfogati munka, energiamérleg, fajhő. A térfogat- és a hőmérsékletváltozás közti összefüggés.

Állapotváltozás állandó hőmérsékleten, energiamérleg. A nyomás és a térfogat kapcsolata.

Egyesített gáztörvény. Az abszolút hőmérsékleti skála.

2. Folyadék

A folyadék egyszerű anyagszerkezeti modellje. Folyadék külső erőhatás alatt. A hidrosztatikai nyomás, a felhajtóerő. Felületi feszültség. Folyadék részecskeátmérőjének becslése folyadékhártya szétterülése alapján.

Folyadék hőtágulása.

3. Szilárd test

A szilárd test egyszerű anyagszerkezeti modellje. Rugalmas alakváltozás. Szilárd test hőtágulása.

4. Halmazállapotváltozások

A halmazállapotváltozások értelmezése anyagszerkezeti modell alapján. A halmazállapotváltozások energiamérlege. Olvadáshő, párolgáshő, forráshő.

Kiegészítő anyag

A parciális nyomás. Gázok állapotegyenlete. Az adiabatikus folyamat.

Folyadék részecskeátmérőjének megállapítása a felületi feszültség alapján. Felületi energia. Görbületi nyomás, kapillaritás.

Feszültségek szilárd testben, anyagi állandók.

III. Elektromos kölcsönhatások

(kb. 6 óra)

Törzsanyag

Elektromos állapot, vonzás taszítás. Az elektromos állapot anyagszerkezeti értelmezése. Coulomb törvénye, az elektromos töltés.

Az elektromos áram anyagszerkezeti értelmezése; anyagkiválasztás elektromos úton; az elemi töltés.

Kiegészítő anyag

Az elemi töltés mérése.

II. osztály

(heti 2, évi 64 óra)

I. A pontszerű test mozgásának leírása

(kb. 13 óra)

Törzsanyag

1. Egyenesvonalú mozgások

Vonatkoztatási rendszer. Egyenletes és egyenletesen változó mozgás (út- és sebességfüggvény, gyorsulás, a szabadesés mint speciális eset).

2. Mozgás síkgörbén

Egyenletes és egyenletesen változó körmozgás (szögelfordulás, szögsebesség, szöggyorsulás, pályamenti és centripetális gyorsulás).

Kiegészítő anyag

Tetszőleges mozgás diagramjának vizsgálata.

Állandó gyorsulásvektorú mozgások (hajítások). Vetületi pontok mozgása körmozgásnál és hajításnál. A lövedék pályája.

II. Impulzus, Newton törvényei

(kb. 14 óra)

Newton I. törvénye, inerciarendszer, az erőhatás (kvalitatív fogalma). A tömeg mint testek tehetetlenségének kölcsönhatásban megmutatkozó mértéke; impulzus megmaradás. Az erő mennyiségi értelmezése. Erőtörvények (rugalmas, gravitációs, elektromos és mágneses erők; hiányos erőtörvények: kényszererő, súrlódás).

Newton II. törvénye.

Erőhatások függetlensége, A dinamika alapegyenlete. Anyagi pont egyensúlya mint speciális eset.

Kiterjedt testek és pontrendszerek: tömegközéppont-tétel, impulzus-tétel, az impulzus megmaradásának tétele.

Kiegészítő anyag

Közegellenállás.

A kényszererők molekuláris értelmezése.

Egyszerű mozgások dinamikai leírása. Kepler törvényei. Reaktív hajtóművek.

Térfogati és felületi erők, feszültség és nyomás.

Súlytalanság.

III. Mechanikai energia energia és munka

(kb. 6 óra)

Törzsanyag

Munkatétel, munka, kinetikai energia. Potenciális energia (rugalmas és gravitációs), kölcsönös kötési energia. A mechanikai energia megmaradása.

Kiegészítő anyag

Konzervatív és nem konzervatív erők. Rugalmas és rugalmatlan ütközés.

IV. Forgásmennyiség, a forgómozgás

(kb. 7 óra)

A forgómozgás dinamikai alaptörvénye (forgatónyomaték és szöggyorsulás, tehetetlenségi nyomaték). Erőrendszer helyettesítése forgatónyomaték szempontjából is egyenértékű erőrendszerrel; súlypont.

Merev test egyensúlya. Forgás energia. Forgásmennyiség, a megmaradása.

Kiegészítő anyag

A tömegmérés elve karos mérleggel. Munkatétel forgó merev testre.

III. osztály

(heti 3, évi 96 óra)

I. Mechanikai rezgések és hullámok

(kb. 16 óra)

Törzsanyag

1. Harmonikus rezgés

A harmonikus rezgőmozgás kinematikai és dinamikai leírása. Saját rezgés, gerjesztett rezgés, rezonancia.

2. Hullámmozgás

Rezgési állapot terjedése egyenes mentén és kiterjedt közegben. Transzverzális és longitudinális hullám. A hullámhossz, a frekvencia és a terjedési sebesség összefüggése.

A hang, a hangsebességi határ és a vele kapcsolatos jelenségek.

Hullámterjedés két közeg határán; visszaverődés, törés. Hullámterjedés akadály mentén, elhajlás.

Huygens-elv, interferencia, állóhullám. Polarizáció.

Kiegészítő anyag

Egy egyenesbe eső rezgések összetétele. Csillapodó harmonikus rezgés.

Doppler-effektus

Az ultrahang.

II. Fényjelenségek

(kb. 8 óra)

Törzsanyag

A fény mint transzverzális hullám (polarizáció). Visszaverődés és törés. Interferencia. Elhajlás résen és rácson. Színkép. Színképelemzés.

Kiegészítő anyag

Optikai aktivitás, gyakorlati vonatkozások.

A visszaverődéssel és a töréssel kapcsolatos jelenségek geometriai leírása.

Vöröseltolódás.

III. Elektromágneses jelenségek

(kb. 36 óra)

Törzsanyag

1. Az elektrosztatikai mező

Elektrosztatikai vektormező (térerősség, erővonalak). Az elektrosztatikai saklár mező (potenciál, elektromos feszültség).

Elektromos megosztás. Kapacitás, kondenzátorok

2. Az elektromos egyenáram

Az elektromos áram. Balesetvédelmi tudnivalók.

Ohm törvénye vezető szakaszra, az ellenállás. Ohm törvénye teljes áramkörre.

Az áram hőhatása, munkája, teljesítménye.

Áram folyadékban, Faraday törvényei.

Áram gázban és vákuumban; Edison- és Hallwachs-effektus; katódsugárzás.

3. A mágneses tér

A mágneses mező. Egyenáram mágneses tere.

Mágneses mező hatása egyenes áramvezetőre. Mágneses mező hatása elektromos töltésre.

Az elektromágneses indukció, önindukció.

4. A váltakozó áram

A váltakozó feszültség keletkezése és leírása (effektív értékek). Elektromos energiaszállítás, transzformátor.

A lakás villamos hálózata; balesetvédelem.

A váltakozó áram teljesítménye, munkája ohmos ellenálláson.

5. Elektromágneses rezgések és hullámok

Az elektromágneses rezgés; a gerjesztett elektromágneses rezgés.

A gyorsuló elektron tere.

Elektromágneses hullámok keletkezése és terjedése. A fény mint elektromágneses hullám. A teljes elektromágneses színkép.

Kiegészítő anyag

Ekvipotenciális felületek. Vezetők és szigetelők az elektrosztatikus mezőben. A síkkondenzátor kapacitása; kondenzátorok kapcsolása.

Ellenállások eredője. Hurok- és csomóponti törvények. Dióda, trióda, fotocella. Katódsugárcső. Fényerősítő. Fényelem.

Ellenállások a váltakozó áramú áramkörben.

Csillapított elektromágneses rezgés. Rezgéskeltés triódával, a visszacsatolás elve. Moduláció; a rádió adás és vétel. A radar.

IV. osztály

(heti 3, évi 84 óra)

I. A statisztikus fizika elemei

(kb. 8 óra)

Törzsanyag

Ideális gáz nyomásának kiszámítása a kinetikai modell alapján. Ideális gáz állapotegyenlete. Gázmolekulák- sebesség- és energiaeloszlása. Az energia egyenletes eloszlása.

Belső energia, Az I. főtétel.

A termodinamikai valószínűség. A II. főtétel (a valószínűségi jellegű törvény). Az entrópia. Termodinamikai egyensúly.

Kiegészítő anyag

Gázok fajhője. Hőgépek. A Maxwell—Boltzmann-féle sebességeloszlási törvény.

II. A héjfizika elemei

(kb. 16 óra)

Törzsanyag

Az elektron duális természete, elektronelhajlás katódsugárcsőben. Elektron a hidrogénatomban.

Kiegészítő anyag

Az elektron hullámhossza, hullámcsomag, határozatlanság.

A periódusos rendszer felépülése; a vegyérték fizikai értelmezése; kémiai kötések fizikai értelmezése. Hidrogénhíd. A Van der Waals-féle kölcsönhatása. Másodlagos kötések, makromolekulák.

III. A szilárdtestfizika elemei

(kb. 10 óra)

Törzsanyag

A szilárdtest fogalma. Kristályszerkezetek, szerkezetvizsgálatok, rácshibák és mechanikai tulajdonságok.

Szilárdtestek elektromos tulajdonságai a sávelmélet alapján. Félvezetők. A *pn*-átmenet; félvezető kapcsolási elemek egyenáramú áramkörben.

Kiegészítő anyag

Rácsrezgések, hőtani tulajdonságok. Optikai tulajdonságok. Ferromágnesség.

IV. A magfizika elemei

(kb. 10 óra)

Atommag és elektronfelhő. Proton és neutron; izotópok. Radioaktív bomlások. Maghasadás, mesterséges radioaktivitás.

Magenergia, tömegdefektus. Gyorsítók, atommagátalakiás.

Az atomenergia békés és katonai felhasználása.

Kiegészítő anyag

Felezési idő, bomlási állandó. Magmodellek. A neutron instabilitása. Elemi részecskék. Párkeltés. Antirészecskék, antianyag.

V. A csillagászat elemei

(kb. 10 óra)

Törzsanyag

A Naprendszer. Az űrkutatás jelentősége és eredményei.

A Nap sugárzása, csillagok energiaforrása. Az Einstein-féle tömeg-energia ekvivalencia és jelentősége.

Az Univerzum méretei.

A Naprendszer kialakulása és a földi élet létrejöttének feltételei.

A csillagok fejlődése.

Kiegészítő anyag

A Naprendszer megismerésének főbb állomásai.

A tanterv előzetes kipróbálása, életbe léptetése

A gimnáziumi új fizikatanterv kipróbálása az 1975/76. tanévtől folyik mintegy 30 osztályban (az OPI ún. fakultatív tantárgycsoportos oktatási kísérletének keretében). A jelen tanévben kezdjük meg az új tantervhez írt I. osztályos tankönyv egyes fejezeteinek kipróbálását. Az első osztály új tankönyvének teljes kipróbálását az 1977/78. tanévben kezdjük. Mintegy két tanévi előzetes kipróbálás után alakul ki a végleges tankönyv. Ezt az eljárást folytatjuk felmenő rendszerrel mind a négy osztályra vonatkozóan. Az előzetes kipróbálás egyúttal a tanterv további csiszolását is szolgálja.

Az új tanterv 1981-ben lép életbe (felmenő rendszerrel).

FIZIKAI TÁVMÉRŐK

Bölönyi György
Asztalos János gyakorló iskola Budapest

A geodéziában a helymeghatározás végrehajtásában fontos feladat a távolságok meghatározása. A hosszmérés mérőszalaggal a szabálytalan terepszinten nehéz feladat. A hosszmérés kezdeti problémáitól — mely elsőként az ókori Babilonban és Egyiptomban jelentkezett a földmérés (geodézia) területén — hosszú út vezetett a mai korszerű fizikai elven felépülő távmérőkig.

Kezdetben kötelet, mérőrudat — rudasmesterek is működtek —, lépést (pl. magyar királyi lépés), láncot stb. használtak a méréshez. Érdekes hosszmértékegységek is ismeretesek a korabeli időkből: árpaszem ujj, könyök, tenyér stb. Egyszerű hosszmérőeszközök ma is használatosak, pl. mezei körző, különböző mérőszalagok, mérőléc. Ezután alakultak ki a távmérésre mind pontosabb és pontosabb eljárások, melyekben a geometriai elveket, különösképpen a háromszög geometriáját mind precízebben használják fel, a kivitelezésben pedig a mérnöki leleményesség mind nagyobb szerephez jut. A tahiméterek ma is általánosan alkalmazott műszerek. A redukáló tahiméterek optikai úton alkalmasak két pont között a vízszintes távolság meghatározására, akkor is, ha a két pont között több méter nagyságrendű a magasságkülönbség. A geodéziában ugyanis mindig a vízszintes távolság meghatározása a feladat.

A geodézia és a rokon mérnöki szakterületen az ún. fizikai távmérők igen hasznosak a felső- és alsórendű háromszögelés munkálatainál, a rövid és hosszú oldalú sokszögeléseknél, a részletpontok felmérésének teendőinél és nagy fontosságúak a tervezett létesítmények kitűzésénél. Nagy fontosságúak e műszerek annak ellenére, hogy még nem tekintenek nagy szaktörténeti múltra vissza. A geodézia pontossági igényeit is kielégítő fizikai távmérőt 1954—56 években Dél-Afrikában (mikrohullámú távmérő, MRA-1) és 1943—48 években Svédországban (elektrooptikai távmérő) készítettek.

Az alábbi táblázatban bemutatom az ismertebb korszerű távmérőket és azok fontosabb adatait (1. táblázat).

A fizikai elven működő távmérőket két fő csoportra oszthatjuk:

a) rádiótávmérők (telluriométerek),

b) fénytávmérők (geodométerek, lézer távmérők).

Mindkét típusnál a távolságmérés hullámfizikai módszer (elektromágneses hullámok, fény alkalmazása). Közös alapelv szerint a távolságot T = idő x sebesség fizikai összefüggés alapján határozzák meg. Ismert a hullámhossz, a terjedési sebesség. A mérés tulajdonképpen időmérés, a nagy terjedési sebesség miatt közvetett úton.

A rövidség kedvéért a svájci Wild gyár Di-10 Distomat elektrooptikai távmérő műszerét ismertetem röviden. Ez a műszer talán a leggyakrabban és nagyobb példányszámban alkalmazott a hazai geodéziában, mint a többi típus.

A távmérő műszer felépítése (főbb egységek)

Irányzófej — melyet egy Wild T2 teodolitra helyezünk fel — a fényjel kisugárzását és vételét végzi. Az irányzófej tulajdonképpen egymás mellé épített galliumarzenid-diódás adóoptika mint fényforrás és szilicium fotodiódás vevőoptika.

Mérőegység — a teodolit állványa mellett kisebb állványon üzemel — tartalmazza az akkumulátort, az üzemeltető kapcsolót, a digitális kijelzőberendezést, elektronikus elemeket stb.

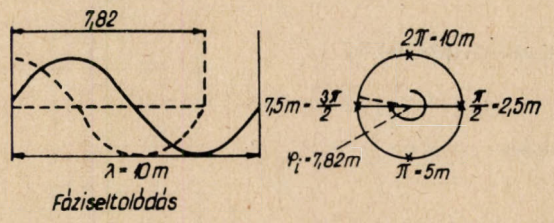
Reflektorok, a fényjelek visszaverését végző üvegprizmák teodolit állványra szerelve.

A mérés módja

A műszert a mérendő távolság kezdőpontjára állítjuk, ezzel egyidejűleg a reflektort a segéderő elhelyezi a végponton. Az irányzófej infravörös sugarat bocsát a reflektorra, mely a fényt visszaveri a vevőoptikához. A műszerelemek manuális kezelése után a távolság számszerűen leolvasható a mérőegység kijelzőjén. A mérés kb. 1 perc időt igényel.

Néhány adat a műszer működési elvéről

A műszer kishatósugarú távmérő. A GaAs dióda szinuszgörbe alakú modulált infravörös sugarat bocsát ki. A távmérés fáziskülönbség meghatározásán alapszik. Alapfrekvencia $f_M = 14{,}98540$ MHz, aminek pontosan 20 m hullámhossz felel meg. A távolság $t = \frac{N\lambda_M}{2} + R$ képletből határozható meg (N a teljes hullámok száma, R a töredéktávolság). Az N meghatározásához az f_M kívül egy másik f_N frekvenciát alkalmazunk, értéke = 13,48686 (így $f_N = 0{,}9\, f_M$). A mérés automatizált, a kisebb f_N frekvencia folytonos változásával megy át az f_M mérőfrekvenciába. A fázisváltozás szolgál az N hullámszám meghatározására, eszerint a t közelítő értéke $N\frac{\lambda}{2}$, a finomítást az f_M frekvencián jelentkező fáziskülönbség alapján jelzi ki a műszer (R). A fázistolódást, amely tehát a mérendő távolsággal arányos automatikusan szervoberendezés méri. A mérőfrekvencia egy $\lambda/2$ félhullámhosszúságú léptéket állít elő a $\lambda = \frac{c}{f}$ összefüggés szerint (c = 300 000 km/szekundum). A lépték felosztását egy φ fázisszög leolvasás adja a λ hullámhossznak megfelelő 2π érték szerint (1. ábra).



A korszerű távolságmérés lehetőségeit a sportvilágban is alkalmazzák. A Müncheni Olimpián ilyen műszerrel (REG ELTA) mérték a dobások távolságát.

A fénykép az EOK 2000 távmérőt szemlélteti.

Távmérőtípus	GET-B1	GET-A2	KDG-3	LUCS Rádiótávmérő
Gyártó ország	Magyaro.	Magyaro.	Szovjetu.	Szovjetunió
Hatótávolság, km	50 km	50 km	2	200 m—40 km
A távmérés középhibája, cm	$\pm(5\text{ cm}+3\cdot10^{-6}\text{ D})$	$\pm(3\text{ cm}+2\cdot10^{-6}\text{ D})$	±2 cm	$\pm(3+3\cdot10^{-6}\text{ D})$ cm
Vivőhullám hossz, nm	10 cm	3 cm	infravörös 0,9	3,4 cm
Mérőfrekvencia, MHz		3 cm	30	8600—8900 vivőhull. frekvencia 10 mérőfrekvencia
Adó objektív ∅ mm				
Vevő objektív ∅ mm				
Fókusztávolság, mm				
A mérés módszere				
A fázistoló típusa				
A fázistoló kijelzése				
Egy mérés ideje, s			10	
Teljesítményfelvétel, W		3,8 A áramfelvétel 60 mW adóteljesítm.	5	80
A műszer súlya, kg	16	15 + 8	10	
Milyen hőmérsékleti határok között alk. C°		—40 — +50 sugárzó-egységnél —20 — +40 mérő-egységnél		
Szögmérő berendezés				
	rádiótávmérő	rádiótávmérő	fénytávmérő	rádiótávmérő

1. táblázat

Spectra Physics Geodolit 36	Elektrotope	MRA-101	Mekometer III.	Kern DKM 2-AL Lasertheodolit	Makometer Kern ME 3000
USA	USA	Anglia	Anglia	Svájc	Svájc
30	100	50 km	3 km	400 m	2—3 km
$\pm 0{,}1$ vagy $\pm 10^{-6}$ D	$\pm(1\text{ cm} + 3 \cdot 10^{-6}\text{ D})$	$\pm(1{,}5\text{ cm} + 3 \cdot 10^{-6}\text{ D})$	$\pm 0{,}01$ cm	50 m 3 mm 100 m 7 mm 400 m 27 mm	$\pm 0{,}2$ mm $\pm 1 \cdot 10^{-6}$D
632,8 (laser)	3 cm	3 cm			
50				Csak a távmérés-sel kapcsolatos adatai a teodolotnak	
25					
203					
800					
manuális					
rezolver					
digitális					
40					ca. 2 min.
56	11,5	8,0			
$-30 - +50$					
van (60″)					
fénytávmérő	rádiótávmérő	rádiótávmérő	fénytávmérő	teodolit fénytávmérő	fénytávmérő

Távmérőtipus	AGA 6	AGA 6A	AGA 8	Wild DI 10
Gyártó ország	Svédország	Svédország	Svédország	Svájc Franciaország
Hatótávolság (nappa), km	normál izzólámpa esetén 3	normál izzólámpa esetén 3	30	1
A távmérés középhibája, cm	$\pm(1+2 \cdot 10^{-6}$ D)	$\pm(0{,}6+10^{-6}$ D)	$\pm(0{,}5+10^{-6}$ D)	± 1
Vivőhullám hossz, nm	550	550	632,8 (laser)	875
Mérőfrekvencia, MHz	30	30	30	13,5—15
Adó objektív ∅ mm	koaxiális	koaxiális	sugárátmérő 2 cm	70
Vevő objektív ∅ mm	105	105	divergencia 0,1 m/km	70
Fókusztávolság, mm	600	600	600	80
A mérés módszere	manuális	manuális	manuális	automatizált
A fázistoló típusa	rezolver	rezolver	rezolver	rezolver
A fázistoló kijelése	digitális	digitális	digitális	digitális
Egy mérés ideje, s	420	420	420	60
Teljesítményfelvétel, W	24—30	24—30	60	10
A műszer súlya, kg	16,3 telep nélkül	16,3 telep nélkül	23 telep nélkül	17,3 telep nélkül
Milyen hőmérsékleti határok között használható, C°	—40 — +40	—40 — +40	—25 — +40	—25 — +50
Szögmérő berendezés	nincs	nincs	nincs	van (1" leolv.)
	fénytávmérő	fénytávmérő	fénytávmérő	fénytávmérő

1. táblázat

Wild Distomat 50	Fennel Adisto S 2000	Zeiss REG ELTA	Zeiss SM 11	Zeiss Jena EOK 2000	Telluróméter MA 100
Svájc	NSzK	NSzK	NSzK	NDK	Egyesült Királyság Dél-Afrika
120	2	2	2	2	2
$\pm(2\text{ cm}+10^{-6}\text{ D})$	±1	±1	±1	±1	$\pm(0{,}15+2\cdot10^{-6}\text{ D})$
3 cm	900	920	920	910	920
	0,075; 7,5	15	15	30	75
	40	koaxiális	koaxiális	84	koaxiális
	40	120	120	370	175
		400	400		120
	manuális	automarizált	automatizált	manuális	manuális
				goniométer	rezolver
	digitális (Nixie)	digitális (kódolható)	digitális	skála	digitális (Nixie)
	60	30	20	60—90	6
	20	20	18	8	20
20	12,5	16,5	12	12 tel. nélkül	15,4 tel. nélkül
	—30 — +60			—30 — +45	—20 — +55
	van (1" leolvasóképesség)	van (3")	nincs	nincs	nincs
rádiótávmérő	fénytávmérő	kombinált műszer fénytávméréssel	fénytávmérő	fénytávmérő	rádiótávmérő

ESEMÉNYEK

MIKOLA-DIJASOK

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat 1961-ben díjat alapított a minél eredményesebb fizikatanítás előmozdítása és az azt elősegítő fizikai didaktikai munkásság serkentése, támogatása céljából. A díjat *Mikola Sándor*ról, a kiváló fizikatanárról és a kísérleti fizikatanítás úttörőjéről és mesteréről nevezte el. A díjak kiosztása a tanári ankétokon történik. Az alábbiakkal 26-ra növekedett a kitüntetettek száma.

Mikola-díj 1976-ban:

Dr. Nagy Mihály. fizika-kémia-szakos tanári oklevelét a debreceni Kossuth Lajos Tudomány Egyetemen 1959-ben szerezte, azóta a debreceni Református Kollégium gimnáziumának tanára. Harmonikusan egyezteti oktatói munkáját tudományos tevékenységével. Jó tanári munkájának eredménye, hogy sok tanítványa került a tanulmányi versenyek döntőjébe, illetőleg ért el pályázatával helyezést. A tanári munkája mellett a radioaktív nyomdetektoros vizsgálat specialistájává képezte magát. Doktori szakdolgozatán kívül a saját szakterületéről és annak az oktatásban való felhasználásáról 13 magyar, illetőleg angol nyelvű publikációja jelent meg. Lapunk számára írt közleményével 1971-ben a nívó-díjat nyerte el. 1970 óta több fizikatanári ankéton, hazai és nemzetközi konferencián tartott értékes előadást. Munkássága eredményeit 1970 óta mind a fizikatanári ankétok eszközkiállításain, mind pedig számos helyi és országos oktatási, illetőleg újító-kiállításon tárta az érdeklődők elé. Kísérletek a radioaktívitás és a maghasadás köréből című kétrészes diafilmjét tanítási segédanyagnak készítette. Részt vesz az Anyagszerkezet tantárgy oktatásának kimunkálásában.

Horváth Margit a kaposvári Munkácsy Mihály gimnázium matematika-fizika-szakos tanára. Oklevelét 1962-ben szerezte. Eleinte inkább a matematika tanításában ért el sikereket. Következetes tanári munkájának tulajdonítható, hogy továbbtanulásra jelentkező tanítványai felvételt nyernek. Szívesen vesz részt továbbképzéseken, amelyeknek és jó fizikatanári munkaközösségüknek eredménye, hogy az utóbbi éveiben tanítványaival a fizikát tudja jobban megszerettetni. Követésre méltó az a terve, hogy a Fizikai Szemle hőtani tárgyú cikkeit összegyűjti, feldolgozza és azt oktatói felhasználásra közzéteszi.

Cs. Á.

Czeglédy Sándor
1942—1976

Még igazán ki sem teljesedett, s már félbe is szakadt az a pálya, amely oly ígéretesnek indult fizikusi életében.

1965-ben végzett a Kossuth Lajos Tudományegyetem fizikus szakán, és ugyancsak 1965-től tagja a Társulatnak, majd a Magfizika és Alkalmazási Szakcsoportnak. Pár hónapig Budapesten a Méréstechnikai Központi Kutató Laboratóriumban dolgozott, majd szülővárosában, Debrecenben az Atommag Kutató Intézet lett hosszú időre a munkahelye. Kutatási tevékenysége, érdeklődése az ólomhalogenidek lumineszcenciatulajdonságainak vizsgálatára irányult, és e témakörben készítette el és védte meg egyetemi doktori értekezését 1969-ben. Néhány éven át mint előadó az egyetemi oktatás munkájában is résztvett. Egy évet töltött Angliában, Hull Egyetemén az ólom különböző vegyületeinek lumineszcenciatulajdonságait kutatta. Eredményeit rövid formában a leningrádi Lumineszcencia Konferencia anyagában ismertette.

Az ezt követő évek hosszú, súlyos betegségének kezdeti évei. 1973 decemberétől új munkahelyén, a MEDICOR Művekben mint sugármérnök tele van tervekkel, elképzelésekkel, amelyeket sajnos — Ő még nem tudja — sohasem valósíthat meg. Élete utolsó percéig a tudományos kutatómunkába való visszatérés reménye éltette.

Emlékét a Társulat debreceni Csoportja, kollégái és jóbarátai kegyelettel őrzik.

F. J.



Publikációk jegyzéke

Lens Characteristics for Electrode Systems Used in Acceleration Tubes, Nuclear Instruments and Methods, *37*, 179—80 (1965) Koltay Edével közösen.

Optical Diagrams for Electrostatic Lenses Applied in High Voltage Accelerators, Acta Physica Hung., *20*, 341—350 (1966). Koltay Edével közösen.

Ólomklorid egykristályok előállítása olvadékból, ATOMKI Közlemények, *10*, 138—143 (1968).

Ólomklorid egykristály előállítása és alacsony hőmérsékleti radiolumineszcenciájának vizsgálata. Egyetemi doktori értekezés, Debrecen, 1969 MTA Atommag Kutató Intézete, 117 p.

Az ólomklorid kék színű radiolumineszcenciája alacsony hőmérsékleten, ATOMKI Közlemények, *12*, 1—3 (1970). Karvaly Bélával és Pintér Ferenccel közösen.

The Radioluminescence of Lead Chloride Acta Phys. Hung., *28*, 121—123 (1970).

A csatorna- és lezárási effektus alkalmazásai (Irodalmi összefoglalás), Atomtechnikai Tájékoztató *13*, 473—478 (1970).

Thermoluminescence of Ce-Activated Lead Chloride Single Crystals, Zeitschrift für Physikalische Chemie, *73*, 184—187 (1970). Félszerfalvi Jánossal és Sámsoni Zoltánnal közösen.

Luminescence and Related Optical Characteristics of Mixed. Lead Halides and of Lead Monoxide and Lead Oxychloride, International Conference on Luminescence, Abstracts, p. 65. Chernogolovka, Leningrad, 1972. B. G. Lele és G. F. J. Garlick-kal közösen.

A III. Magyar Magfizikus Találkozóra a Magyar Tudományos Akadémia Magfizikai Albizottsága és az Eötvös Loránd Fizikai Társulat Magfizikai és Alkalmazási csakcsoportja szervezésében 1976. augusztus 23—27. között került sor. Az ötnapos találkozó egy olyan összejövetel volt, amelyen a magfizikai alapkutatással és a magfizika alkalmazásaival foglalkozó kutatók vettek részt, akik beszámoltak egyrészt az utóbbi években elért eredményekről, másrészt a jelenleg folyamatban levő munkákról, azok alkalmazási lehetőségeiről és az alkalmazások során szerzett tapasztalatokról.

A találkozón az ország tíz intézetéből ATOMKI, BME Tanreaktora, BME Fizikai Intézet, ELTE Atomfizika Tanszék, ELTE Elméleti Fizikai Tanszék, KFKI, KLTE Kísérleti Fizikai Intézet, MTA Izotóp Intézet, OMH, Szegedi Biológiai Központ Biofizikai Intézet — mintegy száz részt vevő jelent meg. Az elhangzott előadások száma meghaladta a hatvanat, melyek a következő témák köré csoportosultak: magspektroszkópia, a magreakciók kísérleti és elméleti vizsgálata, elméleti magfizika, termonukleáris kutatások, nukleáris atomfizika, a magfizikai módszerek alkalmazása és nukleáris elektronika. A felsorolt területeken nemcsak az elért eredmények ismertetésére került sor, hanem az eredmények eléréséhez szükséges új berendezésekről és azok legfőbb jellemzőiről is. Az elhangzott nagyszámú előadás mégsem tette a találkozót kongresszus jellegűvé, formálissá. A beszámolók érdekesek, jól átgondoltak voltak, melyet bizonyít a nagyszámú hallgatóság állandó jelenléte és az előadások után kialakult vita.

A találkozó megmutatta még azt is, hogy a magfizikai alapkutatás során elért kiemelkedő eredmények alapvetően szükségesek ahhoz, hogy azokat a tudomány és a technika más területén sikerrel lehessen alkalmazni.

A találkozó zökkenőmentes megtartásáért a rendelkezésre bocsátott előadó teremért ezúton is köszönetet mondunk a Bács-Kiskun Megyei Művelődési Központ vezetőségének.

K. B

VÉLEMÉNYEK

EGY HIBÁS FOGALOMALKOTÁS KÖVETKEZMÉNYEI; EGY VERSENYFELADAT TANULSÁGA

Isza Sándor
Kossuth Lajos Tudományegyetem Debrecen
Kísérleti Fizika Tanszék

A cikk tárgyát képező 1975/76. évi Országos Középiskolai Tanulmányi Verseny első fordulójában szereplő 4. fizikafeladat hivatalos megoldását elemző szakmai véleményem kifejtése előtt feltétlenül szükségesnek érzem előrebocsátani, hogy a megoldás súlyos szakmai és didaktikai hibái nem általában jellemzőek a versenyfeladatokat összeállító és az azok hivatalos megoldását jóváhagyó bizottságok tevékenységére. A tanulmányi versenyek, azok helyes pedagógiai célkitűzéseinek megfelelően az élvonalbeli ifjúságnak nemes erőpróbát biztosítva általában betöltik szemléletfejlesztő szerepüket. *Három szempont teszi mégis indokolttá az adott esetnek ezen a helyen és az alábbi formában történő nyilvánosságra hozatalát:*

1. A versenyt lebonyolító iskoláknak központilag megküldött hivatalos javítási útmutató számszerű eredményében hibás megoldása, gondolatmenetében egyértelműen téves feladatmegoldási rutinokat tartalmazó és újabb ilyeneket szülő meggondolásai a hivatalos jellegből adódóan egy már egyébként is élő, káros fizikai szemléletmód továbbterjedését segítik elő.

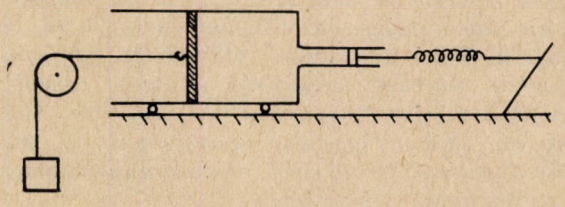
2. Ezek a hibák az oktatási és azon kívüleső feladatokkal már amúgy is túlterhelt középiskolai tanárokat meg nem engedhető külső és belső konfliktus-helyzetbe kényszerítik.

3. Az értékelési útmutató tévedései a versenyben nemkívánatos kontraszelekciót hozhattak létre.

Szakmai véleményem minden kétértelműséget kizáró, keményhangú megfogalmazását azért látom szükségesnek, hogy az Olvasó fizikai tartalmat hordozó állítások alapján foglalhasson állást abban a vitában, amely nyilvánosság részére írott, de meg nem jelentett cikkek formájában a versenyt követően kialakult. Kiemelten hangsúlyozom tehát, hogy véleményemet fizikai törvényekre és arra a nézetre alapozom, mely szerint a nehezen áttekinthető helyzeteket az oktatás folyamatában lehet, sőt szükségszerű részleges igazságtartalmú modellekkel helyettesíteni, de nem megengedhetőek azok a modellek, melyeknek igazságtartalma egyáltalán nincs, továbbá azok, melyek a vizsgált jelenségnek éppen azt a részét nem írják le helyesen, amelyre alkalmazni kívánjuk őket.

A szóbanforgó versenyfeladat szövege: Hengeres edény szélesebb részének 5 cm², keskenyebb részének 1 cm² a keresztmetszet területe. A dugattyúk és a görgők súrlódás nélküliek. A kis dugattyút rugóval erősítettük egy cövekhez. Mit figyelhetünk meg, ha a horogra 1 kg tömegű testet akasztunk? A légnyomás 1 kp/cm² *(lásd 1. ábra).*

A feladat hivatalos megoldása: Kezdetben egyensúly van, a nagy dugattyút belülről és kívülről 5 kp, a kis dugattyút belülről és kívülről 1 kp erő nyomja, mert a nyomás a hengerben is 1 atm. A henger jobb oldalán található 4 cm² nagyságú körgyűrű alakú területet belülről és kívülről 4 kp



1. ábra

erő nyomja. A rugó nyújtatlan. Az 1 kp súlyú test horogra akasztása után a nagy dugattyút 4 kp erő nyomja befelé. Az elzárt levegő kiterjed, amíg nyomása 0,8 atmoszféra lesz, mert ekkor nyomja a dugattyút belülről is 4 kp erő. De ha bent a levegő nyomása 0,8 atmoszféra, akkor a kis dugattyút tartó rugó megnyúlik, amíg a kívülről benyomó erő is egyenlő lesz a belülről nyomó 0,8 kp erővel. A 4 cm^2 területű körgyűrűt kívülről változatlanul 4 kp nyomja, de belülről csak 3,2 kp erő, tehát az egész henger elindul bal felé. Ha a henger balfelé mozdul el, a körgyűrű elmozdulása folytán kisebbedne a belső térfogat, amelynek azonban a 0,8 atm tartása folytán állandónak kell maradnia. Ezért a nagy dugattyú is elindul balfelé, de a területarány folytán csak a henger sebességének 80%-ával.

Útbaigazítás a pontozásra: ha a versenyző nem veszi észre a henger elmozdulását, akkor nem kaphat pontot; ha csak a henger elmozdulását veszi észre, akkor 1,5 pontot kap; 2 pont jár, ha a henger és a dugattyú elmozdulását tárgyalja.

A megoldás szakmai hibái:

1. A teher horogra akasztása után a nagy dugattyút nem 4 kp nagyságú erő nyomja befelé, hanem az indulás pillanatára szabott kezdeti feltételektől függő, a kötél által kifejtett, valamint a külső és belső nyomásból származó erők eredőjeként adódó, 4 kp-nál minden esetben nagyobb nagyságú erő.

2. A hengerbe zárt levegő nyomása tágulása folytán nem 0,8 atmoszféra egyensúlyi nyomásra csökken, hanem a feladat számszerűen meg nem adott adatainak bármely véges választása esetén 0,8 atmoszféránál nagyobb egyensúlyi nyomás körül az indítás pillanatára szabott kezdeti feltételektől függő amplitúdóval nemharmonikus rezgést végez. A teher tömegének nem elhanyagolható volta miatt a tágulás és az azt kísérő nyomáscsökkenés általában a 0,8 kp/cm^2 nagyságú nyomás elérése után is továbbfolytatódik, hiszen a teherre ható erők egyensúlya csak a teher-dugattyú rendszer gyorsulásának és nem sebességének nullára csökkenését eredményezi. A térfogatváltozás sebességét pedig nem a gyorsulások, hanem a pillanatnyi sebességek határozzák meg. Mindemellett a feladat paramétereit könnyen meg lehet úgy is választani, hogy a nyomás 0,8 atmoszférára le se csökkenjen.

3. A nyomás 0,8 atmoszférára való csökkenését alátámasztani kívánó feltétel — tudniillik, hogy a nagy dugattyút belülről 4 kp nagyságú erő nyomja — éles ellentétben áll a megoldás további gondolatmenetével, hiszen ez esetben a teherre ható erők eredője nulla, így a nagy dugattyú egyenes vonalú egyenletes mozgást végez. A megoldás állítása szerint eközben a hengerre ható erők eredőjének nagysága 0,8 kp, így a hengernek állandó gyorsulással kell mozognia. Tehát egy időben állandó és egy idővel arányosan növekvő mennyiség (a nagy dugattyú és a henger sebessége) arányának kell egyenlőnek lenni egy időtől független mennyiséggel (a nagy és kis dugattyúk területeiből adódó arányszámmal). Ez nyilvánvaló lehetetlenség.

4. A hibásan kiszámolt belső nyomásból a rugó megnyúlásának mértékére történő hibás következtetés már következmény.

5. Nem igaz, hogy a henger csak akkor indul el, amikor a 4 cm^2 területű körgyűrűt belülről 3,2 kp nagyságú erő nyomja. A henger a nagy dugattyú elindulása után azonnal, fokozatosan növekvő gyorsulással indul.

6. A nagy dugattyú elindulásának oka nem a dugattyúnak a gáztérfogat állandó értéken tartására való törekvése, hanem a kezdetben nyugvó dugattyúra ható erők eredőjének nullától különböző volta.

7. A hengerbe zárt levegő nyomása a folyamat során csak speciális, az indítási folyamatra és az egész rendszerre tett idealizáló feltevések teljesülése esetén marad állandó, vagy a gáz belső súrlódásából adódó — a dugattyúk súrlódása mellett valóságos esetekben is elhanyagolható — csillapítás figyelembe vételével. Ezen esetek felismerése középiskolai tanulóktól nem várható el. Az állandó értékű nyomás azonban ilyen esetekben is mindenképpen 0,8 atmoszférától különböző, annál határozottan nagyobb.

A felsorolt szakmai hibákon túlmenően módszertani igénytelenségre utal az egy gondolatmeneten belül egymást kizáró következtetések egymásmellettiségének megtűrése, az egymástól független tényeknek pl. „mert" függőségi viszonyt kifejező kötőszóval történő összekapcsolása.

A megoldás alapvetően elhibázott gondolatmenete — ok és okozat felcserélése — *világosan tükröződik a pontozási útmutatóban is. A versenyzők a henger elmozdulását a nagy dugattyú elmozdulásának felismerése nélkül csak a hivatalos megoldás tévedéséhez hasonlóan hibás következtetéssel vehették észre, amit a feladatra adható maximális pontszám 75%-ával jutalmazni értékelési hiba volt. Ugyaninnen eredő értékelési hiba a nagy dugattyú elmozdulását helyes gondolatmenettel indokló, de a henger elmozdulását nem tárgyaló megoldás nulla pontra történő értékelése.*

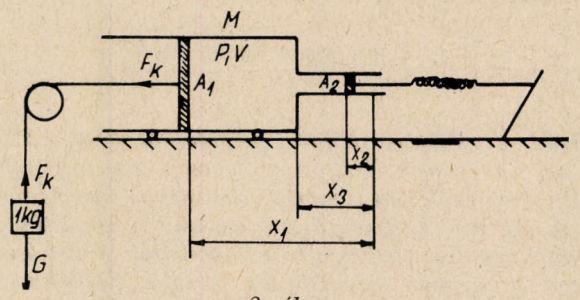
Az ismertetett hibasorozat indító mozzanata az a középiskolai tankönyvekben szereplő, az oktatás során készség fokára emelendő tévtan, amely szerint a test súlya a csigán átvetett fonálon keresztül a dugattyúra hat. (Vagy a dugattyún keresztül egyenesen a gázra?) Ez az első pontban elemzett hiba gyökere. Súlyos állításom alátámasztására itt csak a jelenleg is forgalomban levő középiskolai fizikatankönyvek közül az általános gimnáziumok második osztályai által használt könyvből a 159. és 160. oldalakon található hibákra hívom fel a figyelmet. Itt például az Atwood-gép egyik oldalára függesztett csavaranya súlya nem magára a csavarra, hanem „a fonalakon és a csigán keresztül a gyorsított testekre" hat. Ezt a hibát különösen súlyossá az teszi, hogy a tankönyv a nevezett bekezdésben a fenti kísérletre, továbbá a bekezdés címét adó, a tankönyvben nem definiált, önmagában haszontalan és zavaros fogalomra, a „gyorsító erő" fogalmára éppen Newton II. törvényének bevezetését alapozza. Ezzel a dinamika alaptörvényét az egyetemi szigorlatokat is végigkísérő, a tiszta fizikai világkép kialakulását súlyosan gátló ködös misztifi-

kációvá degradálja. Az elemzett versenyfeladat rossz hivatalos megoldása megrázóan szemlélteti, milyen messzenyúló hatásai lehetnek azon hibás fogalomalkotással kísért szakmai felületességnek, amely megtűri az egyenlő vektorokkal jellemezhető erők azonos erőknek való tekintését, s az erőket a kölcsönható objektumpároktól elszakítva megengedi, hogy azok önálló életre kelve testről-testre vándorolhassanak. *E fogalmi zavar kifejlődésének az erő sztatikai bevezetése is táplalajt nyújt, hiszen a sztatikai feladatok körében — alkalmas mellékszabályok betartásával — általában nem vezet számszerűen rossz eredményhez, s mire a dinamikai problémákban a végeredmény hibás volta is jelezné a fogalmi zavart, a rossz tétel már korrigálhatatlanul bevéső dhet. Pedig a fenti tévedéseket magában hordozó, az objektív valóságot hibásan tükröző fogalomrendszer felépülését az erő fogalmának helyes úton történő dinamikai bevezetésével el lehetne és éppen ezért el is kell kerülni!*

Az elemzett feladat középiskolai ismeretszint birtokában maximálisként megadható helyes megoldása: A teher horogra akasztása utáni pillanatban, amennyiben azt magára hagyjuk (elhanyagolható tömegű dugattyút feltételezve) a fonálban fellépő nulla nagyságú erő miatt g gyorsulással indul lefelé. A nyomás a henger belsejében a gáztérfogat növekedésének megfelelően csökken, így a dugattyúkra, valamint a henger jobb oldalát lezáró körgyűrű alakú felületre ható erők eredője a továbbiakban már nem nulla. Ennek megfelelően a teher gyorsulása a kezdeti g értékről fokozatosan csökken, miközben a henger gyorsulása a fokozatosan csökkenő belső nyomás következményeként egyre növekszik. A nulla tömegű kis dugattyú helyzetét eközben mindenkor a külső és belső nyomások különbségéből adódó erővel egyensúlyt tartó rugóerő felléptéhez szükséges, rugóállandótól függő megnyúlás határozza meg. A nagy dugattyú g-ről folyamatosan csökkenő gyorsulása miatt annak sebessége egyre lassabban növekszik. Ugyanekkor a henger sebessége a fokozatosan növekvő gyorsulás értelmezése szerint egyre rohamosabban nő. Ezek szerint nyilván lesz olyan időpillanat, melyben a henger sebessége a nagy dugattyú sebességét oly mértékben lépi túl, hogy az elszűkített hengerrészben beálló térfogatnövekedés a nagy keresztmetszetű hengerrészben fellépő térfogatcsökkenésnél kisebbé válva a gáz nyomása növekedni kezd. Ez a henger gyorsulását csökkenti, a nagy dugattyúét pedig növeli. E folyamat mindaddig tart, míg a henger egyre lassabban növekvő sebességét a nagy dugattyú egyre gyorsabban növekvő sebessége oly mértékben közelíti meg, hogy a baloldali hengerrészben fellépő, egyre lassúbb ütemű térfogatcsökkenést a jobb oldali rész növekvő ütemű térfogatnövekedése ismét kompenzálni tudja, így a nyomás majd ismét csökkenni kezd, s a folyamat a már leírtak szerint folytatódik. A nagy dugattyú és a henger mozgása tehát gyorsuló, amely során a gyorsulások nagysága ellentétes fázisban ingadozik. Mivel a henger és a nagy dugattyú gyorsulása a pillanatnyi nyomáskülönbségekből fellépő erőkön túlmenően a henger és a teher tömegétől függ, ezért a mozgás átlagos gyorsulása, valamint a gyorsulások ingadozásának periódusideje is függ ezektől.

Ez tehát a feladatnak egy csupán középiskolai ismeretekre támaszkodó megoldása, melynek középiskolai tanulóktól való maradéktalan elvárása mégis — a gondolatmenet szerteágazó figyelmet igénylő összetettségére, valamint a mellékvágányok elkerülését biztosító rutinos céltudatosságra való tekintettel — a valós helyzetet figyelmen kívül hagyó, maximalista pedagógiai hiba lenne. Ezt is számításba véve, a helyes értékelés például a következők szerint történhetett volna: Ha a versenyző csak a nagy dugattyú elindulását s az emiatt a hengerben fellépő nyomáscsökkenést veszi észre, 0,5 pont; ha felismeri, hogy a kezdeti pillanatban a magára hagyott teher gyorsulása a nagy dugattyúéval azonos módon g nagyságú, majd a nyomás csökkenésével csökken, 1 pont; ha ezen kívül észreveszi, hogy a henger növekvő gyorsulással mozogni kezd, 1,5 pont; ha felismeri, hogy a henger és a dugattyú egyensúlyi állapotának feltételei egymást kölcsönösen kizárják, így az egész rendszerre nézve gyorsulásmentes állapot nem jöhet létre, 2 pont.

A kvalitatív következtetések igazolására, s a folyamatról alkotott kép teljessé tétele érdekében bemutatom a feladat egy közelítő analitikus megoldását, majd a folyamat lefolyását jól érzékeltető numerikus számológépes megoldás eredményét a 3. ábrán. Az analitikus megoldásban adódó harmonikus rezgés az ott alkalmazott közelítés következménye. A numerikus megoldás a nem harmonikus jelleget is jól láthatóvá teszi, de az ebből adódó különbség az analitikus megoldásban megadott körfrekvencia és nyomásamplitúdó értékét jelentéktelen mértékben befolyásolja.



2. ábra

A fonálon függő teher mozgásegyenlete:

$$mg - F_k = m\ddot{x}_1.$$

Mivel a feladat és a megoldás szövegéből egyaránt a dugattyúk tömegének elhanyagolhatóságára lehet következtetni, a nagy dugattyú mozgásegyenlete:

$$-F_k - pA_1 + p_oA_1 = 0.$$

Ezekből:

$$mg - A_1(p_0 - p) = m\ddot{x}_1.$$

A rugóra erősített nulla tömegű kis dugattyú mozgásegyenlete:

$$A_2p_0 - A_2p - kx_2 = 0.$$

Az M tömegű henger mozgásegyenlete:

$$(p_0 - p) \cdot (A_1 - A_2) = M x_3.$$

A hengerbe zárt levegő térfogata a 2. ábra jelöléseit felhasználva:

$$V = (x_3 - x_2) A_2 + (x_1 - x_3) A_1 =$$
$$= x_1 A_1 - x_2 A_2 + x_3 (A_2 - A_1).$$

Az egyenlet mindkét oldalát idő szerint kétszer deriválva:

$$\ddot{V} = \ddot{x}_1 A_1 - \ddot{x}_2 A_2 + \ddot{x}_3 (A_2 - A_1).$$

A mozgásegyenletekből kifejezett gyorsulások felhasználásával:

$$\ddot{V} = \frac{A_2^2}{k} \ddot{p} + \left[\frac{A_1^2}{m} + \frac{(A_2 - A_1)^2}{M} \right] p + g A_1 -$$
$$- \left[\frac{A_1^2}{m} + \frac{(A_1 - A_2)^2}{M} \right] p_0.$$

Ez a kétváltozós másodrendű differenciálegyenlet a hengerbe zárt gáz állapotváltozását leíró összefüggés felhasználásával egyváltozósra vezethető vissza. Az állapotegyenletet

$$V = p_0^{\varrho} V_0 p^{-\varrho}$$

alakban felvéve a $\varrho = 1$, *illetve* $\varrho = \frac{c_v}{c_p} = \frac{1}{\varkappa}$ *specializálással az izotermikus változást leíró Boyle—Mariotte törvényhez, illetve az adiabatikus változást leíró Poisson egyenlethez tartozó megoldáshoz fogunk jutni. Az állapotegyenlet mindkét oldalának idő szerinti deriválása után:*

$$\dot{V} = - p_0^{\varrho} V_0 \varrho p^{-\varrho-1} \dot{p} = - \varrho \frac{V_0}{p} \dot{p}.$$

Mivel a második derivált képzésekor a nevezőben p-nek harmadik hatványa marad, az így nyert differenciálegyenlet egzakt analitikus megoldását nem érdemes keresni, hiszen az alábbi közelítés kielégítő pontossággal írja le a folyamatot. Feltételezve, hogy a nyomás megváltozása kezdeti értékéhez viszonyítva kicsiny, p helyére p_0 *írható. Ezzel:*

$$\ddot{V} = - \varrho \frac{V_0}{p_0} \ddot{p}.$$

Ennek felhasználásával a következő, könnyen megoldható differenciálegyenletet nyerjük:

$$\left[\frac{A_2^2}{k} + \frac{\varrho V_0}{p_0} \right] \ddot{p} + \left[\frac{A_1^2}{m} + \frac{(A_2 - A_1)^2}{M} \right] p + g A_1 -$$
$$- \left[\frac{A_1^2}{m} + \frac{(A_2 - A_1)^2}{M} \right] p_0 = 0.$$

Ez egy harmónikus rezgés differenciálegyenlete, melynek megoldása a rezgések tárgyalásánál megszokott módon kapható. A teher horogra akasztása utáni azonnali magára hagyását indulási állapotként feltételezve (e feltételezést a feladat és a megoldás szövege egyaránt implikálja) a $p(0) = p_0$, $\dot{p}(0) = 0$ *kezdeti feltételek adódnak. Ezek figyelembevételével:*

$$p = (p_0 - p^*) + p^* \cos \omega t,$$

ahol

$$p^* = \frac{g A_1 m M}{M A_1^2 + m (A_2 - A_1)^2},$$

$$\omega^2 = \frac{k p_0 [M A_1^2 + m (A_2 - A_1)^2]}{M m (p_0 A_2^2 + \varrho k V_0)}.$$

Ha az indítás úgy történik, hogy a folyamat során mindvégig $\ddot{p}(t) = 0$ *teljesül, akkor a* $p(t)$*-re vonatkozó differenciálegyenlet nulladrendűre egyszerűsödik, s így megoldása algebrai úton nyerhető:*

$$p = p_0 - p^*$$

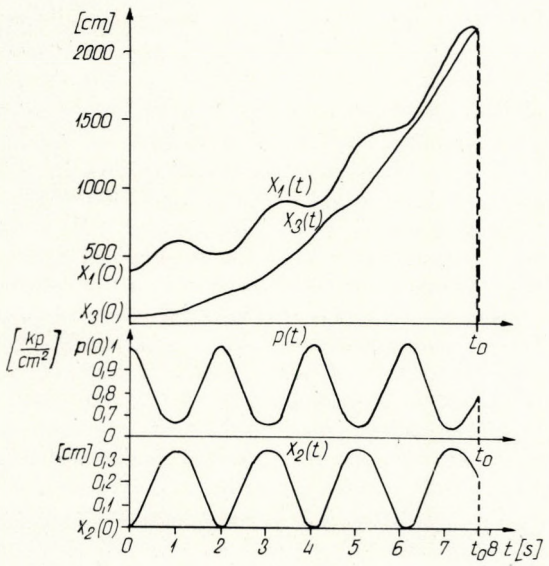
A gáz ilyen kvázisztatikus állapotváltozásával járó folyamat szigorúan csak mindkét irányban végtelen hosszú henger feltételezése mellett valósítható meg, végtelen hosszú indítási idővel. Éppen ezért ez az eset az amúgy is túlidealizált feladat megoldásának csupán elméletileg teljessé tétele szempontjából érdekes.

A p-ra adott összefüggésből látható hogy M minden véges értékére* $\frac{dp^*}{dM} > 0$, *azaz p* M szerint szigorúan monoton növekvő függvény, így p*-ra M bármely véges értéke mellett igaz:*

$$p^* < \lim_{M \to \infty} p^* = 0{,}2 \text{ kp/cm}^2.$$

Ezen összefüggésekből látható, hogy a feladat paramétereinek bármely véges értékekből álló reprezentációja esetén a henger belsejében a nyomás nem állandó, hanem a 0,8 atmoszféránál minden esetben határozottan nagyobb $p - p^*$ *érték körül harmonikus rezgést végez az indítás módjától függő nagyságú amplitúdóval, továbbá, hogy az átlagos nyomás a dugattyúk területének arányán kívül a teher és a henger tömegétől is függ. Megfigyelhető még, hogy a folyamat adiabatikus vagy izotermikus jellege az egyensúlyi nyomás és a rezgésamplitúdó értékét egyáltalán nem, a rezgés körfrekvenciáját pedig csak olyan mértékben befolyásolja, hogy minden* V_0 *kezdő térfogattal induló izotermikus folyamatnak megfeleltethető egy* $\varkappa V_0$ *kezdő térfogattal induló adiabatikus folyamat és viszont, úgy, hogy a két folyamat során fellépő nyomásértékek minden időpillanatban egyenlőek.*

A dugattyúk és a henger elmozdulását a $p(t)$ *függvénynek a mozgásegyenletekbe való visszahelyettesítése után, azok kétszeres integrálásával kapjuk.*



3. ábra. A feladat numerikus számológépes megoldásának eredménye. (Vesd össze 2. ábra.) Jól látható a nagy dugattyú és a henger driftsebességére szuperponálódó nemharmonikus rezgés hatása az elmozdulásra, továbbá a nagy dugattyú és a henger driftsebességének különbözősége miatt törvényszerűen bekövetkező ütközés. (A számolás a feladatban megadottakon túlmenően az alábbi adatokkal, izoterm folyamatra történt. $M = 10$ kg, $x_1(0) = 400$ cm, $k = 1$ kp/cm, $x_2(0) = 0$, $x_3(0) = 50$ cm, $\dot{x}_1(0) = \dot{x}_2(0) = \dot{x}_3(0) = 0$, $\ddot{x}_1(0) = g$, $\ddot{x}_2(0) = \ddot{x}_3(0) = 0$, $p(0) = 1$ kp/cm².

Az $\dot{x}_1(0) = \dot{x}_2(0) = \dot{x}_3(0) = x_2(0) = 0$ *kezdeti feltételek figyelembevételével:*

$$x_1 = \left[g - \frac{A_1}{m} p^*\right] \frac{t^2}{2} - \frac{A_1 p^*}{m\omega^2} \cos \omega t + x_1(0),$$

$$x_2 = \frac{A_2}{k} p^* - \frac{A_2}{k} p^* \cos \omega t,$$

$$x_3 = \frac{A_1 - A_2}{M} p^* \frac{t^2}{2} + \frac{A_1 - A_2}{M\omega^2} p^* \cos \omega t + x_3(0).$$

Ezek szerint a nagy dugattyú és a henger egyenletesen növekvő „driftsebességére" egy-egy egymással ellentétes fázisú harmonikus rezgés szuperponálódik, míg a kis dugattyú egy állandó egyensúlyi helyzet körül végez ugyancsak harmonikus rezgést. A pillanatnyi driftsebességek arányát képezve p^* *értékének figyelembevételével*

$$\frac{\dot{x}_1}{\dot{x}_3} = \frac{g - \frac{A_1}{m} p^*}{\frac{A_1 - A_2}{M} p^*} = 1 - \frac{A_2}{A_1}$$

adódik.

HOZZÁSZÓLÁS ISZA SÁNDOR CIKKÉHEZ

Wiedeman László
Fővárosi Pedagógiai Intézet

Néhány megjegyzést szeretnék tenni a Szerzőnek az 1975/76. évi Országos Középiskolai Tanulmányi Verseny I. fordulója 4. példájával kapcsolatos elemzéséhez.

A Fizikai Szemle helyes intenciói szerint írt Vélemények konstruktívak lehetnek, mert a többet akarók kapcsolatának fóruma a kötetlen viták terén a kötelező udvariasság jegyében.

Az idézett példával kapcsolatban hadd jegyezzem meg, hogy a bizottság is azon volt, hogy fizika oktatásunk ne csak formalizmusokat tanítson, ne képletgyűjtemény legyen a fizika a tanuló számára, hanem az önálló, alkotó gondolkodás egy lehetősége. Erre egyik kiváló alkalom a kölcsönhatás felismerése, az összetett fizikai jelenség egyes elemeinek egyszerre való figyelembe vétele, nem pedig a mesterségesen szétválasztott és lokalizált elemek egymásutáni, egymástól független összerakása minőségileg alacsonyabbrendű leírássá, Pontosan, ahogy a Szerző tanácsolja. De a nagy tanítási gyakorlattal rendelkező bizottság előtt a valóságos tanuló áll, nem az a fiatal, aki szinte tanári érintésre csupán, önállóan felfedezi a természet törvényeit és az adott problémában fellelhető egyre mélyebb és összetettebb összefüggéseket teljes kölcsönhatás viszonylatukban tudja látni. Nem tarthatjuk hibásnak, ha a valóság megismerése annak földarabolásával kezdődik, mint ahogy a à példabeli dugattyús rendszer tárgyalását is csak ilyen fokon kérték, s nem a teljes kölcsönhatás figyelembe vételével, amit függvényegyenletet ír le. Tudatában vagyunk annak, hogy a (fizikai) megismerés approximáció, de biztosan előrehaladó. Ezt a szakmódszertanra vetítve, nem kívánjuk egy összetett probléma kapcsán annak pl. egyetemi szintű tárgyalását. Most nemcsak a differenciálegyenletre gondolok, hanem elsősorban a gondolkodásbeli analitikusság magasabb fokára, hiszen lehet egy gondolatmenet igen nehéz és sokat feltáró minden matematikai segédeszköz nélkül is. A feladat elsősorban azt várta, hogy a tanuló meglássa a henger elmozdulását. A megoldás gondolatmenete is ennek jegyében íródott. A rezgésre következtetés a súrlódás elhagyásával már egy következő lépcső. Erre is kitérhet a tanuló. Valóban, a hivatalos megoldás is elemekből rakta össze a várható eredményt, az elmozdulást. Ezzel természetesen torzította a valóságot egyfajta relativában. Így például, ha a Szerző által közölt differenciálegyenletet nem izotermikus, hanem adiabatikus esetre írnánk fel, vagyis a Boyle—Mariotte törvény helyett a Poisson egyenletet használnánk, akkor ebben a

relatívában a Szerző által közölt megoldást éppen olyan súllyal kifogásolhatnánk, mint ahogy most a 4. számú példa képezi kritika tárgyát egy, a tanulótól már idegen — de igaz — differenciált elemzés szintjén. A tanulók tudásában fennálló helyzetet regisztrálta a példa és annak tanulói megoldása is.

Minden fizika feladatban elkerülhetetlenül van idealizálás. Előnyben kell részesítenünk azokat az idealizáló lépéseket, amelyek a tényleg megfigyelhető folyamat felé vezetnek. A henger esetében a megfigyelés azt mutatja, hogy az történik, amit a hivatalos megoldás jelez, mivel van súrlódás. Ezen túlmenő elképzelések elméletileg érdekesek lehetnek, de a gyakorlat számára lényegtelenek. Boyle óta (XVII. század) számtalan feladat található tankönyvekben, példatárakban — gázokra vonatkozó feladatok —, de rezgést általában nem hoznak szóba. Ez természetes, hiszen fentiek szerint ilyen nem figyelhető meg a tényleges kísérlet adatai következtében.

A súrlódás esetét és az idealizált — általában meg nem valósuló súrlódásmentes helyzetet kétségtelenül nem választotta szét a feladat — annak szövege szerint. Mindezt módszertani megfontolásból, hiszen nem tudott volna mit kezdeni a tanuló egy, a súrlódást is figyelembe vevő differenciálegyenlettel, ha a feladat szövegébe bekerült volna valamilyen utalás a súrlódásra. Vagy ha a tanuló nem számol, hanem következtet, a fennálló csillapítás bizonytalanságot okozott volna következtetésében, mivel a probléma mélyebb elemzést kíván.

Még egy észrevétel. Ha rugóra akasztott súlyt kézben tartunk, alul kezünkkel megtámasztjuk s így kezdetben nyújtatlan rugó, nem mindegy, hogy hirtelen engedjük-e el, vagy igen lassan engedjük lefelé, míg végül elvesszük a kezünket. (A szigorúbb fogalomalkotás itt az, hogy kvázisztatikusan.) Az első esetben a rugó egyensúlyi helyzete körüli harmonikus rezgőmozgás jön létre, míg a másik esetben a súly és a direkciós erő megszabta mg/D megnyúlás után egyensúlyi helyzetben marad. Számítással jól látható, hogy a potenciális energiának (mely most két tag összege) itt van minimuma, nem ott, ahol a sebesség zérus. Hasonló a helyzet, de egy fokkal jobban közelít a jelen példához a példatárak anyagának egyik kedvelt feladata, mikoris vízszintes asztallapon levő ládát csigán átvetett fonálon függőlegesen lógó súly gyorsít. Súrlódás nincs. Kérdés a rendszer mozgásának vizsgálata, hogyha a fonalat megszakítva, közbeiktatunk egy ideális rugót. Két merőben különböző megoldás van, aszerint hogy hogyan indítjuk a rendszert. Ha a súlyt kezünkben úgy tartjuk, hogy a rugó kezdetben nyújtatlan, majd hirtelen elengedjük, akkor a probléma differenciálegyenlete — tekintve, hogy a rugó pillanatnyi megnyúlása mindig a két mozgó test pillanatnyi útkülönbségéből adódik — egyenletesen gyorsuló mozgásra szuperponált harmonikus rezgőmozgást ír le. Ilyen a jelenlegi dugattyú és henger mozgása is, hacsak az 1 kp-os súlyt hirtelen engedjük el és a csillapítást elhanyagoljuk, továbbá — ahogy a Szerző tette — izotermikus közelítéssel számolunk. Ilyen összetett mozgásra való következtetést nem kívánhatunk meg a tanulótól. A most említett példatárbeli mechanika példában sem ezt kérdezik, hanem a rendszert kvázisztatikusan indítjuk, végül elvesszük a súly alól kezünket, s ezt a mozgást vizsgáljuk. Ez viszont egyenletesen gyorsuló mozgás, miközben a rugót a fonálerő feszítése állandó nagyságú megnyúlásban tartja. Ez esetben is van analógia a mostani 4. példával, bár nem teljes. Ha ugyanis kvázisztatikusan mozgatjuk a dugattyút, akkor a henger is kvázisztatikusan mozog. Ráakasztott súllyal, hirtelen magárahagyott rendszernél ez nem következik be; ez esetben valóban rezgés lesz, ha nem tekintjük a csillapítást.

A szerző módszertani kritikája nem reális. Ne essünk túlzásba, a középiskola nem tanít szakmai helytelenséget, hanem a nehezebb helyzetekben a helyesen továbbfejleszthető modellekkel közelíti a tudományos igazságot. Ezt segítette elő a 4. példa is.

A kölcsönhatás teljes leírását nem várhatta el a versenybizottság, vagyis a csillapítások (külső és belső súrlódás, örvény képződés) figyelembe vételét. Tanításunkban még sok helyen nem fedjük fel teljesen a kölcsönhatásokat — habár sok középiskolai tanár fel tud írni és meg tud oldani differenciálegyenletet — mindössze a darabos beszéd nehézkességével rakjuk össze azokat tört egésszé a tanuló számára. A Szerző által kifogásolt összerakosgatás módszertani szükségesség és így helyénvaló. A tudományos kizárólagosság inproduktiv pedagógiai türelmetlenségre utalna. Látható, hogy a feladat szövege szerinti megoldás is — amit a Szerző adott — tartalmaz idealizálást.

A Fizikai Szemle szerkesztőbizottsága az 1972. évben meghirdetett Vélemények sorozatát az olvasók kérésére tovább folytatja ez évben is. A szerkesztőbizottság állásfoglalása alapja, „a Fizikai Szemle feladatául vállalja el, hogy [teret nyit a fizikai kutatás és a fizika oktatására vonatkozó egyéni véleményeknek, ha azok értékes gondolatokat tartalmaznak és építőszándékúak. függetlenül attól, hogy egyeznek-e a lap szerkesztőinek nézetével, vagy sem". Ennek szellemében várjuk továbbra is olvasóinknak, várjuk a magyar fizikusoknak leveleit.

A szerkesztésért felel: Turiné Frank Zsuzsa
Szerkesztőség: Budapest V., Anker köz 1, Eötvös Loránd Fizikai Társulat. Távbeszélő: 227-040
A kiadásért felelős: Siklósi Norbert igazgató
Kiadja a Lapkiadó Vállalat, Budapest VII., Lenin körút 9—11. Levélcím: 1906. postafiók 223 Távbeszélő: 221-293
Terjeszti a Magyar Posta. Előfizethető bármely postahivatalnál, a kézbesítőknél, a Posta hírlapüzleteiben és a Posta Központi Hírlap Irodánál (KHI, 1900 Budapest V., József nádor tér 1.) Közvetlenül vagy postautalványon, valamint átutalással a KHI 215-96162 pénzforgalmi jelzőszámlára
Előfizetés egy évre 72,—Ft; egyes szám ára 6,—Ft. Megjelenik havonta
76.3561 Akadémiai Nyomda Budapest V., Gerlóczy utca 2. — Felelős vezető: Bernát György

Index: 25.289

fizikai szemle

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat lapja



25 éves a KFKI

1976/11

A szerkesztőbizottság elnöke:

Marx György

A szerkesztésért felelős:

Turiné Frank Zsuzsa

A szerkesztőbizottság titkára:

Berényi Dénes

Szerkesztőbizottság:

Balázs Béla, Barlai Katalin, Barta György, Bozóky László, Csekő Árpád, Dede Miklós, Fehér István, Flórián Endre, Gaal István, Groma Géza, Haiman Ottó, Hoffmann Tibor, Holics László, Károlyházy Frigyes, Keszthelyi Lajos, Kovács István, Mihály László, Schanda János, Soós Károly, Szigeti György, Tóth Eszter, Valkó I. Péter, Vermes Miklós

Címképünk:

„Prometheusz" — KFKI érem. Borsos Miklós alkotása

TARTALOMJEGYZÉK

Pál Lénárd: Miről mesélnek a fluktuációk? 401. old.
Gombosi Tamás—Kóta József—Somogyi Antal—Varga András: A galaktikus kozmikus sugárzás anizotrópiája
Zimmer György: Doménfalak mozgása egytengelyes mágneses anyagokban 410. old.
Erő János: Atommagok cluster szerkezetének vizsgálata nagyenergiájú protonokkal 415. old.
Gyulai József: Ionimplantációs kutatások 423. old.
A KFKI rekonstruált reaktora 427. old.
Farkas Győző: Fotoeffektus igen nagy fényintenzitásoknál: a többfotonos fotoeffektus kimutatása laser-fénnyel 429. old.

A FIZIKA TANÍTÁSA

Bartucz Mária—Ruff Imre: A statisztikus termodinamika elemeinek bevezetése a középiskolák III. osztályában 431. old.

VÉLEMÉNYEK

Varga Tamás: A zsebszámológépek várható hatása az iskolákra 440. old.

СОДЕРЖАНИЕ

Л. Пал: О чем рассказывают флюктуации?
Т. Гомбоши-Й. Кота—А. Шомодьи—А. Варга: Анизотропия галактического космического излучения
Дь. Циммер: Движение доменных стен в одноосевых магнитных веществах
Я. Эрё: Исследование кластеровой структуры атомных ядер протонами высокой энергии
Й. Дьюлаи: Исследования по ионной имплантации в институте КФКИ
Ядерный реактор института КФКИ после его реконструкции
Дь. Фаркаш: Фотоэффект при сверхвысоких интенсивностях света: обнаружение многофотонного эффекта при помощи лазерного излучения

ПРЕПОДАВАНИЕ ФИЗИКИ

М. Бартуц—И. Руфф: Начала статистической термодинамики в III-м классе средних школ

INHALT

L. Pál: Worüber geben uns Fluktuationen Auskunft?
T. Gombosi—J. Kóta—A. Somogyi—A. Varga: Die Anisotropie der galaktischen kosmischen Strahlung
Gy. Zimmer: Verschiebungen der Domänengrenzen in einachsigen magnetischen Stoffen
J. Erő: Die Untersuchung der Cluster-Struktur von Atomkernen mittels hochenergetischer Protonen
J. Gyulai: Forschungen über Ionenimplantation
Der Kernreaktor des Instituts KFKI nach seiner Rekonstruktion
Gy. Farkas: Der Photoeffekt bei sehr grossen Lichtintensitäten:

UNTERRICHT DER PHYSIK

M. Bartucz—I. Ruff: Die Elemente der statistischen Thermodynamik in der III. Klasse

CONTENTS

L. Pál: Fluctuations — what do they tell us about?
T. Gombosi—J. Kóta—A. Somogyi—A. Varga: The anisotropy of the galactical cosmic radiation
Gy. Zimmer: The shifting of domain walls in mono-axial magnetic materials
J. Erő: The investigation of the cluster structure of atomic nuclei with high energy protons
J. Gyulai: Ion implantation research
The nuclear reactor of the KFKI Institute after its reconstruction
Gy. Farkas: The photoeffect at very high light intensities:

THE TEACHING OF PHYSICS

M. Bartucz—I. Ruff: The elements of statistical thermodynamics in the 3rd form of secondary schools

fizikai szemle

AZ EÖTVÖS LORÁND FIZIKAI TÁRSULAT LAPJA

Alapította Eötvös Loránd 1891-ben Mathematikai és Physikai Lapok néven

XXVI. évfolyam 11. szám 1976. november

MIRŐL MESÉLNEK A FLUKTUÁCIÓK?

Pál Lénárd
Központi Fizikai Kutató Intézet

Nehéz a természetben olyan jelenséget találni, amelynek számszerű jellemzői ne mutatnának kisebb-nagyobb ingadozásokat. Ezek az ingadozások értékes információkat tartalmaznak a jelenség dinamikai törvényszerűségeiről, és tanulmányozásuk számos esetben minőségileg új felismerésekhez vezethet.

Talán érdemes megemlíteni, hogy elsőként Clausius, Maxwell és főként Boltzmann értette meg a legmélyebben egyrészt azt, hogy az atomizmusnak természetes velejárója a fizikai mennyiségek kisebb-nagyobb, de állandó ingadozása és másrészt azt, hogy a fizikai mennyiségek átlagértékei* (pl hőmérséklet, nyomás, sűrűség, mágnesezettség, stb.) az ingadozások kellő kisértékűsége nélkül nem játszhatnak figyelemre méltó szerepet a jelenségek leírásában. Ez a körülmény eleve óvatosságra kell, hogy intsen bennünket azokban az esetekben, amikor erősen ingadozó mennyiségek jellemzésére csupán az átlagértékükre vonatkozó törvények ismeretesek. Ugyanakkor természetes, hogy ilyen esetekben érdeklődésünk elsősorban az ingadozások törvényeinek felderítésére irányul, mivel ezek a törvények a jelenség dinamikájába engednek bepillantást.

Az ingadozások (fluktuációk) a véletlenszerű jelenségek természetes velejárói.

Valamely jelenség véletlenszerűsége abban jut kifejezésre, hogy azonos feltételek melletti ismétlése más és más eredményre vezethet. Ennek az az oka, hogy minden jelenség végtelen sok más jelenségtől függ, és így véges számú feltétel rögzítése (és a valóságban mindig csak véges számú feltételt lehet rögzíteni) rendszerint nem teszi a jelenség lefolyását egyértelművé.

A feltételek rögzítésére egyébként azért van szükség, hogy a jelenségek végtelen sokaságából kiválaszthassuk a vizsgálandó, konkrét jelenséget. A feltételek rögzítését úgy kell végrehajtani, hogy a konkrét jelenséget érintő, alapvetően fontos tényezők legyenek meghatározóak. A jelenség konkrét lefolyását lényegében az a viszony szabja meg, amely adott feltételek mellett az alapvető és a nem alapvető tényezők között kialakul. Ez a viszony sohasem lehet szigorúan meghatározott és minél határozatlanabb, annál nagyobb a kérdéses jelenség véletlenszerűsége.

A véletlen jelenségekről a „kísérlet" szolgáltat információt. A „kísérlet" szót itt abban az értelemben használjuk, amely szerint kísérletnek minősül minden olyan — adott feltételeket kielégítő — eljárás, amely a véletlen jelenség állapotáról mennyiségi és minőségi információt szolgáltat.

A kísérlet lehetséges kimeneteleit — bizonyos megszorításokkal — elemi eseményeknek nevezzük. Célszerű az elemi eseményeket egy „tér" pontjainak tekinteni. Ezt a teret eseménytérnek nevezzük. Az eseménytér tartalmazhat véges számú, vagy végtelen sok pontot.

Az eseménytér pontjai halmazt alkotnak, és így maguk az események egy halmaz részhalmazaival jellemezhetők. A biztos és a lehetetlen események mellett vannak olyan események, amelyek hol bekövetkeznek, hol nem. Ezeket az eseményeket véletlen eseményeknek nevezzük.

A véletlen mértékének célszerű megválasztásához a tapasztalathoz kell folyamodnunk. Valamely kísérlet azonos feltételek mellett történő sokszori megismétlése során egy kiválasztott esemény hol bekövetkezik, hol nem. A kérdéses esemény jellemzésére felhasználhatjuk gyakoriságát (frekvenciáját), vagyis azt a számértéket, amely az esemény bekövetkezési számának és az ismétlések számának hányadosa

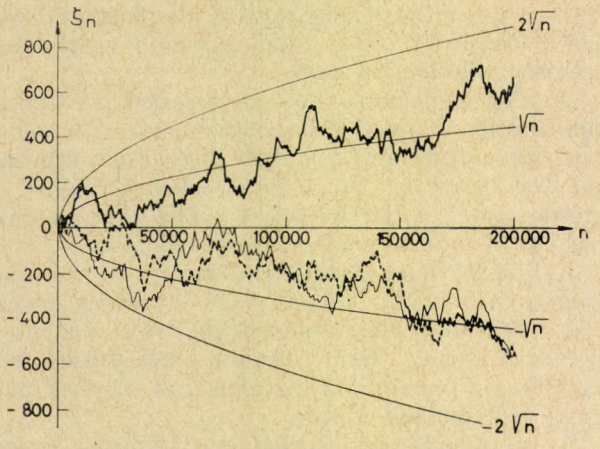
Ha növeljük az ismétlések számát, és minden ismétlés után meghatározzuk a kiválasztott esemény gyakoriságát, azt tapasztaljuk, hogy az ismétlések számának növelésével a gyakoriság értéke csökkenő aplitudójú ingadozásakkal bizonyos számérték körül stabilizálódik. Az események gyakoriságának az ismétlések számának növekedésével előálló stabilizálódása a véletlen jelenségek alapvető törvénye. Az az érték, amely körül a vizsgált esemény gyakorisága stabilizálódik, jellemzi magát az eseményt, megmutatja, hogy menynyire valószínű bekövetkezése. Éppen ezért, valamely esemény valószínűségének mértékéül azt a számértéket választhatjuk, amely körül az esemény gyakorisága az ismétlések számának növelésekor stabilizálódik.

* Az átlagérték kifejezést itt csak az egyszerűség kedvéért használjuk. Az átlagérték és a várható érték közötti lényeges különbségre később visszatérünk.

Példaként a stabilizálódás szemléltetésére egy érdekes számítógépes „kísérlet" eredményét idézzük. A számítógép a pénzdobálás folyamatát szimulálja oly módon, hogy az egyes dobásokat egymástól függetlennek tekinti, és minden egyes dobáshoz $+1$ vagy -1 értéket rendel, annak megfelelően, hogy a dobás eredménye „fej" vagy „írás"-e. Legyen η_k a k-ik dobáshoz rendelt számérték, és jelöljük ζ_n-nel a következő összeget:

$$\zeta_n = \eta_1 + \eta_2 + \ldots + \eta_n.$$

ösztönösen azt várjuk, hogy ζ_n értéke a zérus körül fog ingadozni, hiszen a „fej"-dobás gyakorisága aligha fog eltérni az „írás"-dobás gyakoriságától. Az 1. ábrán láthatjuk a számítógéppel realizált három kísérlet eredményét az $n = 1, 2, \ldots, 200.000$ értékeire.



1. ábra Egyenlő eloszlású, független valószínűségi változók ζ_n összege az n függvényében (a „fej" vagy „írás" játék számítógépes szimulálása).

Ezek a kísérleti görbék konzisztensek azzal az — egyébként triviálisnak tűnő — feltevéssel, hogy mind a „fej"-dobás, mind az „írás"-dobás gyakorisága az $\frac{1}{2}$ valószínűség körül stabilizálódik. Ugyanis, ez esetben a várható érték $\langle \zeta_n \rangle = 0$, míg a szórásnégyzet $\langle \zeta_n^2 \rangle = n$, és így a szórás $D\{\zeta_n\} = \sqrt{n}$. Az ábrán látható, hogy a kísérleti görbék az n növekedésével egyre inkább a kétszeres szórás határait jelző $y = \pm\sqrt{n}$ parabolákon belül helyezkednek el.

A stabilizálódás folyamatát még egy másik módon is szemléltethetjük. Legyen

$$\mu_n = \frac{1}{n}(\eta_1 + \eta_2 + \ldots + \eta_n)$$

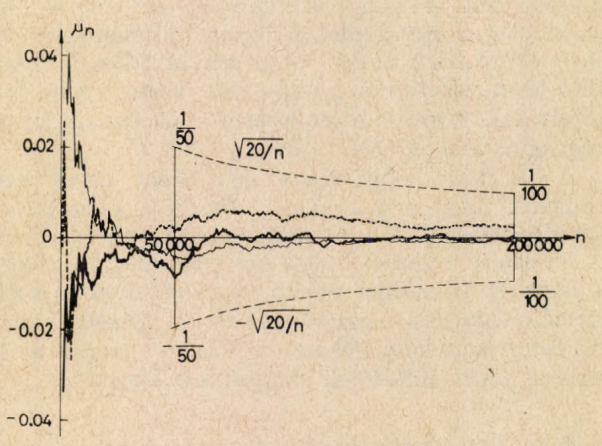
az n dobás eredményének átlagértéke. (Az átlagérték maga is valószínűségi változó.) A 2. ábrán láthatjuk μ_n függését a dobások számától. Ha n nagy, akkor $\mu_n \sim \langle \eta \rangle = 0$. Például, ha $n = 50.000$, akkor $-\frac{1}{50} < \mu_{50.000} < \frac{1}{50}$, vagy ha $n = 200.000$, akkor $-\frac{1}{100} < \mu_{200.000} < \frac{1}{100}$. Azt mondhatjuk, hogy μ_n értéke a zérus körül stabilizálódik, és ez ismét arra utal, hogy mind a „fej"-dobás, mind az „írás"-dobás valószínűsége ugyanaz a szám, nevezetesen $\frac{1}{2}$. A 2. ábrán megfigyelhető viselkedés az úgynevezett nagy számok törvényét illusztrálja.

Érdemes még megemlíteni, hogy az elemi események valószínűségének meghatározása nem matematikai feladat. Csak a jelenség konkrét vizsgálata vezethet el az elemi események valószínűségének meghatározásához. A valószínűségelmélet módszereivel az elemi eseményekből álló bonyolult események valószínűségeit számíthatjuk ki.

Az előző példában az elemi esemény valószínűségét egy összetettebb esemény fluktucáióinak viselkedése alapján becsültük meg.

A fluktuációkra — különösen a műszaki gyakorlatban — sokszor a „zaj" elnevezést használják. A mindennapi életben a kellemetlen hangokat, zörejeket, amelyek a fület sértik, elnyomják az értelmes beszédet, idegesítik az embereket, nevezik zajnak. A zaj eme akusztikus fogalmát a fizikusok és mérnökök általánosították. Beszélnek termikus, elektromágneses, stb. zajról. A zaj csökkenti, vagy gyakran lehetetlenné teszi a hasznos információk vételét. A zajszint jellemzésére a mérnöki gyakorlatban a zajteljesítménynek a hasznos (információt tartalmazó) teljesítményhez való viszonyát használják. A zajnak ez a közvetlen jelentése általánosítható valamennyi véletlen ingadozást mutató jelenségre.

A zaj vizsgálata, a zajanalizis az utóbbi időben szinte minden területen jelentős szerepet kapott. Ismeretes, hogy a hírközlésben alapvető kérdés, hogyan közvetítsenek leggazdaságosabban információt zaj jelenlétében. Gyakran igen költséges a „zaj/jel" viszony erőteljes csökkentése. Kimutatható, hogy a zajanalízis sokszor olcsóbb és egyes esetekben egyedüli módszer a „zajtengerben" elvegyült információk kiszűrésére. Ez az eljárás műholdak és mesterséges égitestek adóiból érkező információk vételében szinte teljesen nélkülözhetetlennek bizonyult.



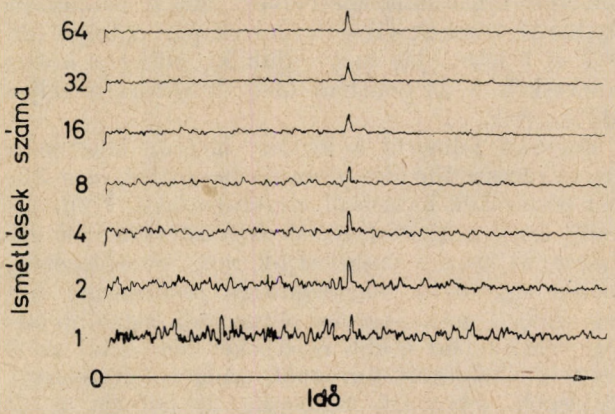
2. ábra A nagy számok törvényének illusztrálása számítógép segítségével (a „fej" vagy „írás" játék alapján)

A hírközlésben a zajanalízis célja a zajban elvegyült hasznos információ kiszűrése. Sok esetben azonban a zajanalízis magáról a zajt produkáló jelenség finom részleteiről ad fontos felvilágosítást. Például az agyáramok ingadozásaiból, pontosabban az ingadozások analíziséből az agyfunkciók hibáira lehet következtetni. Az epilepsziások agyának áramingadozásai meglepően hasonlítanak egy instabilis állapotú, vízforraló reaktor teljesítményingadozásaira. Az ingadozások nagy érzékenységgel jelzik a vizsgált folyamat kifejlődésben levő instabilitásait, ezért analízisük biztonsági szempontból is sok esetben hasznos információkra vezet.

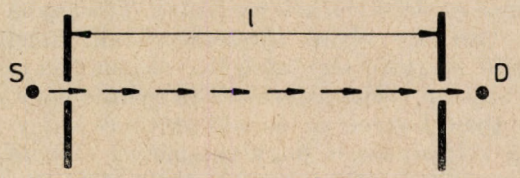
Az eddigiekben — bizonyos szokásokat követve — a zavaró véletlen ingadozásokat egyszerűen zajnak neveztük. Amikor azonban nem a „zajtól" való megszabadulás, hanem éppen a „zaj" törvényeinek felderítése lesz a feladatunk, akkor szívesebben beszélünk — a zajjal szinte azonos értelemben — fluktuációkról. Érthető, hogy ilyen esetekben annál könnyebben oldhatjuk meg feladatunkat, minél nagyobb a „zaj", más szóval minél nagyobb a fluktuáció. Sok esetben azonban nem lehet nagy fluktuációkat előidézni, és finom kísérleti módszerekre van szükség, hogy a fluktuációk törvényszerűségeit felismerhessük.

Érdemes talán még azt is megemlíteni, hogy kondenzált rendszerekben végbemenő bizonyos átalakulások a fizikai jellemzők (sűrűség, mágnesezettség, elektromos polarizáció, stb.) erőteljes fluktuációival kapcsolatosak. Ezek a fluktuációk jelzik, hogy az átalakulási pontban az anyag erősen instabilis (kritikus) állapotban van. A fluktuációk analízise lehetővé teszi az instabilitások okainak feltárását, ami elvezethet az átalakulások elméletének pontosabb megalapozásához.

A következőkben a zajanalízis néhány alkalmazását szeretném bemutatni. Legyen az első példa az, amikor a zaj valóban zavaró; elfedi a hasznos információt hordozó jelet, és az a feladat, hogy megszabaduljunk ettől a kellemetlen hatástól. Az egyszerűség kedvéért legyen a hasznos információt hordozó jel egy célszerűen választott időponthoz képest adott késéssel megjelenő elektromos feszültségcsúcs. A különböző eredetű, zavaró feszültségingadozások azonban részben, vagy teljesen elfedhetik ezt a számunkra fontos feszültségcsúcsot, amint azt jól láthatjuk a 3. ábra 1 görbéjén. Ha azonban a kísérlet azonos körülmények között sokszor megismételhető, akkor a zavaró feszültségingadozásoktól viszonylag könnyen megszabadulhatunk. Egymás után többször regisztrálva a feszültségváltozás időbeli lefolyását és a kapott görbéket összeadva azt tapasztaljuk, hogy a véletlenszerű ingadozások fokozatosan eltűnnek (a zaj kiátlagolódik), és elegendő számú görbe összegezése után szinte tisztán megjelenik az általunk keresett hasznos feszültségcsúcs. A 3. ábrán az egyes görbék mellé írt számok mutatják, hogy az adott görbe hány felvétel összegéből adódott. Látható, hogy már négyszeri ismétlés után jól felismerhető a keresett feszültségcsúcs és az is, hogy 64



3. ábra Zajszűrés független mérési eredmények összegezésével.



4. ábra Részecskék sebességeloszlásának mérése.

ismétlés után a zavaró feszültség szinte teljesen eltűnik.

A zajtengerből való „jelhalászatnak" van azonban ennél hatékonyabb módszere is. Mivel egy ilyen módszer neutronspektroszkópiai alkalmazásának kidolgozásában magam is részt vettem, úgy vélem nem lesz nehéz bemutatnom a lényegét. Tegyük fel, hogy a 4. ábrán látható S pontból különböző sebességű részecskék repülnek a D pontba, ahol a részecskéket megfelelő detektor regisztálja. Határozzuk meg az S pontból kilépő részecskék sebességelosztását. Elvben ezt a feladatot egyszerűen megoldhatjuk, hiszen nem kell mást tennünk, mint megfelelő szerkezettel elzárnunk az S pontból kilépő részecskék útját, majd időnként — nagyon rövid időre — meg kell nyitnunk ezt a zárat, hogy néhány részecske jól meghatározott időpontban kezdhesse meg repülését a D pont felé. A zárnyitás pillanatában „órát indítunk", amelyet aztán a részecskének a D pontba való megérkezésekor leállítunk, és leolvassuk rajta a repülési időt. Ebből, ismerve a repülési út hosszát, a sebességet egyszerűen kiszámíthatjuk (feltételezve, hogy egy adott részecske a repülés közben nem változtatja sebességét, vagy ha igen, ismeretes a változás törvénye). Egymás után sokszor ismételve ezt a mérést, a részecskék sebességeloszlására jó becslést adhatunk.

A valóságban azonban nem ilyen kedvező a helyzet. A D pontban elhelyezett detektorba ugyanis nemcsak az S pontból érkezhetnek részecskék — amelyek sebességére kíváncsiak vagyunk — hanem gyakorlatilag mindenhonnan és teljesen véletlenszerűen. Így a minket érdeklő eseményeket elfedik a véletlen események, amelyektől sokszori ismétléssel ugyan többé-kevésbé megszabadulhatunk, de ez általában sok időbe telik, mivel ennél a mérési módszernél a rendelkezésre álló idő túlnyo-

mó része kihasználatlanul elvész. Míg a számunkra fontos részecskék vizsgálatára csupán a teljes idő $\Theta/T \ll 1$ hányadát használjuk ki, addig a kóbor részecskék a D pontban lévő detektort a teljes időben érik.

Jogosan felmerül a kérdés, hogyan lehetne a rendelkezésre álló időt jobban kihasználni, és a kóbor részecskék hatásától megszabadulni. Nyilvánvaló, hogy a nyitvatartási és a zárvatartási idő viszonyát nem választhatjuk meg tetszőlegesen, hiszen egy — a sebességmérés pontosságát befolyásoló — nyitvatartási aktus után legalább addig nem szabad újabb részecskét kiengedni az S pontba elhelyezett forrásból, amíg a feltételezett legkisebb sebességű részecske is befutja a D pontig vezető repülési utat. Ilyen módon, ha javítani akarunk az időkihasználáson, valami merőben más módszerhez kell nyúlnunk. Tételezzük fel, hogy van egy olyan zárszerkezetünk, amely a startidő megjelölésére szolgáló, elegendően rövid ideig teljesen véletlenszerűen van nyitott vagy zárt állapotban. Legyen ez az időtartam Θ és így annak a valószínűsége, hogy valamely t időpontban a zárszerkezet nyitva van vagy zárva van $p = \frac{1}{2}$.

Helyezzünk el egy ilyen speciális, véletlenszerűen működő zárszerkezetet közvetlenül az S forrás elé, hogy minden, az S pontból kiinduló részecske ezen a zárszerkezeten keresztül jusson tovább a D pont felé. $t = 0$ időpontban indítsuk meg a zárszerkezetet, és regisztráljuk a D pontba érkező részecskéket. Valamely $(q-1)\,\Theta \leq t \leq q\Theta$ időintervallumban a detektorba érkező részecskék számát az alábbi kifejezés adja meg:

$$z_q = \sum_{i=1}^{q} v_{q-i} x^M_{q-i} h_i + v^B_q, \tag{1}$$

ahol v_k a $(k-1)\,\Theta \leq t \leq k\Theta$ intervallumban az S forrásból kilépő, míg v^B_k ugyanezen intervallumban a detektorba érkező kóbor részecskék száma. A h_i pedig lényegében annak valószínűsége, hogy a részecskék repülési ideje az $(i-1)\Theta$ és az $i\Theta$ időpontok közé esik. Ha $f(t)$ a repülési idő eloszlásának a sűrűségfüggvénye, akkor

$$h_i = \int_{(i-1)\Theta}^{i\Theta} f(t)\,dt \sim \Theta f_i\,. \tag{2}$$

Nyilván

$$\sum_{i=1}^{\infty} h_i = 1. \tag{3}$$

A véletlenszerűen működő zárszerkezet hatását az

$$x^M_k = \frac{1}{2}(1 + x_k) \tag{4}$$

modulációs függvény fejezi ki, amelyben x_k a következő tulajdonságokkal rendelkező kétértékű valószínűségi változó:

$$\text{Prob}\,\{x_k = 1\} = \text{Prob}\,\{x_k = -1\} = \frac{1}{2}, \tag{5}$$

és

$$\text{Prob}\,\{x_j\,x_k\} = \text{Prob}\,\{x_j\}\,\text{Prob}\,\{x_k\}, \quad \text{ha } j \neq k \tag{6}$$

és így

$$\langle x_k \rangle = 0\,; \qquad \langle x_j\,x_k \rangle = \delta_{jk}. \tag{7}$$

Képezzük most a

$$\langle z_q x_{q-j} \rangle = R_{zx}(j) \tag{8}$$

korrelációs függvényt. Azt kapjuk, hogy

$$R_{zx}(j) = \frac{1}{2} s_0 \Theta^2 f_j; \qquad j = 1, 2, \ldots, q\,, \tag{9}$$

ahol s_0 a részecskeforrás intenzitása. Azt tapasztaljuk, hogy az $R_{zx}(j)$ keresztkorrelációs függvény a részecskék repülési idő eloszlását, azaz sebességeloszlását adja meg. Látható, hogy ezzel az eljárással a teljes mérési idő felét kihasználhatjuk, és a kóbor részecskék zavaró hatásától teljesen megszabadulhatunk. Mindez igen nagy előny lenne, sajnos azonban teljesen kihasználni nem tudjuk, mivel valódi véletlen számsorozatot nem lehet előállítani, már csak azért sem, mert feltehetően véges idő alatt akarjuk a mérést elvégezni. Kis áldozat árán azonban sok mindent megőrizhetünk az előnyökből.

A mérési időt osszuk ciklusokra. Egy ciklusnak a hosszát úgy választjuk meg, hogy abba a feltételezhetően leghosszabb repülési idő is beleférjen. Legyen a ciklus hossza $T = n\Theta$, ahol Θ a zárszerkezet áteresztési ideje és — az egyszerűség kedvéért — egyben a detektorhoz csatlakozó n-csatornás tárolóberendezés csatornaszélessége is, n pedig nem más mint azon pszeudovéletlen bináris számsorozat tagjainak száma, amely sorozat szerint a zárszerkezetet vezéreljük. Ilyen számsorozatot könnyen elő lehet állítani többfokozatú shift-regiszter segítségével. Egy d-fokozatú shift-regiszter $n = 2^d - 1$ elemű pszeudovéletlen, bináris sorozatot állít elő periódikusan. Legyen $V_1, V_2, \ldots, V_n$ a $+1$ és a -1 számoknak egy sorozata. Ha ez pszeudovéletlen, akkor

$$\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} V_k = \frac{1}{n}, \tag{10}$$

és

$$\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} V_k\,V_{k-j} = \begin{cases} 1, & \text{ha } j = pn\,; \quad p = 0,1,\ldots \\ \dfrac{1}{n}, & \text{ha } j \neq pn\,; \quad p = 0,1,\ldots \end{cases} \tag{11}$$

Ha most tehát az S pontban elhelyezett forrásból egy ilyen pszeudovéletlen számsorozattal vezérelt zárszerkezeten keresztül engedjük ki a részecskéket, akkor a D pontban elhelyezett detektor N ciklus után a $k \leq n$ csatornában

$$Nu_k = \sum_{p=1}^{N} z_{k+(p-1)n} \tag{12}$$

részecske érkezését jelzi, ahol

$$z_q = \sum_{i=1}^{n} v_{q-i}\,V^M_{q-i}\,h_i + v^B_q \tag{13}$$

és $V_q^M = \frac{1}{2}(1 + V_q)$ a pszeudovéletlen modulációt kifejező függvény. Ha most kiszámítjuk az $\langle u_k V_{k-j} \rangle = R_{uV}(j)$ keresztkorrelációs függvényt, az előbbihez hasonlóan lényegében a repülési idő eloszlását kapjuk a kóbor részecskék tekintélyes elnyomásával. Az eredmény ugyanis

$$R_{uV}(j) = \frac{1}{2} s_0 \Theta^2 f_j + \frac{1}{n} s_0 \Theta \left(1 - \frac{1}{2}\Theta f_j + s_0^B/s_0\right), \tag{14}$$

ahol s_0^B a zajintenzitás (a kóbor részecskék intenzitása). Az elnyomás mértékét az $n = 2^d - 1$ szám adja meg, és mivel az $n = 1023$ érték könnyen elérhető, világos, hogy a zaj könnyen csökkenthető ezred részére.

Most még kimutathatjuk, hogy mi a nyereség az egyszerű repülési idő módszerrel szemben. Ugyanolyan hosszú mérési idő alatt az egyszerű repülési idő módszerrel $N\Theta s_0$ részecskét vizsgálunk, míg a korrelációs módszer segítségével $Nn\Theta s_0/2$ részecskét.

A két módszer igazi összehasonlítását olymódon végezhetjük el, ha összevetjük a repülési idő eloszlásra jellemző f_i emplitudók mérési hibáját az egyik, illetve a másik módszer esetében. A számításokat nem részletezve, azt találjuk, hogy csekély kivételtől eltekintve a korrelációs módszer jóval előnyösebb mint a repülési idő klasszikus mérésén alapuló eljárás.

Az 1960-as évek második felében ennek a módszernek a kidolgozásában és a neutronspektroszkópia területén történő alkalmazásában a KFKI munkatársai élenjáró szerepet töltöttek be. A későbbiek során ezt a módszert számos más területen alkalmazták (pl. az optikai spektroszkópiában). Jelenleg originális elgondoláson alapuló alkalmazás valósul meg az Egyesített Atomkutató Intézetben működő impulzusreaktornál, ahol a KFKI munkatársai olyan korrelációs spektrométert építettek, amely egyszerre végzi el a beeső neutronok és a szórt neutronok energia szerinti analízisét.

Befejezésül most olyan feladatról szeretnék említést tenni, amikor az a cél, hogy a véletlenszerű ingadozásokban rejlő információkat hasznosítsuk. Először egy közismert, egyszerű példát említek. Annak következtében, hogy a töltéshordozók csak diszkrét töltésmennyiséget szállítanak, várható ingadozás fellépte az áramerősségben. Ezekből az ingadozásokból megbecsülhetjük az elemi töltés nagyságát. A tényleges mérések céljaira egy vákuumdióda szolgálhat, amelynek a katódjából az elektronok véletlenszerűen lépnek ki, és a katód-anód között lévő elektromos tér hatására az anód felé repülnek. Egyszerű számítással megmutatható, hogy — elhanyagolva a tértöltés hatását és az elektronok kezdő sebességét — az áramerősség szórásnégyzetének és az áram várható értékének hányadosa a következő kifejezéssel adható meg:

$$\langle (\delta i)^2 \rangle / \langle i \rangle = 4q/3\tau ,$$

ahol τ az elektronok repülési ideje és q az elektron töltése. A τ külön méréssel meghatározható, és így az áramingadozásból a q értéke becsülhető. Természetesen ez a becslés meglehetősen pontatlan, de a lényeg most nem is a pontosságban, hanem abban van, hogy a folyamatok diszkrét mivoltának (atomiságának) mindig velejárója a makroszkopikus mennyiségek kisebb, vagy nagyobb mértékű fluktuációja, amiből viszont az atomi jellemzőkre következtethetünk.

Ezek után talán érdekes lesz egy, a vákuumdiódánál valamivel bonyolultabb rendszerben végbemenő folyamat makroszkópikus paramétereinek ingadozásait vizsgálat tárgyává tenni. Legyen ez a folyamat a nukleáris reaktorokban lejátszódó hasadási láncreakció. A neutronok számának ingadozásaiból fontos megállapításokat tehetünk a hasadási folyamat törvényszerűségeire és az egész rendszer dinamikai tulajdonságaira. Az egyszerűség kedvéért feltesszük, hogy a láncreakciót kiváltó neutronok ütközéseik során vagy abszorbeálódnak, és így kiesnek a reakcióból, vagy hasadás révén újabb neutronokat hoznak létre, amelyek továbbvihetik a reakciót. Az egy hasadási aktusban keletkező neutronok száma nem állandó, hanem véletlenszerű ingadozást mutat. Legyen w_k annak a valószínűsége, hogy egy hasadási aktusban éppen k darab neutron keletkezik; azaz legyen Prob $\{\xi = k\} = w_k$, ahol a ξ valószínűségi változó megadja az egy hasadási aktusban keletkező neutronok számát. Egyébként:

$$\sum_{k=1}^{\infty} w_k = 1 ,$$

és már most vezessük be az

$$f(x) = \sum_{k=1}^{\infty} w_k x^k \tag{15}$$

generátor-függvényt, amelynek $x = 1$ helyen vett deriváltjai fontos szerepet játszanak az elméletben, ugyanis

$$\left(\frac{df(x)}{dx}\right)_{x=1} = \sum_{k=1}^{\infty} k w_k = \nu_1 \tag{16}$$

az egy hasadási aktusban keletkező neutronok számának várható értékét, míg

$$\left(\frac{d^2 f(x)}{dx^2}\right)_{x=1} = \sum_{k=1}^{\infty} k(k-1) w_k = \nu_2 \tag{17}$$

a második momentumot adja meg. A fluktuációk kiszámításához magasabbrendű deriváltakra nem lesz szükség. Legyen $Q_f \Delta t + 0(\Delta t)$ annak a valószínűsége, hogy Δt idő alatt egy neutron abszorbeálódik, és $Q_f \Delta t + 0(\Delta t)$ pedig annak, hogy Δt idő alatt maghasadást okoz. Legyen továbbá a neutronok száma t időpontban $\zeta(t)$, és határozzuk meg a $\zeta(t)$ valószínűségi változó;

$$\text{Prob } \{\zeta(t) = n / \zeta(0) = 1\} = p_m(t) \tag{18}$$

eloszlásfüggvényét, amely megadja annak a valószínűségét, hogy $t < 0$ időpontban pontosan n

neutron legyen a rendszerben azon feltevés mellett, hogy $t = 0$ időpontban csak egy (úgynevezett indító) neutron volt benne. A $p_n(t)$ meghatározására szolgáló egyenletet abból a felismerésből származtathatjuk, hogy az indító neutron a $(0, t)$ időközben három, egymást kizáró eseményt válthat ki, amelynek valószínűségei egyszerűen összeadhatók. Ez a három esemény a következő:

— az indító neutron a $(0, t)$ időközben ütközést nem szenved, és így a t időpontban változatlanul csak egy neutron lesz a rendszerben;
— az indító neutron a $(0, t)$ időközben valahol abszorbeálódik, és így a t időpontban egyetlen neutron sem lesz a rendszerben;
— az indító neutron a $(0, t)$ időközben valahol, mondjuk a $(t', t' + dt')$ infinitézimálisan kis intervallumban, maghasadást okoz, és a keletkező neutronok a hátralévő $t-t'$ idő alatt egymástól függetlenül új reakcióláncokat indítanak el, amelyek a t időpontra éppen n számú neutront produkálnak.

Ennek alapján most már könnyen felírhatjuk a $p_n(t)$ eloszlásfüggvényt meghatározó egyenletet. Azt találjuk, hogy

$$p_n(t) = e^{-Qt}\delta_{n1} + \delta_{n0}Q_a \int_0^t e^{-Q_a t'}\,dt' +$$

$$+ Q_f \int_0^t e^{-Qt'} \sum_{k=1}^{\infty} w_k \sum_{n_1+\cdots+n_k=n} p_{n_1}(t-t')\ldots$$

$$\ldots p_{n_k}(t-t')\,dt', \qquad (19)$$

ahol

$$Q = Q_a + Q_f. \qquad (20)$$

Vezessük be a

$$g(t, x) = \sum_{n=0}^{\infty} p_n(t) e^{nx} \qquad (21)$$

formális generátor-függvényt. Segítségével a fenti egyenlet

$$g(t, x) = e^{-Qt+x} + Q_a \int_0^t e^{-Qt'}\,dt' +$$

$$+ Q_f \int_0^t e^{-Q(t-t')} f[g(t', x)]\,dt' \qquad (22)$$

alakba írható át, illetve differenciálegyenletté történő átalakítás után a következő formába:

$$\frac{\partial g(t, x)}{\partial t} = -Qg(t, x) + Q_a + Q_f f[g(t, x)]. \qquad (23)$$

Ez a nem-lineáris egyenlet képezi az alapját a hasadási láncreakció valószínűségszámítási elméletének, amelynek egy teljesen általános feltételek melletti változata 1958-ban került publikálásra. Ez az elmélet adott lehetőséget arra, hogy a reaktorok nukleáris zajából fontos dinamikai paraméterek meghatározhatók legyenek. Most itt csak nagyon vázlatosan utalunk ezekre a lehetőségekre.

Először számítsuk ki a neutronok számának várható értékét. Mivel ez a várható érték egyszerűen

$$\left(\frac{\partial g(t, x)}{\partial x}\right)_{x=0} = \langle \zeta(t) \rangle = n_1(t),$$

rövid számolás után azt kapjuk, hogy

$$n_1(t) = e^{-(1-\nu)Qt}$$

ahol

$$\nu = \nu_1 \frac{Q_f}{Q}. \qquad (25)$$

Ha $\nu < 1$, akkor a neutronok várható száma exponenciálisan csökken, ha pedig $\nu > 1$, akkor exponenciálisan nő. Tehát a $\nu = 1$ érték a kritikus, amelynél a neutronok várható száma állandó. A neutronok tényleges száma természetesen nem állandó, hanem ingadozik a várható érték körül. Derítsük fel ezeknek az ingadozásoknak a természetét. Mivel

$$\left(\frac{\partial^2 g(t, x)}{\partial x^2}\right)_{x=0} = \langle \zeta^2(t) \rangle = n_2(t)$$

a generátor-függvény egyenletből $n_2(t)$-re is levezethető a megfelelő egyenlet. Most csak az ingadozásokra jellemző szórásnégyzet kifejezését idézzük. Azt kapjuk, hogy

$$\langle [\delta\zeta(t)]^2 \rangle = n_2(t) - n_1^2(t) =$$

$$= \left(1 + \frac{Q_f}{Q}\,\frac{\nu_2}{1-\nu}\right) e^{-(1-\nu)Qt}[1 - e^{-(1-\nu)Qt}], \qquad (26)$$

amiből a $\nu = 1$ kritikus állapotra a

$$\langle [\delta\zeta(t)]^2 \rangle = \frac{\nu_2}{\nu_1} Qt \qquad (27)$$

kifejezés adódik, ami azt jelenti, hogy kritikus állapotban az idő előrehaladtával a várható érték körül egyre nagyobb fluktuációk alakulnak ki. Ezek a fluktuációk a valóságban mindig bizonyos határok közé szoríthatók megfelelő szabályzórendszerrel, amelynek hatására egyébként a kritikussági feltétel is csak átlagosan teljesül. Ami különösen fontos az az, hogy kritikus állapotban a fluktuációk instabilisak, és hogy ezekből a fluktuációkból meghatározható a hasadási aktusra jellemző ν_2 mennyiség.

Érdemes még megemlíteni, hogy $\nu < 1$ (szubkritikus) állapotban a fluktuációk;

$$t_{\max} = \frac{\log 2}{(1-\nu)Q}$$

időpontban érik el maximális értéküket.

Az eddigi meggondolások könnyen kiterjeszthetők külső neutronforrással ellátott rendszerekre is, azonban most ezzel az általánosítással nem foglalkozom. Inkább arra szeretnék még rámutatni, hogy a teljesítményreaktorokban kialakuló fluktuációk természete egészen más, mint az előzőekben tárgyalt fluktuációké. A döntő szerepet itt a

hűtőközeg homogenitásában, áramlásában fellépő ingadozások és a különféle véletlenszerű mechanikai mozgások játszák. Ezeknek a „technológiai" zajoknak a hatása csatolódik a nukleáris folyamatokhoz és a neutronfluxus ingadozásaiban azokon keresztül nyilvánul meg. Jogosan feltételezhetjük, hogy — megfordítva — a teljesítményreaktorok neutronfluxusának ingadozásaiból a technológiai zajok eredetére lehet következtetni, különösen, ha a neutronzaj vizsgálatokat akusztikai zajvizsgálatokkal kombináljuk.

Az utóbbi időben ezekre a vizsgálatokra a világon mindenütt nagy figyelmet fordítanak, és számomra külön öröm, hogy a Központi Fizikai Kutató Intézet munkatársai ezen a területen a kutatások élvonalában dolgoznak.

A GALAKTIKUS KOZMIKUS SUGÁRZÁS ANIZOTRÓPIÁJA

Gombosi Tamás, Kóta József,
Somogyi Antal, Varga András
KFKI

1. Bevezetés

A kozmikus sugárzás felfedezése óta több igen alapvető kérdés izgatja a fizikusokat és a csillagászokat. Talán a legfontosabb, legalapvetőbb kérdések a kozmikus sugárzás eredetének, terjedésének, összetételének, energiaspektrumának problémája.

A kozmikus sugárzás eredetéről, terjedéséről, Galaxisunk szerkezetéről nyújt igen fontos információt a kozmikus sugárzás anizotrópiája. Az eddigi mérések rendszerint csak felső határt tudtak megadni az anizotrópia mértékére.

Kézenfekvő a kérdés: ha olyan fontos a kozmikus sugárzás izotrópiájának, vagy ha tetszik anizotrópiájának vizsgálata, akkor miért nem mérték meg eddig? A válasz elég egyszerű, ti. a kozmikus sugárzás intenzitáseloszlása Földünk környezetében — durván szólva — nagyon izotróp. Az anizotrópia mértéke — kivételes esetektől eltekintve — 0,1% nagyságrendű. Az ilyen nagyságrendű effektusokat csak igen stabil berendezéssel, megfelelő eseményszám kimérése után lehetséges kimutatni. Nagyon lényeges az is, hogy milyen energiatartományban mérünk. $\sim 10^{11}$ eV energiáig a Naprendszer mágneses tere ugyanis „elkeni" az anizotrópiát, még akkor is, ha a valóságban van ilyen effektus, sőt olyan anizotrópiát is létrehoz, amely a Naprendszeren kívül nem létezik. Nagyon nagy energiatartományokban pedig (pl. $\sim 10^{15}$ eV felett), mivel a kozmikus sugárzás intenzitása az energia növekedésével nagyon erősen csökken, rendkívül nagy felületű észlelő-berendezésekre, illetve észszerűtlenül hosszú mérési időre lenne szükség ahhoz, hogy megfelelő statisztikus pontosságot érjünk el.

Kísérletünkben a $\sim 6.10^{13}$ eV primer energiájú kozmikus sugárzás irányeloszlását, vagyis az ilyen energiájú kozmikus sugárzás intenzitáseloszlását vizsgáltuk. Az ilyen energiájú kozmikus sugárzási részecskékre Naprendszerünk mágneses tere már nem hat, tehát ezek a részecskék a Galaxisban uralkodó intenzitásviszonyokat tükrözik, ugyanakkor még elég nagy az intenzitás ahhoz, hogy észszerű mérési idő alatt szignifikáns eredményt kapjunk.

Definiáljuk először az anizotrópia értékét. A kozmikus sugárzás anizotrópiáján (δ) a következő mennyiséget értjük:

$$\delta = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}};$$

I_{max} — az adott energiatartományban mért kozmikus sugárzási részecskék intenzitásmaximuma; I_{min} — az intenzitás minimumának értéke.

2. Mérési módszer

A feladatunk tehát: mérnünk kell valamilyen jól definiált energiaküszöb felett a kozmikus sugárzási részecskék intenzitáseloszlását a Galaxisban. A Bevezetésben említett energiatartományban, vagyis 10^{12}—10^{13} eV felett kapóra jönnek a kozmikus sugárzás kiterjedt légizáporai (KLZ). Az ilyen energiájú részecskék ugyanis elég ritkán érik földünket. Elvben a mérést mesterséges holdakon is végezhetnénk, ahol minden beérkező részecskének mérni kellene a beérkezési irányát és energiáját. Ehhez azonban gyakorlatilag megvalósíthatatlanul nagy észlelő felületre lenne szükségünk. Ha egy ilyen részecske bejut az atmoszférába, akkor az elemi kölcsönhatások sorozatán át nagyszámú, genetikusan kapcsolódó, gyakorlatilag egy síkban, csaknem fénysebességgel haladó részecskék keletkeznek, és a sík normálisa párhuzamos a primer részecske beérkezési irányával. (Pl. egy 10^{15} eV energiájú primer részecske keltette záporban, mire tengerszintre ér, kb. 10^5 részecske található.) A feladat tehát ezeknek a kiterjedt légizáporoknak a detektálása, pontosabban az időegység alatt beérkező KLZ-ok számának regisztrálása. A KLZ-okat rendszerint tengerszinten, vagy hegymagasságban elhelyezett berendezésekkel mérik, egymástól több méterre, néha több száz, vagy több ezer méterre elhelyezett részecskedetektorok koincidenciáinak regisztrálása útján.

Berendezésünket bolgár—magyar együttműködésben Bulgáriában, a Rila hegységben lévő Muszala csúcson létesített magashegyi kozmikus sugárzási mérőállomáson állítottuk fel 2925 m tengerszintfeletti magasságban. A berendezés négy, Geiger-Müller számlálócsövekből készített érzékeny felület négyes koincidenciába kapcsolásából áll. Egy-egy felület: 2,5 m², és a négy felületet egy 8 m × 8 m-es négyzet csúcsaiban helyeztük el. A négyes koincidencia egység akkor ad ki jelet, ha mind a négy felületben, felületenként legalább egy Geiger-Müller számlálócső két mikroszekundumon belül egyidejűleg megszólalt, vagyis töltött részecske áthaladását jelezte. Ezek a jelek egy telefonszámlálóra kerültek, és a számláló állását óránként fényképeztük. Ily módon megállapítható a 3 óránként beérkező KLZ-ok száma.

A mérés 1968 őszén kezdődött, és az 1973 végéig mért adatokat dolgoztuk fel. Óránként átlagosan 9000 KLZ-t észleltünk: a mérőberendezés 13 000 óra aktív mérési ideje alatt 114 millió KLZ-t regisztráltunk.

3. *Az adatfeldolgozás matematikai módszere*

A Muszalán végzett mérés technikája olyan, hogy a kozmikus sugárzás anizotrópiája csillagnapok szerint periodikus intenzitásváltozásokban jelentkezik benne. A változások amplitúdója igen kicsi, a százalék törtrészeivel fejezhető ki. Az intenzitásmérések pontosságának eleve határt szab a KLZ-ok véletlenszerű beérkezéséből származó Poisson hiba, de a fluktuáció, a mérőberendezés paramétereinek elkerülhetetlen ingadozásai miatt, nagyobb, mint a Poisson hiba. Az eltérés főképp hosszú időtartamú és nagy statisztikai pontosságú (kis Poisson hibájú) méréseknél lehet jelentős. Az anizotrópia meghatározását tovább nehezíti a földi légkör hatása a földfelszínen észlelt intenzitásra. Mindezen okok miatt rendkívül fontos, hogy megfelelő matematikai statisztikai módszereket alkalmazzunk a kozmikus sugárzás anizotrópiájának meghatározására. A módszerekkel szemben kettős követelmény támasztódik. Egyrészt a keresett paraméterekre torzítatlan becslést adjon, és helyesen adja meg a becsült értékek hibáit és korrelációs együtthatóit, másrészt a rendelkezésre álló mérési adatokból optimális, vagyis a lehető legpontosabb becslést adja.

A fenti követelmények elérésére a maximum-likelihood módszerét alkalmaztuk. A KLZ-ok intenzitása helyett célszerűbb az intenzitás logaritmusával számolni. A keresett amplitúdók kicsi volta ($< 0{,}5\%$) miatt, másodrendű tagok elhagyásával, az intenzitás időbeli változása a következő alakra írható:

$$\ln I(t) = \ln I_0 + B\Delta p + C\Delta T + \\ + \sum_{k=1}^{2} (a_k \cos k\omega t + b_k \sin k\omega t),$$

ahol I_0 az intenzitás átlagértéke a mérés időtartama alatt, Δp illetve ΔT a légnyomás illetve az atmoszféra hőmérséklet eltérése az átlagértéktől a t időpontban, B és C meghatározandó konstansok (az ún. meteorológiai együtthatók), $2\pi/\omega$ egy csillagnap hossza, a_1, a_2, b_1, b_2 a keresett Fourier amplitúdónak az átlagintenzitáshoz viszonyított relatív értékei.

A mért intenzitás azonban több, különböző, itt nem részletezhető oknál fogva szoláris napi és ún. anticsillagnapi periodicitást is mutathat (anticsillagnapon olyan időtartamokat értünk, amelynek a csillagnappal alkotott számtani közepértéke a szoláris napot adja). Ezek a „parazita" periodicitások — ha valóban léteznek — torzíthatják a csillagnapi periodicitást, sőt nemlétező csillagnapi periodicitást generálhatunk. Az általunk javasolt és első ízben alkalmazott eljárás lényegében kiküszöböli az ilyen típusú torzítást. Az eljárás lényegileg abban áll, hogy az intenzitásnak egyszerre mindhárom típusú (csillagnapi, szoláris, anticsillagnapi) periodicitásához tartozó amplitúdókat egyszerre, egy egyenletből kell meghatározni, vagyis az intenzitásváltozást a következő alakban kell írni:

$$\ln I(t) = \ln I_0 + B\Delta p + C\Delta T + \sum_{i=1}^{3} \sum_{k=1}^{2} \cdot \\ \cdot (a_{ik} \cos k\omega_i t + b_{ik} \sin k\omega_i t),$$

ahol $2\pi/\omega_1$, $2\pi/\omega_2$, $2\pi/\omega_3$ rendre a csillagnap, szoláris nap, anticsillagnap hossza, a_{ik}, b_{ik} pedig a hozzájuk tartozó első és második Fourier-együtthatók.

A fenti összefüggés alapján a maximum-likelihood módszerrel határoztuk meg az I_0, B, C, a_{ik}, b_{ik} paraméterek becsült értékét. Az adatfeldolgozás a KFKI ICT-1905-ös számítógépén történt egy kb. 15 programból álló programrendszer segítségével.

A B és C ún. „meteorológiai" együtthatókra a következő értékeket kaptuk: $B = -0{,}6833 \pm \pm 0{,}0036$ (% millibar^{-1}); $C = -0{,}2083 \pm 0{,}0042$ (% fok^{-1}), ezek jó egyezésben vannak az irodalmi adatokkal.

4. *Eredmények*

A szoláris napi, csillagnapi és anticsillagnapi első és második harmonikusok amplitúdóinak értékeit az 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat

	Első harmonikus amplitúdó %	második harmonikus amplitúdó %
csillagnapi	0,073±0,029	0,055±0,030
szoláris	0,019±0,029	0,048±0,030
anticsillagnapi	0,022±0,029	0,025±0,030

Kiszámítottuk a hullámok konfidencia szintjét, vagyis annak valószínűségét, hogy az adott hullám véletlenszerűen keletkezzék olyan Gauss-eloszlású mennyiségből, amelyben nincs csillagnapi, szoláris vagy anticsillagnapi periodicitás. A csillagnapi, szoláris és anticsillagnapi hullámok konfidencia szintjei rendre 0,06, 22 és 61%. Tehát szoláris és anticsillagnapi hullám nem mutatható ki az adatsoron (ha van ilyen, akkor amplitúdójuk kisebb a zajszintnél), a csillagnapi hullám létezése pedig bizonyítottnak tekinthető: amplitúdója több, mint háromszorosan haladja meg a zajszintet.

Az első és második harmonikus amplitúdói és fázisai alapján az 1. ábrán ábrázoltuk a csillagnapi hullámot. A fejtegetéseink elején definiált anizotrópiára méréseink alapján adható becslés az 1. ábráról leolvasható, nem más ez, mint a feltüntetett görbe csúcstól csúcsig mért ordinátakülönbségének fele, azaz 0,12%.

A 2. ábrán a folytonos görbe azokat a galaktikus irányokat mutatja, amerre a mérőberendezés síkjának normálisa mutatott, adott csillagidőben. A pontozott, illetve a szaggatott vonalú

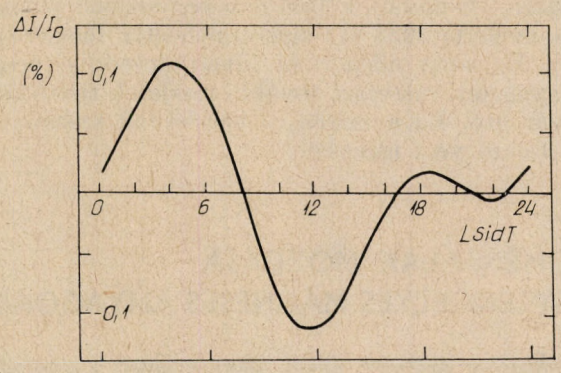
görbe jelzi a folytonos görbének azokat a részeit, ahonnan az átlagosnál nagyobb, illetve kisebb intenzitást észleltük. A folytonos görbe melletti számok a helyi csillagidőt mutatják. Az ábrán néhány csillagászatilag lényeges irányt is megjelöltünk. (Ap = a Nap apex-mozgásának iránya, Sp_{in} = a helyi galaktikus kar mentén befelé mutató irány, G_{rot} = a galaxis forgásának iránya, A_c = a galaktika centrumához mutató iránnyal ellenkező irány, rövidség kedvéért a galaktikus anticentrum irányának nevezik).

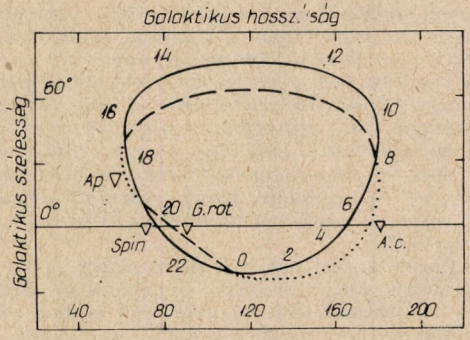
Ha figyelmesen megnézzük az 1. és a 2. ábrát, akkor a következőket állapíthatjuk meg:

a) 0 és 8 óra helyi csillagidő között az átlagosnál nagyobb intenzitást észleltünk, a maximum időpontja (4^h) körül kis galaktikus szélességek és a galaktikus anticentrum irányába nézett a detektor.

b) 8 és 16 óra helyi csillagidő között az átlagnál kisebb intenzitást észleltünk. Detektorunk ebben az időben (12^h tájban) a galaktikus északi pólus körüli nagy galaktikus szélességek irányába nézett.

c) a 16 és 24 óra helyi csillagidő között észlelt változások a zajszint alatt vannak.





5. *Következtetések*

A mérés által kimutatott anizotrópia létezéséből levonható legfontosabb következtetés a $\sim 10^{13}-10^{14}$ eV energiájú kozmikus sugárzás eredetére vonatkozik. Abban az esetben ugyanis, ha a részecskék többsége extragalaktikus eredetű lenne, az esetleges lokális fluktuációk révén $\sim 0{,}01\%$-os anizotrópia alakulhatna ki. Az ennél az értéknél lényegesen nagyobb anizotrópia egyértelműen arra mutat, hogy a vizsgált energiatartományban a kozmikus sugárzás nagy része galaktikus eredetű.

Mivel jelenlegi ismereteink szerint a kozmikus sugárzás galaktikus terjedésében a mágneses térnek meghatározó szerepe van, így az észlelt anizotrópia irányából és nagyságából néhány — a galaktikus tér szerkezetére vonatkozó — általános következtetést vonhatunk le.

Ismeretes, hogy a Nap a Galaktika ún. Orion karjának belső, a Galaktika középpontjához közelebb eső részén helyezkedik el, továbbá, hogy a mágneses tér a galaktikus karban erősebb, mint azon kívül. Feltételezve, hogy a kozmikus sugárzási részecskék terjedésük során a galaktikus mágneses erővonalakat követik, több elméleti modell arra a következtetésre jut, hogy a kozmikus sugárzás sűrűsége a galaktikus karban nagyobb, mint azokon kívül. Ebben az esetben a karban és külső térben uralkodó sűrűségkülönbség miatt fellépő, a karból kifelé irányuló diffúziós áram a megfigyeltnek nem ellentmondó nagyságú és irányú anizotrópiát okoz.

Az újabb vizsgálatok alapján több elméleti modell feltételezi, hogy nemcsak a kozmikus sugárzási részecskék, hanem maguk a mágneses erővonalak is véletlenszerű mozgást végeznek a galaktikus térben: statisztikusan közelednek egymáshoz, majd eltávolodnak, keverednek, mint egy tál mozgásban levő spagetti. Ilyen feltételezések mellett az egyes mérhető mennyiségek energiafüggésére is plauzibilis összefüggések adódnak, amelyek összhangban vannak a kozmikus sugárzás energiaspektrumának $\sim 10^{15}$ eV körül jelentkező megváltozásával.

A korábbi — sokkal rosszabb statisztikájú és így lényegesen pontatlanabb — mérések, valamint a Muszala eredmény alapján nem lehet kizárni, hogy a kozmikus sugárzás anizotrópiája a $10^{12}-10^{15}$ eV tartományban az energia 1/3 hatványával arányos. Ezt a feltételezést elfogadva és a Muszalán mért anizotrópiát felhasználva elméleti meggondolások alapján meghatározható a galaktikus mágneses tér ún. power spectruma, azaz a tér nem reguláris komponensének az egyes frekvenciákhoz tartozó súlyfüggvénye; azaz igen értékes információhoz jutunk a galaktikus mágneses tér szerkezetére vonatkozóan.

6. *Tervek*

A fentiekben a kozmikus sugárzás globális anizotrópiájára vonatkozó mérésünkről számoltunk be. Ha minden egyes regisztrált kiterjedt légizápor beérkezési irányát is meghatározzuk, akkor nemcsak globális, hanem lokális anizotrópiát is vizsgálhatunk. Ennek érdekében már megépítettünk egy másik anizotrópia-mérő berendezést a moszkvai Lebegyev Fizikai Intézet Magashegyi

Kutató Állomásán, a Tien-San hegységben (Alma-Ata mellett) 3333 m tengerszintfeletti magasságban. Egyrészt ellenőrizni kívánjuk eddigi eredményeinket, másrészt további részletek tisztázása is várható. Ez a mérés — becslésünk szerint — 2—3 évet vesz igénybe.

Irodalom

[1] A. J. Somogyi: Structure of irregular galactic magnetic fields. Nature, Vol. 255, No. 5511., 1975

[2] T. Gombosi, J. Kóta, A. J. Somogyi, A. Varga és mások: Anisotropy of cosmic radiation in the Galaxy. Nature, Vol. 255, No. 5511., 1975

DOMÉNFALAK MOZGÁSA EGYTENGELYES MÁGNESES ANYAGOKBAN

Zimmer György
KFKI Mágneses Osztály

A mágneses anyagok elemi momentumait a kicserélődési kölcsönhatás egymással párhuzamosra állítja be és ez erős mágneses polarizáció felléptére vezet. A mágnesezettségnek magának az irányát a külső mágneses tér és a mágneses anizotropia együttesen határozza meg. Van az anyagoknak olyan csoportja, amelyben a mágnesezettség spontán csak egyetlen iránnyal állhat párhuzamosan, vagy ellentetten párhuzamosan. Az ebbe a csoportba tartozó, ún. egytengelyes anyagok közül azok, amelyek anizontrópiája elég nagy és így a mágnesezettség még nem túl erős mágneses térben is biztosan csak „fel" és „le" orientációjú lehet, számítástechnikailag fontosak, mert természetes hordozói a 0 és az 1 információelemeknek.

A mágneses anyag erőteret csak akkor kelt, ha az elemi dipólusok sora valamiért — például az anyag felületén — megszakad. Az így keletkező szabad pólusok tere energiát hordoz, mégpedig annál nagyobbat, minél erősebb és minél nagyobb geometriai térrészt tölt ki. Az erővonal rövid úton történő záródását célozza az anyag doménekre bomlása. Az erősen anizotrop anyag átmágneseződése döntő módon a kétféle domén térfogatarányának megváltozásával, a doméneket határoló falak eltolódásával következik be. Ebben a közleményben a doménfalak mozgásáról próbálunk vázlatos képet adni.

Vékony lemezek doménszerkezete: buborékok és csíkok.

Erős egytengelyes anizotropiájú anyagból a könnyű irányra merőlegesen kivágott, vékony lemezben a mágnesezettség (a doménfalaktól eltekintve) mindenütt a lemez síkjára merőleges, és valamennyi domén a lemez egyik felületétől a másikig tart. A doménfalak a könnyű mágnesezés irányával — a z-tengellyel — párhuzamosak.

Legyen az igen nagy kiterjedésű, homogénen mágnesezett lemezben egy ellentétes mágnesezésű, henger alakú domén. A domén megjelenése energetikailag kedvező, mert a lemez felületéről kiinduló erővonalaknak legalább egy része a domén ellentétes előjelű felületi töltésén záródhat. A doménfal keletkezése ugyanakkor energiába kerül: ez az az ár, amelyet a lemágnesezési energia csökkenéséért az anyag fizetni kénytelen. A fizetség annál kisebb, minél kisebb a doménfal felülete: a falenergia a domént körhengerré alakítja ugyanúgy, ahogy az oldat felületi feszültsége gömbbé formálja a szappanbuborékot. Valóban, polarizációs mikroszkópban, ahol a mágneses anyag optikai aktivitását kihasználva ezek a domének láthatóvá tehetők, a kis hengerdomének megannyi buboréknak tűnnek. Innen származik a nevük is.*

* A buborékok mérete anyagi jellemzőkön kívül a mágneses tér nagyságától függ.

A külső mágneses tér jelentős csökkentésekor a buborékátmérő olyan nagy mértékben megnőhet, hogy a domén középső része már nagyon távol kerül a lapka többi részén levő, vele ellentétesen mágnesezett tartománytól és így az erővonalak záródása már egyáltalán nem rövid úton történik. Bizonyos méret felett kedvezőbb energiamérleghez vezet az, hogy a domén hengeres helyett hosszú csík alakú legyen. Igaz, ilyenkor területegységenként több a doménfal, de ez a befektetés bőven megtérül abból, hogy több erővonal képes rövid úton záródni.

A doménfalak szerkezete

Mivel a mágnesezettség a csíkdomén belsejében például felfelé, kívüle pedig lefelé mutat, kell legyen olyan tartomány, ahol elemi momentumok sem egymással, sem pedig az anizotrópia által kijelölt könnyű iránnyal nem párhuzamosak. Ebben az energetikailag kedvezőtlenebb térrészben — a doménfalban — az egymást követő atomsorok mágnesezettsége, mint a csigalépcső, fokozatosan fordul az egyik doménhez tartozó $+z$ irányból a $-z$ irányba. A doménfal vastagságát a kicserélődési és az anizotrópia energiák aránya szabja meg. A párhuzamosságra törekvő kicserélődési kölcsönhatás szempontjából kedvező, ha a csigalépcső egymást követő fokai kis szöget zárnak be egymással; ekkor azonban a 180°-nyi átforduláshoz sok atomsorra lesz szükség. Ezek mindegyike szöget zár be a könnyű iránnyal, tehát az anizotrópia-energia szempontjából az a kedvező, ha minél hirtelenebbül — kevesebb atomsoron át — bekövetkezik az átfordulás. Az ellentétes hatások egyensúlyaként kialakuló doménfal-vastagság

$$\pi\Delta = \pi\sqrt{\frac{A}{k}}$$

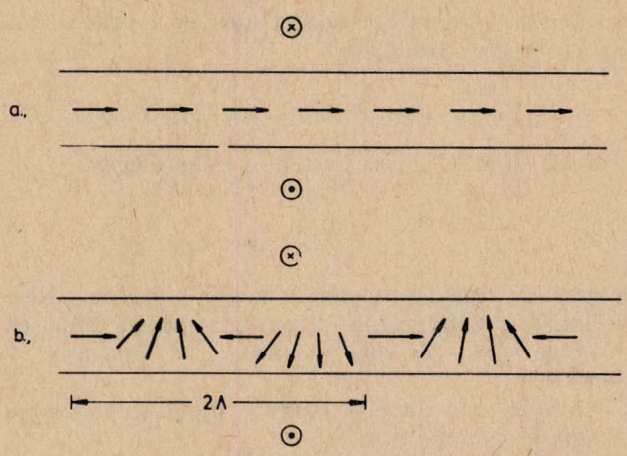
ahol A a kicserélődést, K az anizotrópiát jellemző-energiaállandó. A bennünket most érdeklő anyagokban Δ kb. 200—250 Å, vagyis mintegy ötven atomsornyi.

A fal energiája a legkisebb, szerkezete pedig a legegyszerűbb akkor, ha az egyik doménből a másikba vezető, a falra merőleges tengelyű csigalépcső fokai mindenütt párhuzamosak a falsíkkal. A „csigalépcsőt" a fal vastagsága és

egyetlenegy — célszerűen a fal közepén levő, a könnyű iránnyal éppen 90°-os szöget bezáró — mágneses momentum iránya már egyértelműen definiálja: az egyszerű szerkezetű falban (1. a. ábra) ezek a momentumok mindenütt azonos irányúak.

A csigalépcső jobb- és balmenetű egyaránt lehet. Az 1. b. ábrán ez úgy mutatkozik meg, hogy az ábra bal szélén álló mágneses momentum a balcsavarnak megfelelően balra, a közepén lévő pedig a jobbcsavarnak megfelelően jobbra mutat. A bal- és jobbcsavar között most a doménfal belsejében kell folytonos átmenetnek megjelennie. Az 1b.) ábrán két ilyen van, de valódi falban sokkal több lehet. Ennek megfelelően nagyon bonyolult szerkezetű doménfalak állhatnak elő: olyanok, amelyekben a fal síkja mentén haladva periodikus struktúra tapasztalható.

Az egyensúlyi periódus-hossz a bennünket érdeklő anyagokban 800 Å nagyságrendű, tehát a doménfalvastagság három-négyszerese (Az ábrán az arányok torzítottak.).



1. ábra. A felülnézetben ábrázolt egyszerű doménfal közepén a mágneses momentumok mindenütt azonos irányúak (a) ábra), bonyolult falban azonban (b) ábra) 2Λ periodicitással változó irányításúak.

A doménfalak mozgása

Az atomi mágneses momentumokat apró iránytűvel szokás szemléltetni. Ez az egyszerűsítés számunkra most túlzott: figyelembe kell vennünk, hogy a mikrovilágban a mágneses és az impulzusmomentum szorosan összekapcsolódik, kettejük aránya anyagi állandó.

A mágnesesség elemi építőkövei legalábbis mágnesezett tengelyű pörgettyűk, amelyekre a mágneses tér — mint földre helyezett búgócsigára a nehézségi erő — forgatónyomatékot gyakorol. Ha a függőlegessel (amelyet most válasszunk z-iránynak) Θ szöget bezáró mágneses momentumra például $+z$ irányba ható teret kapcsolunk, a mágneses momentum nem egyszerűen befordul a tér irányába, mint várnánk, hanem — a búgócsiga mintájára — a mágneses tér iránya körül kezdőhelyzete által meghatározott Θ nyílásszögű kúppalást mentén precessziós mozgásba kezd. Ennek során energiája nem változik, hiszen az csak a mágneses momentum és a z-tengely által bezárt szögtől függ. A precessziós mozgás szögsebessége a forgatónyomaték — tehát a mágneses tér — és anyagi állandók függvénye és nagyon gyors: két Oe mágneses térben a mágneses momentum másodpercenként körülbelül hárommilliószor kerüli meg a z-tengelyt.

Hogyan egyeztethető össze mindez azzal a tapasztalati ténnyel, hogy a mágneses momentum — mivel energetikailag legkedvezőbb helyzete a mágneses tér irányával párhuzamos — előbb-utóbb mégis csak beáll a tér irányába? Ha a tér bekapcsolásakor iránya ettől eltérő — tehát energiája magasabb — előbb-utóbb megszabadul az energiafeleslegtől. Erre a külső mágneses tér egymagában nem ad módot: a precessziós mozgás nem változtatja meg Θ-t és így a mágneses momentum energiáját. Persze, kiszemelt atomunk a környezetével bonyolult kölcsönhatásban van, a szomszédai lassan-lassan átveszik a felesleget, miközben a precessziós kúp nyílásszöge egyre csökken és végül nullává redukálódik.

Ahelyett, hogy az említett kölcsönhatások részleteit próbálnánk meg tisztázni, egyszerűen feltételezzük, hogy ezek az impulzumomentum változási sebességével párhuzamos és e sebesség nagyságával arányos effektív mágneses teret keltenek olyasféle módon, ahogy a viszkózus folyadékban mozgó testre hat a belső súrlódásból eredő fékező erő. Mivel a precesszió során a mozgás merőleges az őt létrehozó mágneses térre, ez a „viszkózus tér" is merőleges lesz rá (esetünkben tehát az XY síkba esik), s az e körüli precisszió már valóban a momentum és a z-tengely közötti szög megváltozására vezet. Ha a precessziós kúp nyílásszöge $\Theta = 90°$, a viszkózus tér erőssége

$$H_v = \frac{\alpha}{\gamma}\omega$$

ahol α a mágneses anyag „belső surlódását" jellemző, kísérletileg meghatározandó dimenziómentes paraméter: értéke a bennünket érdeklő anyagokban tipikusan 0,01. A precessziós mozgás szögsebességét ω-val jelöltük.

Amikor megfontolásainkat a doménfalak mozgására próbáljuk alkalmazni, először is azon csodálkozunk, hogy a $-z$ és $+z$ irányba mágnesezett doméneket elválasztó fal egyáltalán elmozdul z-irányú térben. Tegyük ugyanis fel, hogy ez a mozgás valahogy bekövetkezik. Egy kiszemelt atom, amely valamely időpillanatban éppen a mozgó fal előtt volt (és $-z$ irányban volt mágnesezve) hamarosan a felette elmozduló fal belsejébe kerül: momentuma a z-tengellyel 180°-tól eltérő szöget zár be. Még később a fal elhagyja a kiszemelt atomot, amely most már $+z$ irányban mágnesezett. Könnyű belátni, hogy atomunk mágneses momentuma precessziós mozgást végzett a z-tengelyre merőleges irány körül. Ha a $\pi\Delta$

vastagságú fal v sebességgel mozog, a precessziós szögsebesség közelítőleg

$$\omega = \frac{v}{\Delta}$$

Ennek előidézésére a z-tengelyre merőleges,

$$H_{\text{eff}} = \frac{v}{\gamma \Delta}$$

nagyságú mégneses térre volna szükség. Első pillanatban úgy tűnik: ilyen tér nincsen, tehát ez a precesszió — és vele együtt a fal mozgása — lehetetlen.

Inkább azt várnánk, hogy a falban levő összes mágneses momentum

$$\omega' = \gamma H$$

szögsebességgel a z-tengely (és nem egy arra merőleges irány) körül kezdjen precesszálni, s közben a fal maradjon a helyén.

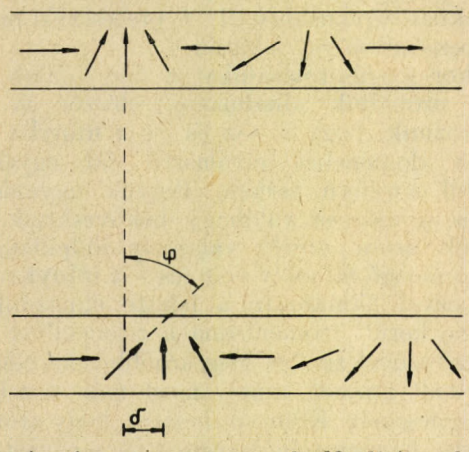
Ha a fal történetesen a 2. ábrán látható komplikált szerkezetű, ez a precesszió arra vezet, hogy a periodikus struktúra a fal síkjában eltolódik oldalirányba. Ezt az XY síkban folyó precessziós mozgást persze viszkózus tér fellépte is kíséri, ami a mágneses momentum változási sebességével párhuzamos lévén a z-tengelyre merőleges, nagysága pedig

$$H_v = \frac{\alpha}{\gamma} \omega' = \alpha H$$

De hiszen éppen ilyen térre van szükség ahhoz, hogy a fal előre mozogjon! A fal mozgási sebessége

$$V_k = \gamma H_{\text{eff}} \Delta = \gamma \Delta \alpha H$$

A komplikált szerkezetű fal a z-irányú külső H mágneses térrel arányos sebességgel valóban elmozdul, de ezt a mozgást H csak közvetve — a falszerkezetből adódó és a viszkózus fékezési erőn keresztül ható — bonyolult mechanizmus útján tudja előidézni.



2. ábra. A mágneses momentumok elfordítása a komplex falszerkezet oldalirányú eltolódásával ekvivalens.

Továbbra is nyitott kérdés: mi van, ha a fal szerkezete „egyszerű", hiszen ilyenkor mechanizmusunk nem működik.

Kísérjük végig, mi történik a mozgás során.

A nyugalomban levő falban a mágneses momentumok a z-tengelyt is magában foglaló, egymással párhuzamos síkokból álló síksereg egyes tagjaiban helyezkednek el, amelyek mindegyike szöget zár be a falnak magának a síkjával. A z-irányú mágneses tér bekapcsolásakor az összes mágneses momentum azonos

$$\dot{\varphi} = \omega = \gamma H_z$$

sebességgel precesszál. Ez a mozgás felfogható úgy, hogy maga a síksereg — a benne levő momentumokkal együtt — forog a z-tengely körül.

Könnyű meggyőződni arról, hogy mihelyt $\varphi > 0$ lesz, a doménfal belsejében levő mágneses momentumok alkotta dipólsor folytonossága megszakad és a doménfalon effektív mágneses töltések jelennek meg, mégpedig annál erősebbek, minél közelebb esik φ a 90°-hoz. E szabad töltések mágneses tere a doménfalra merőleges és $\varphi \neq 90°$ esetén a térnek van a síkseregre merőleges komponense is. Ez a komponens a doménfal mozgatásához szükséges precessziót idézi elő. A fal mozgási sebessége annál nagyobb, minél nagyobb a precesszió szögsebessége. Ezt azonban korlátozza az a tény, hogy semmilyen mágneses anyag sem kelthet saját mágnesezettsége révén $4\pi M$-nél nagyobb teret: világos tehát, hogy a fal mozgási sebessége korlátos. Mivel pedig a precessziós mozgást nem a fal felületén megjelenő pólusok teljes tere, hanem ennek csak a síkseregre merőleges vetülete hozza létre, nem a maximális póluserősség, hanem a vetület $\varphi = 45°$-nál jelentkező maximuma adja a legnagyobb sebességet, ami

$$V_{\max} = 2\pi M \Delta \gamma$$

Miközben φ a nyugalomhoz tartozó 0°-tól 45 fokig nő, a fal sebessége monoton megnövekszik nulláról $v_{\max}$-ra.

A φ változási sebességét meghatározó z-irányú teret egyrészt a H külső tér, másrészt pedig a doménfal-mozgást kísérő, z-re merőleges tengely körüli precesszió hatására ébredő

$$H_v = \frac{\alpha}{\gamma} \omega = \frac{\alpha}{\gamma} \frac{v}{\Delta}$$

viszkózus tér összege adja. H_v előjele olyan, hogy a $0 < \varphi < 90°$ között kialakuló sebességeknél H-t csökkenteni igyekszik. Mivel pedig $v \leq v_{\max}$

$$|H_v| \leq 2\pi M \alpha$$

A külső tér nagyságától függően két eset lehetséges. Ha a külső tér kisebb H_v lehetséges maximumánál, található olyan sebesség, amelyben

$$H_z = H - |H_v| = 0$$

Ez azt jelenti, hogy mihelyt φ elérte a szóban

forgó sebességhez tartozó értékét, precessziója a rá ható effektív térrel együtt nullává válik és a fal

$$V_e = \frac{\gamma \Delta}{H}$$

sebességgel egyenletes mozgást végez. Az egyszerű fal is képes tehát a H külső térrel arányos sebességű mozgásra, mégpedig sokkal gyorsabbra, mint a komplikált, hiszen látható, hogy

$$v_k = v_e \alpha^2$$

Lassú, nehézkes mozgása miatt szokás egyébként a komplikált szerkezetű falat keménynek is nevezni.

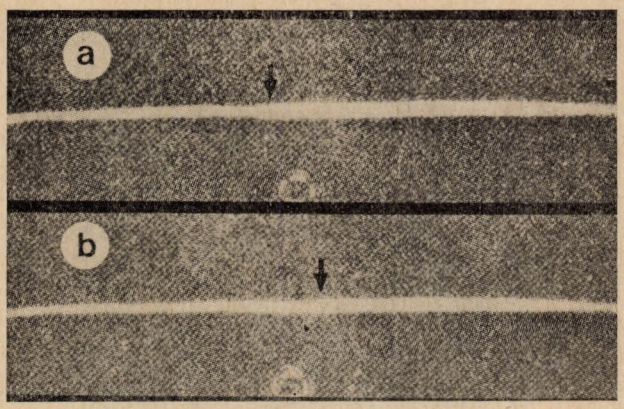
Bonyolódik a helyzet, ha $H > |H_v|_{max}$. Ilyenkor a mozgást kísérő viszkózus tér más semmiképpen sem képes kompenzálni a külső teret és φ változása soha sem állhat meg. A fal mozgási sebessége mindaddig nő, míg φ el nem éri a 45°-ot, ezután pedig csökkenni kezd és $\varphi = 90°$-nál, amikor a szabad pólusok terének a síkseregre merőleges vetülete nulla, ismét nullává válik. A φ szög azonban tovább nő: a vetület előjelet vált és a fal fordított irányú mozgásba kezd. Elkezd növekedni az a domén, amelynek mágnesezettsége ellentétes a külső térrel. A növekedés sebessége $\varphi = 180°$-nál ismét nullára csökken és az egész ciklus kezdődik elölről.

A viszkózus tér előjele a falmozgás sebességének előjelétől függ. Könnyű belátni, hogy míg pozitív sebességnél — ahogy láttuk — a külső teret csökkenteni igyekszik, a $90° \leqq \varphi \leqq 180°$ tartományban lezajló, fordított irányú mozgásnál éppen ellenkezőleg: növeli. Ennek folytán a precesszió az előre irányuló mozgás során lassúbb: tovább tart, amíg φ 0-tól 90°-ig eljut, mint amíg 90°-tól 180°-ig. A fal időben többet mozog előre, mint hátra, ciklusonként tehát — oszcillálva ugyan — de végeredményben előrejut valamennyit. A mozgás pillanatnyi sebessége H-tól magától független; ez csak a ciklus tartalmát befolyásolja. Ha H-t növeljük, a viszkózus tér járuléka egyre kevésbé lesz jelentős és így az előre- és hátrafelé irányuló mozgás időkülönbsége is csökken, úgyhogy a fal egyre kevesebbet és kevesebbet jut előre.

Az a furcsa eset áll elő, hogy nagyobb mágneses térben a doménfal lassabban mozog.

Néhány kísérleti eredmény

A doménfalak mozgásának vizsgálata sok évtizedes múltra tekinthet vissza, de a módszerek zöme alkalmatlan egyetlen doménfal egyszeri elmozdulásának követésére és így az adatok közvetettek és nehezen interpretálhatók. Mindössze néhány éve annak, hogy laserek felhasználásával sikerült olyan erős impulzus-fényforrást készíteni, amellyel a doménszerkezetet százmilliomod másodperces expozíciós idővel fényképezni lehet. Ilyen



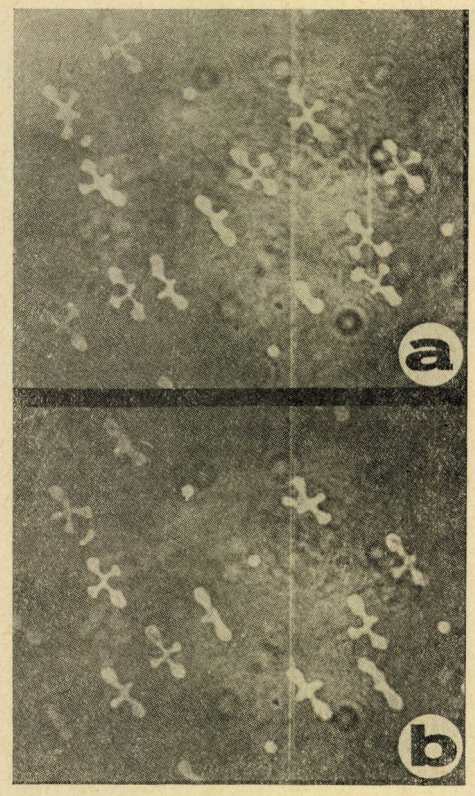
3. ábra. A felvétel a csíkdomént ábrázolja a mágneses tér csökkentése után $2 \cdot 10^{-7}$ mp-el az a) ábrán és $8 \cdot 10^{-7}$ mp-cel a b) ábrán. A szélesebb csíkrész egyszerű, a keskenyebb komplikált falu. A két falszerkezet találkozási pontját nyíl jelöli.

rövid idő alatt a doménfalak képtelenek számottevően elmozdulni, úgyhogy mozgó falakról is készíthető pillanatfelvétel-sorozat. Ezeken a képeken természetesen az egyedi doménfalak pillanatnyi tényleges helyzete rögzítődik és így a fal-elmozdulás közvetlenül nyomon követhető.

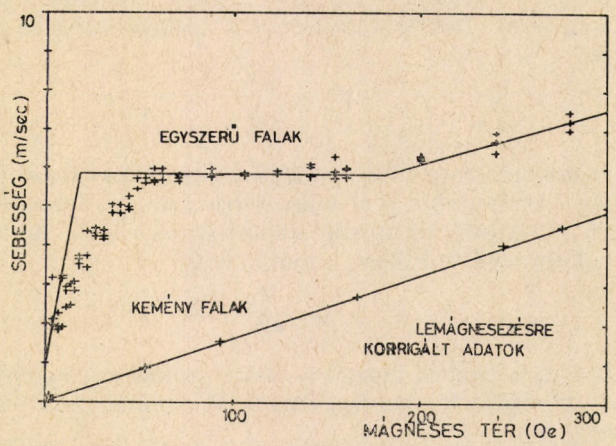
A 3. ábra ilyen gyorsfényképet mutat. A felvétel 2.10^{-7} mp-el azután készült, hogy a 70 Oe-es homogén mégneses teret 31 Oe-el lecsökkentettük. Ez azzal a következménnyel jár, hogy a csíkdomén szélessége igyekszik megnőni. Ott, ahol a csík már szélesebbnek látszik, gyors mozgású (egyszerű szerkezetű) doménfal található; ahol még alig vastagodott meg, lassan mozgó, kemény doménfal van. A nyíllal jelzett átmeneti tartomány az egyszerű és a komplikált szerkezetű falak találkozási helye. Ilyen felvételek sorozatának kiértékelése azt mutatja, hogy a komplikált szerkezetű falszakasz a csík-domén mentén nagy sebességgel eltolódik, a csík szélesedése pedig lassan történik meg.

Egyszerű és komplikált szerkezetű falak láthatók a 4. ábra felvételein is, de most egymástól elválasztva. Ezek a felvételek hengeres mágneses doménekről készültek 3.10^{-6} mp-el azután, hogy a 85 Oe-es mágneses teret pillanatszerűen 55 Oe-el lecsökkentettük. Azok a buborékok, amelyek fala egyszerű szerkezetű volt, gyors hízásnak indultak. Ezt az itt be nem mutatott korábbi fényképfelvételekből tudjuk. Hamarosan méretük olyan naggyá nőtt, hogy a mágneses energia szempontjából a torz doménalak előnyösebb volt számukra és az adott kísérleti körülmények között éppen ezt a propeller vagy madárka szerű alakot választották. Hosszú idő múlva — amelyet a kísérletekben nem vártunk meg — csíkdoménekké alakultak volna. A lassú mozgású, kemény falú buborékok ennyi idő alatt nem tudták elérni a torzuláshoz megkívánt méretet és továbbra is henger alakúak maradtak.

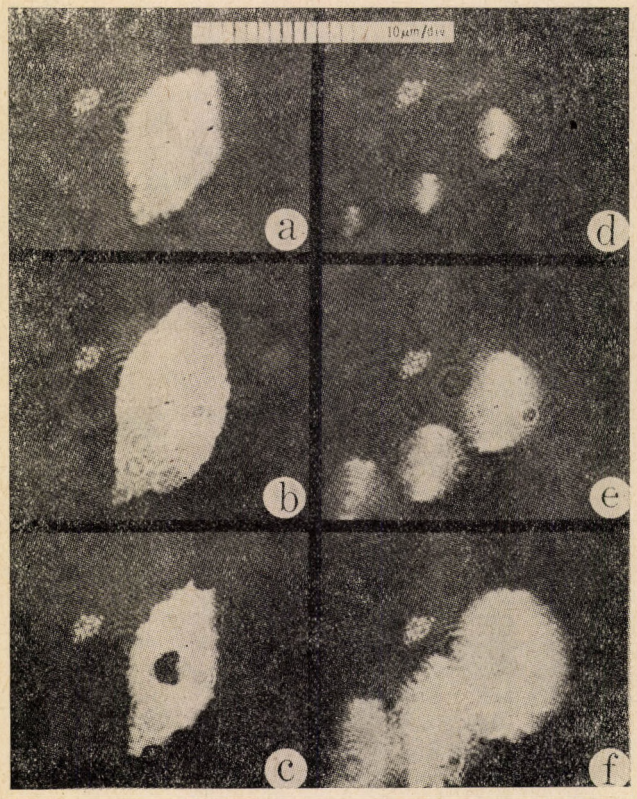
A 4. a. felvétel elkészítése után visszaállítottuk az eredeti, 85 Oe-es mágneses teret és megvártuk, amíg a domének visszanyerik hengeres alakjukat.



4. ábra. Buborékalakok $3 \cdot 10^{-6}$ mp-el azután, hogy a 85 Oe-es mágneses teret $3 \cdot 10^{-6}$ mp-re 55-Oe-el csökkentettük. Az a)—b) ábrák a kísérletet pontosan azonos körülmények között megismételve készültek. Látható, hogy középen egy „madárka" „tojássá" alakult.



5. ábra. Az egyszerű és kemény doménfalak sebességének függése a mágneses tértől. A kereszttel jelzett nyers adatokból a kísérleti körülmények figyelembevételével nyertük a folytonos görbét.



6. ábra. Doménfelvételek 1,4 (a), 2 (b) és 2,4 (c) mikromásodperccel egy 2 mikromásodperc hosszúságú, 180 Oe amplitúdójú mágnestérimpulzus bekapcsolása után. A d., e., f. ábrák az impulzus alatt készültek; az ábrán jobbról balra mutatható 50 Oe-es állandó tér is jelen volt a kísérletben. Az abnormálisan széles átmeneti tartományokra aligha alkalmazható a „doménfal" kifejezés.

Ennek a mozgásnak az érdekes részleteit most nincsen helyünk bemutatni. Amikor az előbbivel teljesen azonos módon a kísérletet megismételtük, a 4b) ábrán látható képeket kaptuk. A képek jellegükben teljesen hasonlóak ugyan, de jobban megfigyelve látható, hogy a képek közepe táján egy egyszerű falszerkezetű madárkából komplikált falú tojás keletkezett. Ez azt mutatja, hogy a doménfalak szerkezete a mozgás során megváltozhat: a folyamat részleteit csak további kutató munka fogja tisztázni majd. Annyi mindenesetre világos, hogy egy-egy váratlan felszerkezeti átalakulás a domének mozgásán alapuló bármilyen gyakorlati eszköz — például a buboréktároló — működését megzavarhatja, ezért a létrejöttében közrejátszó folyamatok tisztázása az eszközök megbízhatóságának növelését eredményezheti.

A csík- vagy buborékdomének méretváltozását az idő függvényében követve, könnyű meghatározni az egyes fal-elemek mozgási sebességét. Ha az így kapott adatokat a mágneses tér függvényében ábrázoljuk, az 5. ábrán látható görbére jutnk. A komplikált szerkezetű fal mozgási sebessége valóban arányos a mágneses térrel, ahogy vártuk, sőt, az arányossági tényező is közel esik az elméletből kapott értékhez. A gyorsabb — eddig egyszerű szerkezetűnek tekintett — fal sebességének tényleges értékei azonban távolról sem egyeznek az elméletiekkel. Van ugyan egy lineáris szakasz a görbe elején, de sem helyét, sem meredekségét tekintve közel sem áll ahhoz, amit az előzőekben elmondottak alapján várni lehetne. Nagyobb terekben a sebesség sem nem növekszik, sem nem csökken, hanem állandó marad, majd egészen erős mágneses térben ismét növeke-

désnek indul. Más mérésekből tudjuk, hogy a fal mozgása a mágneses tér pillanatszerű megváltoztatását követő egy-két százmilliomod másodpercben még gyorsabb és csak azután lassul le az itt megadott értékre. Mérési adataink teljesen közvetlenek: ezekben hibát keresni értelmetlen volna. Azt kell mondjuk, hogy legalábbis az itt bemutatott kísérleti körülmények között az „egyszerű" szerkezetű fal sem igazán egyszerű, valamint, hogy ennek a mozgásnak az elméleti értelmezése még várat magára.

A doménfalmozgás tárgyalásának természetes előfeltétele magának a jól definiált, vékony doménfalnak a léte. A 6. ábra felvételei azt mutatják, hogy bizonyos körülmények között — méghozzá akkor, ha a doméneket mágneses terek alkalmas kombinációjával nagyon gyors mozgásra kényszerítjük — a felfelé és a lefelé mágnesezett doméneket nem éles falak, hanem diffúz tartományok választják el egymástól. Az ábra felvételei a mágneses tér lecsökkentését követő különböző időpontokban készültek: a 6b) ábra például éppen akkor, amikor a mágneses tér értékét visszaállítottuk kiinduló értékére. Ekkor a világos domén növekedése csökkenésbe váltott, tehát a „doménfal" egy pillanatra megállt. Mint látható, a domént most — ahogy megszoktuk — éles körvonal határolja. Mihelyt azonban (6c) ábra) mozgás — ezúttal befelé — újból megindul, a „doménfal" azonnal diffúzzá válik megint. A d., e., f. ábrákon extrém szélességű diffúz „falat" eredményező kísérleti körülmények között készült felvételeket mutatunk be.

Összefoglalás.

Az egytengelyes mágneses anizotrópiájú vékony lemezek doménszerkezetét elméletileg és kísérletileg egyaránt jól ismerjük. A nyugvó doménfalak szerkezetéről közvetett kísérleti eredményekkel alátámasztott, elfogadható fizikai kép alakult ki. Bebizonyosodott, hogy ez a szerkezet a fal mentén periodikus struktúrát mutató „komplikált" és ilyen struktúrával nem rendelkező „egyszerű" lehet. Egyik változat sem képes a két lehetséges mágnesezettségirányú domén egyikét kitüntető mágneses tér közvetlen hatására elmozdulni. A „komplikált" szerkezetű fal mozgására vezető mechanizmus tisztázott: gyors fényképfelvételekkel nyert közvetlen információk alapján tudjuk, hogy a struktúra a fal síkjában oldalirányban gyorsan, a fal síkjára merőlegesen lassan mozog. A gyorsfényképezési technika közvetlenül igazolja azt is, hogy mozgás során falszerkezeti átalakulások következhetnek be. Az adatokból nyilvánvaló, hogy az „egyszerű" szerkezetű fal mozgásmechanizmusa tisztázatlan, a kísérletekkel szöges ellentétben álló elméleti következtetések adódnak, sőt, bizonyos körülmények között magának a doménfalnak a koncepciója is felülvizsgálatra szorul.

ATOMMAGOK CLUSTER SZERKEZETÉNEK VIZSGÁLATA NAGYENERGIÁJÚ PROTONOKKAL

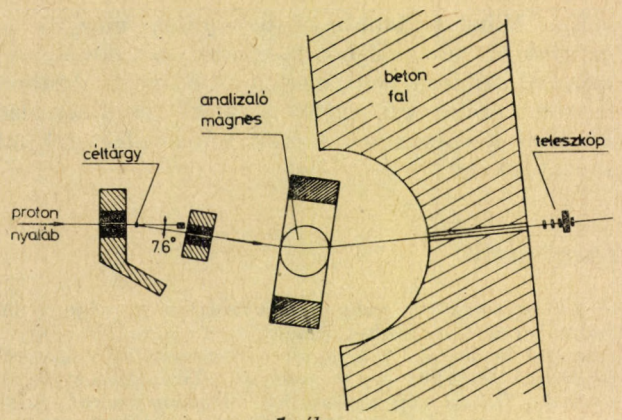
Erő János
KFKI Magfizikai Főosztály

Az ötvenes évek elején, amikor a szinkrociklotronok segítségével először sikerült létrehozni több száz MeV energiájú proton-nyalábot, nagy érdeklődés kísérte azokat a vizsgálatokat, amelyek ilyen nagyenergiájú részecskék atommagokkal való kölcsönhatásának tanulmányozására irányultak. A dubnai intézetben 670 MeV-es protonok kisszögű szórását vizsgálva érdekes jelenséget figyeltek meg. Azt tapasztalták, hogy a rugalmasan szórt protonok mellett olyan részecskék is megjelennek, amelyek impulzusa jelentősen meghaladja a primer protonok impulzusát. Az alapos vizsgálat eredménye az volt, hogy ezek a részecskék deuteronok és, hogy közel azonos energiával rendelkeznek.

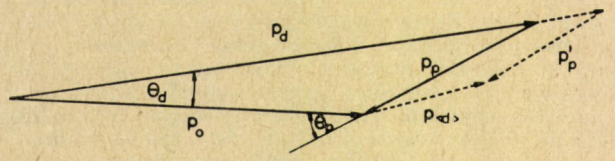
A kísérlet vázlatos elrendezése az 1. ábrán látható. A céltárgyból kilépő részecskék egy, a primer protonok irányához képest 7,6° alatt elhelyezett kollimátor után áthaladtak az analizáló mágnesen, amely azokat impulzusuk szerint szétválasztotta. Az adott impulzussal rendelkező részecskék detektálására több, egymás mögött elhelyezkedő szcintillációs számlálóból álló „teleszkóp" szolgált. A teleszkóp detektorai közé elhelyezett abszorbensek segítségével meg lehetett határozni a részecskék hatótávolságát, ennek alapján pedig — impulzusuk ismeretében — tömegükre lehetett következtetni. Az így azonosított deuteronok impulzus spektrumában 1600 MeV/c körüli értéknél egy jellegzetes csúcsot lehetett megfigyelni 80—100 MeV/c félszélességgel, amelynek helyzete első közelítésben független volt a target anyagától. A csúcs intenzítása meglehetősen kicsi volt, de jól különvált a rugalmasan szórt 1300 MeV/c impulzussal rendelkező protonok csúcsától, így létezését minden kétséget kizáróan meg lehetett állapítani.

A nagyenergiájú deuteronok eredetére abból a tényből lehetett következtetni, hogy impulzusuk csaknem megegyezik azzal, amivel a szabad deuteronokon történő rugalmas (p,d) szórás esetén a kis szögben szórt deuteronok rendelkeznek. Ez utóbbi esetben — amint azt a 2. ábra vastag vonallal kihúzott impulzusdiagramja is mutatja — a $p_0 = 1300$MeV/c impulzusú (670 MeV energiájú) primer protonok által meglökött deuteronok $\Theta_d = 7{,}6°$ alatt $p_d = 1600$ MeV/c impulzussal ($\sim$ 600 MeV energiával) haladnak. Ütközés után a protonok hátrafelé, $\Theta_p = 148°$ alatt szóródnak $p_p \approx 360$ MeV/c impulzussal, energiájuk pedig 65 MeV.

A szabad p-d szórásból származó és az atommagok bombázása során keletkező deuteronok közel azonos impulzusa arra enged következtet-



1. ábra



2. ábra

ni, hogy a bombázó protonok a magon belül egy protonból és neutronból álló, a szabad deuteronhoz hasonló képződménnyel jutnak kölcsönhatásba, amelynek során a rugalmas szóráshoz hasonló folyamat játszódik le. Ennek az elképzelésnek a realitását alátámasztja az a tény, hogy a bombázó protonok hullámhossza sokkal kisebb az atommag méreténél (1300 MeV/c impulzus kb. 1 $f = 10^{-13}$ cm hullámhossznak felel meg), ami lehetőséget ad arra, hogy az atommagnak egy kisebb részével jussanak csak kölcsönhatásba. Ugyanakkor energiájuk két nagyságrenddel nagyobb a nukleonok kötési energiájánál, így a szórási folyamatot a többi nukleon jelenléte csak kevéssé befolyásolja.

Ez a kvázi-rugalmas szórásnak nevezett folyamat elsősorban abban különbözik a szabad p-d szórástól, hogy a magon belül levő „deuteron" nem áll, hanem mozog a mag tömegközéppontja körül (impulzusa abszolút értékben megegyezik a maradék nukleonok együttes impulzusával). A belső mozgás azt eredményezi, hogy még a szabad szórás kinematikájának megfelelő szögekben is különböző impulzusú deuteronokat ill. protonokat lehet megfigyelni, attól függően, hogy az ütközés pilanatában mekkora volt a belső „deuteron" impulzusa. Ezt érzékeltetik a 2. ábrán szaggatott vonallal rajzolt impulzusok, ahol $p_{\langle d \rangle}$ a magon belüli „deuteron" impulzusa. A kísérletileg talált kiszélesedés megfelel annak a belső impulzuseloszlásnak, ami egyszerű becslések alapján — például a $\Delta p \cdot \Delta x \geq \hbar$ bizonytalansági relációban Δx helyébe a mag méretét helyettesítve — várható. Vegyük még figyelembe, hogy a teljes csúcsra integrált hatáskeresztmetszet — legalább is nagyságrendileg — megegyezik a p-d szórás hatáskeresztmetszetével és akkor kevés kétség marad a tekintetben, hogy a deuteronok valóban az említett kvázi-rugalmas szórási folyamatból származnak.

Az első kísérletek után hosszú ideig nem folytattak vizsgálatokat a jelenség pontosabb megismerése céljából, ez a probléma a hatvanas évek közepén került újra az érdeklődés előterébe. A Brookhavenben működő Cosmotron segítségével 1967-ben ismételték meg a dubnai kísérletet valamivel nagyobb , 1 GeV energián és fejlettebb kísérleti technikával. A hatáskeresztmetszet szögeloszlásának, a targetmag tömegszámától való függésének meghatározásán túlmenően egy alkalommal —, szén target esetén — kimutatták a deuteronokkal koincidenciában megjelenő, hátrafelé szórt protonok jelenlétét is.

Ez idő tájt Dubnában is felújították a korábbi vizsgálatokat. Kimutatták többek között , hogy a magon belüli „deuteronon" a protonok nem csak rugalmas szórást szenvedhetnek, hanem bekövetkezik például a $p + d \rightarrow {}^3He + \pi^\circ$, vagy a $p + d \rightarrow {}^3H + \pi^+$ szabad folyamatoknak megfelelő π-mezon képződés is. Ez, és az a megfigyelés, hogy a ${}^3H$ és ${}^3He$ részecskék impulzusspektrumában megjelennek a kvázi-rugalmas szórásnak megfelelő csúcsok is, még nyilvánvalóbbá teszi, hogy az atommag belsejében egész nukleon csoportok tudnak a nagyenergiájú protonokkal kölcsönhatásba jutni, oly módon, mintha szabad részecskék lennének.

A cluster modell

Az említett nagyenergiás kísérletek interpretálása szinte kikényszerítette azt a feltételezést, hogy az atommagok belsejében különböző nukleon asszociációk (deuteron, triton, α-rész szerű képződmények) léteznek. Ez a gondolat más jelenségek alapján is plauzibilisnek látszott. Az a tény például, hogy bizonyos gerjesztett állaptokból az atommag sokkal nagyobb valószínűséggel emittál egy összetett részecskét, mint egy egyedülálló nukleont, szintén a magon belüli nukleon asszociációk létére utal, de ezt az elképzelést támasztják alá azok az ún. transzfer reakciók is, amelyek során például a bombázó részecske egész nukleon csoportokat vesz át nagy valószínűséggel a targetmagból. Vannak olyan speciális magreakciók, amelyek létrejöttét szinte meg sem lehetne magyarázni a maganyagban korrelált mozgást végző nukleonpárok létezésének feltételezése nélkül. A lassú π^- mezon például egy protonon nem tud abszorbeálódni, mert nem biztosítható az impulzus megmaradása. Nagy valószínűséggel következik be azonban az abszorbció atommagok belsejében, amikor is két nagyenergiájú, ellentétes irányban haladó neutron megjelenése tanúskodik arról, hogy a folyamatban egy proton-neutron pár együttesen vett részt.

A fenti, és azokhoz hasonló más megfigyelések alapján kialakult a meggyőződés, hogy az atommag nukleonjai szubstruktúrákat képesek alkotni, amelyek szerkezete hasonló a szabadon is előforduló kisebb tömegszámú magokéhoz. Ezeket a képződményeket clustereknek (= csoportosulás, cső-

dület) nevezték el, és feltételezésükkel egyszerűen lehetett megmagyarázni egyes atommagok alapállapotának és több gerjesztett állapotának tulajdonságait. A ^{6}Li mag például jól leírható, mint egy α-rész és egy deuteron, a ^{7}Li mint egy α-rész és triton, a ^{8}Be mint két α-rész, a ^{12}C mint három α-rész együttese. Különösen kézenfekvő az α-rész clusterek létezésének feltételezése, hiszen ez a részecske — mint ismeretes — igen nagy kötési energiával rendelkezik, várható, hogy négy nukleon számára a mag belsejében is energetikailag kitüntetett az az állapot, amikor α-részhez hasonló struktúrát alkotnak. Ez a meggondolás vezetett például a magfizika kezdeti időszakában az ún. α-rész modell megalkotásához is.

Az atommagok cluster szerkezetére vonatkozó elképzelés igen vonzó mind egyszerűsége, mind szemléletessége folytán, ezzel magyarázható, hogy jelentős munkát végeztek ennek az elképzelésnek elméleti megalapozására, az ún. cluster-modell kidolgozására. Ennek a modellnek az atommag korrekt, kvantummechanika leírásán kell alapulnia és szakítania kell azzal a lényegében klasszikus képpel, amit eddigi meggondolásaink során alkalmaztunk, a nukleonokat apró, egymástól megkülönböztethető golyócskáknak képzelve, amelyek clusterekbe tömörülnek, és így mozognak a többi golyócskához, vagy más clusterekhez képest.

A valóságban az atommag egy kvantummechanikai rendszer, a nukleonok a magon belül nincsenek lokalizálva, hullámfüggvényük kiterjed az egész magra, ezen túlmenően — lényeges eltérésként a klasszikus részecskéhez képest — egymástól nem lehet őket megkülönböztetni. Ennek megfelelően az egyes clusterek sem különböztethetők meg egymástól, hullámfüggvényeik egymást átfedik és azt sem lehet meghatározni, hogy a mag melyik nukleonja tartozik az illető clusterhez. Amikor tehát clusterekről beszélünk, valamilyen dinamikus képre kell gondolnunk, amely szerint egy cluster létrehozásában kisebb-nagyobb súllyal az összes nukleon részt vesz.

A cluster képpel kapcsolatos további probléma, hogy látszólag ellentmondásban van a héjmodellel. A héjmodell — mint ismeretes — legegyszerűbb formájában úgy tárgyalja a nukleonok mozgását, mintha azok egymástól függetlenül mozognának egy együttesen kialakított közös potenciáltérben. Az egyszerű elképzelés ellenére a héjmodell jól írja le az atommagok számos tulajdonságát éppen a könnyű magok tartományában, ahol a fentiek során egy olyan cluster szerkezet kialakulását valószínűsítettük, ami a nukleonok erősen korrelált mozgását tételezi fel.

A két modell közötti ellentét feloldását jól érzékelhetjük az egyszerű felépítésű ^{6}Li mag példáján. A héjmodell értelmében ennek a magnak két protonja és két neutronja a legalacsonyabb energiájú $1s$ nívón helyezkedik el, és ily módon zárt héjat alkot. A fennmaradó egy-egy proton és neutron a Pauli elv értelmében a következő, 1p nívóra kerül, ahol mozgásuk gyakorlatilag független a zárt héjban levő nukleonoktól.

Könnyen belátható, hogy a p nívón $l = 1$ pályanyomatékkal rendelkező két nukleon olyan mozgást végez, hogy eredő pályanyomatékuk zérus ($L = 0$), spinjük párhuzamos ($S = 1$), töltésállapotuk pedig $T = 0$ izospinnel jellemezhető. Energetikailag ugyanis az a kedvező, ha az eredő hullámfüggvény helytől függő része szimmetrikus, ami megvalósul, ha a két nukleon pályanyomatéka $L = 0$ eredővé csatolódik össze. Nagyobb kötési energiát jelent az is, ha a két nukleon spinje egyirányba mutat, mert a tapasztalat szerint ilyen esetben erősebb a nukleonok közötti vonzás. Ezek után a rendszer izospinje már csak $T = 0$ lehet, mert a Pauli elv az eredő hullámfüggvény antiszimmetriáját követeli meg az L, S és T változók felcserélésével szemben, és ez a szimmetrikus $L = 0$ és az ugyancsak szimmetrikus $S = 1$ hely ill. spinfüggvények esetén csak az antiszimmetrikus $T = 0$ izospin-állapottal valósítható meg.

Következő kérdésünk ezek után az, hogy egy ilyen $L = 0$, $S = 1$, $T = 0$ kvantumszámokkal jellemzett állapotban a két nukleon hogyan mozog egymáshoz képest. Erre választ egy koordináta transzformáció segítségével kaphatunk. Be kell vezetni a két nukleon $\mathbf{r}_1$ ill. $\mathbf{r}_2$ helyzetkoordinátája helyett az $\mathbf{r} = \mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2$ relatív koordinátát és a két nukleon tömegközéppontját megadó $\mathbf{R} = (\mathbf{r}_1 + \mathbf{r}_2)/2$ változót. A hullámfüggvény $\mathbf{r}$-től való függése nyilván a két nukleon relatív mozgását, míg az $\mathbf{R}$ függés a két nukleonból álló rendszer együttes mozgását írja le. A transzformáció oszcillátor potenciál esetén viszonylag könnyen elvégezhető, eredményül az adódik, hogy az alapállapoti hullámfüggvényben a relatív mozgást 1 S, a tömegközéppont mozgását pedig 2 S állapotú hullámfüggvény adja meg.

Ebből azonnal látható, hogy a ^{6}Li mag két külső nukleonja olyan rendszert képez, ami nagyon hasonlít a szabad deuteronhoz. A hullámfüggvény helykoordinátáktól függő részében mindkét esetben az 1 S állapot dominál, a teljes spin $S = 1$, az izospin pedig $T = 0$. Különbség csupán a hullámfüggvény radiális eloszlásában várható, hiszen a potenciál alakja eltérő a két esetben. A fentiek során természetesen számos elhanyagolással, közelítéssel éltünk, ezek a közelítések azonban a lényegen nem változtatnak, legfeljebb a hasonlóság mértékét befolyásolják. Ez a hasonlóság úgy is megfogalmazható, hogy a ^{6}Li hullámfüggvényében igen nagy súllyal szerepel a szabad deuteronnak megfelelő komponens. Ennek természetes következménye, hogy minden olyan mérés, ami alkalmas arra, hogy a mag hullámfüggvényéből „kiszűrje" a deuteron állapotot — mint amilyen például a kvázirugalmas szórás — a ^{6}Li esetében arra nagy valószínűségi értéket fog szolgáltatni.

Ugyanerre az eredményre jutunk azonban akkor is, ha a cluster modell alapján végezzük a számításokat. Ennél a modellnél abból a mondhatni intuitív úton megsejtett feltevésből indulunk ki, hogy a ^{6}Li hullámfüggvénye úgy írható le, mint egy α-részecske, egy deuteron és a kettő

relatív mozgását megadó hullámfüggvény szorzata. Ez lényegében azt jelenti, hogy a héjmodellben használt $\mathbf{r}_1$ és $\mathbf{r}_2$ individuális részecskekoordináták helyett már kezdettől fogva az $\mathbf{r}$ relatív és a $\mathbf{R}$ tömegközéppont koordinátákkal történik a számítás. Természetesen ez a közelítő hullámfüggvény csak a számítások kiindulópontját jelenti, ebből létre kell hozni egy, a nukleon koordináták felcserélésével szemben antiszimmetrikus függvényt. A számítások eredményeképpen kapott megoldás — ha a deuteron és az α-rész belső potenciáljára és a relatív mozgásukat meghatározó potenciálra ugyanazt az oszcillátor potenciált tételezzük fel, mint amit a héjmodellnél használtunk — minden tekintetben ekvivalens a héjmodell esetében nyert megoldással.

A héjmodell és a clustermodell tehát ugyanannak a problémának más szemszögből, mintegy más „koordinátarendszerből" való megközelítése. Hogy mikor érdemes a cluster modellt alkalmazni, az attól függ, hogy a vizsgált magállapotban mennyire várható egy bizonyos cluster szerkezet domináló jellege. Ha ez a jelleg erős, akkor a cluster függvény a valódi hullámfüggvénynek jó közelítése lesz, és a megoldás egy-két paraméter módosításával könnyen pontosítható. Az így nyert viszonylag egyszerű és jól áttekinthető cluster függvény igen alkalmas olyan kísérletek interpretálására, amelyeknél a clustert képező nukleonok főszerepet játszanak a folyamat során.

A síkhullámú impulzus-közelítés

A bevezetésben tárgyalt kvázi-rugalmas szórás —, vagy más elnevezéssel nagyenergiájú knock-out reakció — egy olyan ún. direkt magfolyamat, amelynek során az összes nukleonoknak csupán egy kis része vesz részt a kölcsönhatásban. Próbáljuk először a klasszikus kép alapján megvizsgálni, hogy milyen információkat nyerhetünk egy ilyen magreakcióból.

Ha az A tömegszámú targetmagban kialakul egy deuteron cluster, akkor ez és a maradék (A-2) darab nukleon a mag súlypontja körül úgy fog mozogni, hogy a cluster és a maradék mag impulzusa mindig azonos nagyságú, de ellentétes irányú lesz:

$$\mathbf{q} = -\mathbf{p}_M \qquad (1)$$

(itt $\mathbf{q}$ a deuteron cluster magon belüli impulzusát, $\mathbf{p}_M$ a maradék mag impulzusát jelenti). Feltételezzük, hogy amikor a nagyenergiájú proton kölcsönhatásba jut a clusterral, a többi nukleon mozgásállapotában nem következik be változás és a kölcsönhatás ugyanúgy játszódik le, mintha a cluster egy szabad deuteron lenne. Ez az ún. impulzus-közelítés akkor indokolt, ha a bombázó részecske impulzusa jóval meghaladja a cluster belső impulzusát, energiája pedig a szeparációs energiát. Több száz MeV energiájú protonokkal való bombázás esetén ezek a feltételek messzemenően teljesülnek.

A reakció során természetesen ki kell elégülni az impulzus és az energia megmaradás törvényének. Mivel a végállapotban három részecske jelenik meg, a deuteron, a szóródott proton és a maradék mag, az impulzusmegmaradást az alábbi egyenlet fejezi ki:

$$\mathbf{p}_0 = \mathbf{p}_p + \mathbf{p}_d + \mathbf{p}_M \qquad (2)$$

Látjuk ebből, hogy ismert bombázó impulzus ($\mathbf{p}_0$) esetén a deuteronok $\mathbf{p}_d$ és a protonok $\mathbf{p}_p$ impulzusának megmérése útján meghatározhatjuk a maradék mag $\mathbf{p}_M$ impulzusát, ami egyébként a kis visszalökési energia miatt közvetlenül általában nem mérhető meg. Az impulzus közelítés feltételezése szerint ez az impulzus megegyezik azzal az impulzussal, amivel a deuteron cluster rendelkezett az ütközés pillanatában, végeredményeben tehát a cluster magon belüli mozgására nyerünk információt.

Az energiamegmaradás tételét a következő alakban írhatjuk fel:

$$T_0 = T_p + T_d + T_M + E_g - Q \qquad (3)$$

Itt T-vel az egyes részecskék kinetikus energiáját jelöljük, Q a kezdő és a végállapotban jelen levő részecskék nyugalmi tömegének különbségéből adódó reakció energia, E_g pedig a maradék mag gerjesztési energiája, ha az a reakció során nem alapállapotban keletkezett. Mivel a részecskék impulzusának ismeretében energiájuk kiszámítható, $\mathbf{p}_d$ és $\mathbf{p}_p$ mérése arra is lehetőséget ad, hogy meghatározzuk a maradék mag gerjesztési energiáját. Végül, ha megmérjük a reakció hatáskeresztmetszetét is, és összehasonlítjuk a szabad deuteronon való szórás hatáskeresztmetszetével, felvilágosítást kaphatunk az atommagban kialakuló deuteronok számáról. Ez utóbbi információ természetesen csak akkor fogadható el, ha a bombázó részecske és a reakciótermékek nem szenvednek lényeges abszorbciót az atommag belsejében, ami a kvantummechanika nyelvén azt jelenti, hogy a szabad részecskék mozgását leíró síkhullámok nem torzulnak el jelentős mértékben a mag belsejében. Ezért is nevezik a probléma ilyen megközelítését síkhullámú közelítésnek.

A magreakciók kimerítő elméleti tárgyalása természetesen csak a kvantummechanika keretében történhet. A fent említett közelítések, nevezetesen a bemenő és kimenő részecskéket leíró, a mag potenciálterében eltorzult hullámoknak síkhullámmal való helyettesítése, a kölcsönhatásnak a szabad proton—deuteron rendszerben fennálló kölcsönhatással való helyettesítése, vagyis a síkhullámú impulzus közelítés alkalmazása leegyszerűsíti a számításokat, és jól áttekinthető eredményre vezet.

A reakció hatáskeresztmetszetét a T_{if} átmeneti mátrixelem négyzete adja meg, amely a kölcsön-

hatási potenciálon kívül a kezdőállapot ψ_i és a végállapot ψ_f hullámfüggvényét tartalmazza:

$$T_{if} = \int \psi_f^* V \psi_i \, d\xi \tag{4}$$

ahol ξ a reakcióban szereplő összes nukleon koordinátáit jelöli, ψ_i a targetmag $\psi_A(\xi_A)$ hullámfüggvényének és a bombázó protont reprezentáló síkhullámnak a szorzata, ψ_f pedig a maradék mag $\psi_{A-2}(\xi_{A-2})$ és a deuteron $\psi_d(\xi_d)$ hullámfüggvényén kívül a szórt proton és a deuteron tömegközéppontjának mozgását leíró síkhullámokból áll.

Látható, hogy az átmeneti mátrixelem meghatározása egy sokdimenziós integrál kiszámítását igényli. A különböző közelítő feltevések célja éppen ennek a bonyolult feladatnak az egyszerűsítése, alacsonyabb rendű integrálokra való redukálása. Ha feltételezzük például, hogy a kölcsönhatás csak a primer proton és a targetmag két nukleonja között lép fel, akkor a többi nukleon ξ_{A-2} koordinátája szerint az integrálás külön elvégezhető, és a kölcsönhatástól független, csupán a targetmag szerkezetére jellemző értéket szolgáltat:

$$I_1 = \int \psi_{A-2}^* (\xi_{A-2}) \, \psi_A(\xi_A) \, d\, \xi_{A-2} \tag{5}$$

Ez a magspektroszkópiai információ megadja, hogy a targetmag hullámfüggvénye milyen mértékben tartalmazza a maradék mag azon gerjesztett állapotának megfelelő hullámfüggvényt, amelyben az a reakció során keletkezett. Igen egyszerűen számítható ki az (5) integrál a clustermodell alapján, mert ekkor ψ_A-ról feltételezzük, hogy a maradék mag ψ_{A-2} a deuteron ψ_d és a kettő relatív mozgását leíró $\Phi(R)$ hullámfüggvények szorzataként áll elő, így a ξ_{A-2} koordinátákra való integrálás csupán egy konstans faktort eredményez:

$$I_1' = C \, \psi_d(\xi_d) \, \Phi \, (R) \tag{5'}$$

A (4) mátrixelem kiszámításához hátra van még a proton, és a kölcsönható két nukleon koordinátáira való integrálás. Célszerű áttérni a részecskék relatív helyzetét jellemző koordinátákra: ξ_d a két nukleonból álló cluster belső koordinátája, $\mathbf{R}$ a cluster súlypontjának helye, $\mathbf{r}$, pedig a proton relatív helyzete a cluster súlypontjához viszonyítva: $\mathbf{r} = \mathbf{r}_p - \mathbf{R}$. Ha a cluster modellel számolunk, akkor nem jelent nehézséget a ξ_d belső koordinátákra való integrálás, hiszen a deuteron ψ_d hullámfüggvénye egyaránt szerepel a végállapoti hullámfüggvényben és az (5') kifejezésben, a $\int \psi_d^* \psi_d \, d\xi_d$ integrál tehát ez esetben is egy konstans tényezőt szolgáltat. Az $\mathbf{r}$ és $\mathbf{R}$ koordinátákra való integrálást illetően ugyancsak leegyszerűsödik a probléma. Ha a proton mozgását leíró síkhullámok $e^{\frac{i}{\hbar} \mathbf{p} \mathbf{r}_p}$ alakú kifejezésében elvégezzük az $\mathbf{r}_p = \mathbf{r} + \mathbf{R}$ helyettesítést , és figyelembe vesszük, hogy a kölcsönhatási potenciál az $\mathbf{r}$ relatív koordinátától függ, akkor az átmeneti mátrixelemre az alábbi kifejezést kapjuk:

$$T_{if} \sim \int V(r) e^{\frac{i}{\hbar} (\mathbf{p}_0 - \mathbf{p}_p) \mathbf{r}} d\mathbf{r} \cdot \int e^{\frac{i}{\hbar} \mathbf{q} \mathbf{R}} \Phi(\mathbf{R}) d\mathbf{R} \tag{6}$$

ahol $\mathbf{q} = \mathbf{p}_d + \mathbf{p}_p - \mathbf{p}_0 = -\mathbf{p}_M$ a clusternak a targetmagon belüli impulzusa.

A (6) kifejezésben az első integrál nem más, mint a protonnak a deuteron clusteron bekövetkező szóródását leíró, a szabad p-d szóráséval azonosnak tekinthető mátrixelem. A második integrál a cluster belső mozgásával van szoros kapcsolatban, és nem más, mint a $\Phi(\mathbf{R})$ hullámfüggvény Fourier-transzformáltja.

Összefoglalva tehát a síkhullámú impulzusközelítéssel végzett számítások eredményét, azt látjuk, hogy a nagyenergiájú knock-out reakciók hatáskeresztmetszete arányos a szabad p-d szórásával, a maradék mag különböző gerjesztett állapotaira vezető folyamatok valószínűsége szoros kapcsolatban van a targetmag belső szerkezetével, végül a $\mathbf{q}$ belső impulzus függvényében megadott differenciális hatáskeresztmetszet a cluster relatív mozgását leíró hullámfüggvény Fourier-transzformáltjának a négyzete.

Nagyenergiás knock-out reakció kísérleti vizsgálata.

Láttuk az előzőek során, hogy a knock-out reakciók — amennyiben a reakciótermékek közül a protont és a deuteront egyidejűleg detektáljuk— hatásos módszert jelentenek a magon belüli nukleon asszociációk, clusterek tanulmányzására, különösen, ha elegendően nagy energián tudjuk azokat elvégezni. Ez a követelmény azonban meglehetősen súlyos kísérleti problémákat vet fel. Az egyik nehézség abból adódik, hogy a maradék mag különböző gerjesztett állapotokban keletkezhet, amelyeket a kísérlet folyamán célszerű különválasztani. A (3) összefüggés alapján ehhez az szükséges, hogy az egyes kinetikus energiákat olyan pontossággal ismerjük, ami összemérhető a maradék mag nívói közötti energia-különbséggel. A nagyenergiájú szinkrociklotronok nyalábjának energiaszórása sajnos elég nagy, 20—30 MeV körüli érték, ez a körülmény már eleve korlátozza a lehetőségeket.

Nem könnyű feladat az impulzus megmérése sem ilyen nagy energiákon, mert ehhez nagyméretű költséges spektrométerekre van szükség. Bonyolítja a helyzetet, hogy a szinkrociklotronok általában rossz „időkihasználással" dolgoznak, viszonylag kis frekvenciával adnak rövid, nagy intenzítású áramimpulzusokat, és ez koincidencia mérések esetén a véletlen koincidenciákból származó hátteret katasztrofálisan megnöveli. Ez a magyarázata annak, hogy az elméleti szempontból igen kedvező több száz MeV-os tartományban hosszú ideig megelégedtek csupán a kilökött deuteronok regisztrálásával, és kinematikailag teljes, a szórt protonokat is detektáló koincidenciamérésről csak a legutóbbi időben jelent meg közlés, amelyben 590 MeV-os protonok segítségével vizsgálták a ^{6}Li (p, pd) ^{4}He és a ^{3}He (p, pd) p reakciókat.

Számunkra a dubnai Egyesített Atommagkutató Intézet 660 MeV-os szinkrociklotrona

mellett nyílt lehetőség ilyen kísérletek elvégzésére dubnai kutatók és a KFKI munkatársainak együttműködése keretében. Ezt a gyorsítót felszerelték ún. lassú nyalábkivezető rendszerrel, ami az eredeti rövid impulzusokat időben „szétkeni", és ezáltal megteremti a koincidencia mérés feltételeit. Megoldandó feladatot ezek után a nyaláb energiaszórásának minél kisebb értékre való lecsökkentése, egy elfogadható felbontóképességgel rendelkező, a deuteronok és a protonok egyidejű detektálására alkalmas ún. kétkarú spektrométer megépítése és az információkat fogadó tároló illetve feldolgozó elektronikus-számítógépes rendszer létrehozása jelentett.

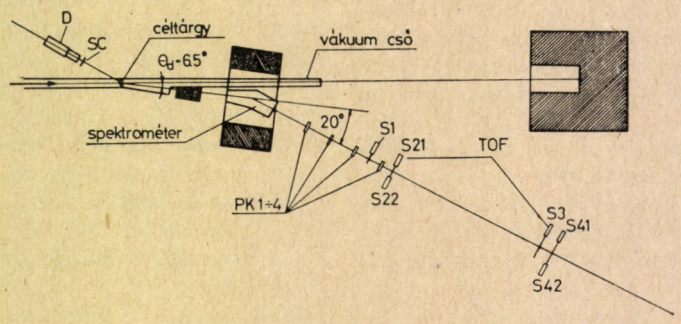
A mérőberendezés. A ciklotronból kilépő nyalábot egy kapcsolómágnes irányítja a kísérleti csarnokban levő céltárgyra. Ezt a mágnest fel lehetett használni egyúttal arra is, hogy a különböző energiájú részecskéket külön válassza, és így a nyalábba helyezett keskeny céltárgyra jutó részecskék energiaszórása lényegesen alatta maradt a teljes nyalábban észlelhető energiaszórásnak. Ilyen módon a reakciót létrehozó primer protonok energiaszórását 10 MeV körüli értékre sikerült leszorítani. A nyalábformáló rendszerhez tartozik még egy quadrupól lencse, amely az eredetileg széttartó nyalábot a céltárgyra fókuszálja. A céltárgyon áthaladt részecskék végül egy nyalábnyelő ólomtömbben állnak meg.

A céltárgy körül elhelyezett mérőberendezést a 3. ábra mutatja részletesebben. A protonok által kilökött, és a primer nyalábhoz képest 6,5° alatt haladó deuteronok a mágneses spektrométerbe jutnak. Ez a spektrométer, az alacsony energiákon használatos berendezésekkel ellentétben nem képezi le a céltárgyat valamilyen képsíkra (erre nincs elegendő hely), hanem az analizáló mágnes után elhelyezett sokszálas proporcionális kamrák segítségével az eltérített részecskék pályaelemeit határozza meg, és ennek alapján számítható ki az impulzus.

A proporcionális kamrák az utóbbi években hódítottak tért, elsősorban a nagyenergiás fizikában. Lényeges elemük a jelszálsík, amelyen egymástól néhány mm távolságra vékony fémhuzalok helyezkednek el A jelszálsík két oldalán levő ugyancsak vékony fémszálakból készített hálóra nagyfeszültséget kapcsolva a jelszálak környezetében kialakul a proporcionális számlálók működéséhez szükséges erős elektromos tér. A kamrán áthaladó ionizáló részecskék hatására azoknál a szálaknál alakul ki elektron lavina, amelyek mellett a részecskék áthaladtak. Ily módon a jelszál-köznek megfelelő pontossággal meg lehet határozni a részecskék áthaladásának helyét. Két, egymástól elegendő távolságra elhelyezett kamrával a részecskék iránya is megmérhető, néhány milliradián pontossággal. További kamrák elhelyezése a mérés biztonságát fokozza és megkönnyíti az egyértelmű pályameghatározást. A kamrák minden egyes jelszálához (esetünkben-kamránként 64 szál volt) egyszerű, integrált áramkörös erősítő, diszkrimináló és információ tároló elektronika csatlakozik, ami a jeleket a feldolgozó egység felé továbbítja. Az így felépített spektrométerrel 1 %-nál valamivel jobb felbontóképességet lehetett elérni, ami a deuteron energiájában kb. 10 MeV bizonytalanságot jelent.

A spektrométer után, annak mintegy kiegészítéseként repülési időmérő berendezés (TOF) helyezkedik el. Ez két nagyméretű (200 × 50 mm ill. 500 × 100 mm), egymástól 3.5 m távolságra elhelyezett 10 mm vastag szcintillátor lemezből áll, amelyekhez két-két fotoelektron sokszorozó csatlakozik. Az azonos impulzussal rendelező, különböző tömegű részecskék repülési idejében fennálló különbség lehetőséget ad az észlelt részecske azonosítására. A protonok és a deuteronok például 3,5 nsec. időkülönbséggel teszik meg a két detektor közötti utat, így ezek az időmérés $\sim$ 0.5 nsec. bizonytalansága mellett biztonsággal szétválaszthatók. A mérőrendszer jó időfelbontására jellemző, hogy a szcintillátor lemezek két végén elhelyezett elektron sokszorozókhoz érkező fényimpulzusok időkülönbségéből néhány cm pontossággal az is megállapítható, hogy a detektorban hol haladt át a részecske. A repülési időmérő berendezést kiegészíti két koincidencia kapcsolásban működő detektor, amelyek a véletlen koincidenciák számát vannak hivatva lecsökkenteni.

A hátrafelé szórt, 60 MeV körüli energiával rendelkező protonok regisztrálására egy nagyméretű, 80 mm átmérőjű, 200 mm hosszú szcintillációs detektor szolgál, ez előtt egy koincidencia számláló (SC) jelzi, hogy töltött részecske szólaltatta-e



3. ábra

meg a detektort. A detektor felbontóképessége 3 MeV körüli érték, ami lehetővé teszi, hogy a maradék mag impulzusát (feltevésünk szerint ez a deuteron cluster belső impulzusával egyezik meg) 10—15 MeV/c pontossággal határozzuk meg. A protondetektor jeleit nem csak amplitúdó szerint analizáljuk, hanem mérjük a részecskék beérkezésének időpontját is. Ez az energia és a futási idő közötti összefüggés alapján további lehetőséget ad az esetleges hibás események kirekesztésére.

Az elektronikus adatfeldolgozó rendszer. A mérés során nyert információk rögzítése ún. eseménytároló rendszerrel történik. Ez azt jelenti, hogy minden olyan esetben, amikor egy meglehetősen enyhe feltételnek eleget tevő esemény bekövetkezett, nevezetesen amikor a repülési időmérő berendezés mindegyik detektora és a protondetektor kb. 60 nsec. időn belül egyszerre megszólalt, a mérőberendezés által szolgáltatott minden lényeges adat egy HP 2116 C típusú számítógépen keresztül mágnesszalagra kerül. Ily módon a mérés befejezése után rendelkezésre áll minden regisztrált esemény összes adata, a mérés ismételten „lejátszható", és különböző szempontok szerint kiértékelhető.

Az elektronikus rendszer ennek értelmében egyrészt a detektorokból érkező jelek amplitúdójának, a proporcionális kamrák állapotának megfelelő számértékeket szolgáltat, másrészt, bizonyos logikai és vezérlési funkciókat lát el. Koincidenciakörök segítségével történik annak eldöntése, hogy meg vannak-e az esemény regisztrálásának feltételei, ha igen, akkor különböző kapu-rendszerek megnyitásával a jelek bejuthatnak a feldolgozó rendszerbe, ahol analóg-digitál konverterek állítják elő a számítógépes feldolgozáshoz szükséges kódokat. A számítógéppel való közvetlen, on-line kapcsolatot adattovábbító rendszer (interface) hozza létre.

A számítógép a már említett adatrögzítésen kívül a mérés ideje alatt néhány egyszerű kiértékelő feladatot is el tud végezni. Különböző spektrumok megjelenítésével lehetőséget ad a megfelelő kísérleti paraméterek beállítására és az egyes mérőegységek folyamatos kontrollálására.

A kiértékelés. A mérés alkalmával egy adott megreakció esetén nagyságrendileg mintegy tízezer esemény kerül regisztrálásra. Első feladat ezek közül kiválasztani azokat, amelyek minden rendekezésre álló kritérium (futási idők, koincidencia számlálók jelei, a proporcionális kamrák pályaadatai) alapján a vizsgált reakcióból származnak. Az így fennmaradó eseményekkel kell azután a részletes analízist elvégezni. Az analízis során először a maradék mag gerjesztési spektrumát kell meghatározni, ami a részecskék impulzusának ismeretében egyszerű számítás útján kapható meg. A maradék mag, ill. a deuteron cluster impulzuseloszlása valamivel bonyolultabb számítás eredményeként adódik, és külön kell meghatározni a maradék mag különböző gerjesztett állapotaira vonatkozóan. Megjegyzendő, hogy a kiértékeléshez szükséges kísérleti paraméterek meghatározása mindig szabad deuteronokon végzett hitelesítő mérésekkel történik, így a magreakció során nyert eredmények közvetlenül összehasonlíthatók a rugalmas pd szórás eredményével. Az itt vázolt, meglehetősen hosszadalmas kiértékelő munkát természetesen csak nagy teljesítményű számítógép segítségével lehet elvégezni. Bizonyos előkészítő tevékenységre, az események durva válogatására az itthon rendelkezésre álló, korlátozott lehetőségek kihasználhatók, de a munka érdemi részére a dubnai intézet CDC 6300 típusú nagy számítógépét kell használni.

Eredmények, tervek

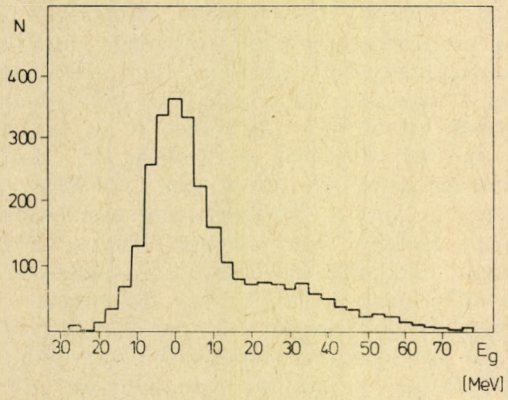
A fentiek során ismertetett berendezéssel elsőként a ^{6}Li(p,pd)^{4}He reakciót vizsgáltuk meg. A ^{6}Li mag felépítése igen egyszerű, alapállapoti hullámfüggvényében dominál az alfa-deuteron cluster állapot, vagyis a mag jó közelítésben úgy tekinthető, mint egy alfa-részecske és egy hozzá lazán kötött deuteron együttese. A deuteron szeparációs energiája mindössze 1,47 MeV. Azon túlmenően, hogy a ^{6}Li szerkezete elméletileg jól leírható, kísérleti szempontból előnyös, hogy a maradék magként keletkező alfa-részecskének nincs gerjesztett állapota, és felbomlása csak mintegy 20 MeV gerjesztési energia felett következik be. Így jól különválasztható az alapállapotra vezető reakció, ami az eredmények elméleti interpretálását lényegesen megkönnyíti.

A ^{6}Li(p, pd)^{4}He reakciót alacsonyabb, 100 MeV körüli vagy az alatti energián több szerző vizsgálta, de az eredmények értékét nagyon lecsökkenti, hogy a viszonylag kis energia miatt az impulzus közelítés se nagyon jó, és a végállapoti hullámfüggvények torzítása is jelentős. A már említett egyetlen nagyenergiás mérés viszont olyan széles impulzuseloszlást eredményezett a cluster belső mozgására, ami nem csak a korábbi mérésekkel, de az elméleti várakozással is ellentétben van.

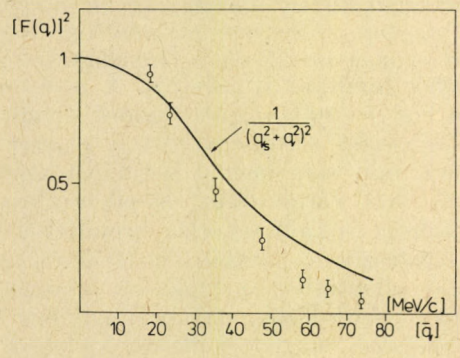
Az általunk végzett kísérlet elrendezése lényegesen különbözött a korábbi mérésekétől, amennyiben — ellentétben a szokásos szimmetrikus, a p-d szórás tömegközépponti rendszerében 90°-os szórási szögnek megfelelő detektorállással — a nagyszögű szórás geometriáját valósítottuk meg. Ezzel egyrészt lehetőség nyílt az eredeti koincidencia nélkül végzett mérésekkel való közvetlen összehasonlításra, másrészt információt lehetett kapni a deuteron cluster és a nagyenergiájú proton különleges körülmények között bekövetkező kölcsönhatásáról. A kísérletnél alkalmazott geometria ugyanis mintegy 165°-os tömegközépponti szögnek felel meg a szabad p-d szórásban, és ebben a szögtartományban döntő szerepet játszanak a kicserélési mechanizmusok, amikor — a kisszögű szórástól eltérően — a bombázó proton mintegy helyet cserél a deuteron protonjával, és ez utóbbi jelenik meg szabad részecskeként a nagy szögek irányában.

A kísérlet alapján több kérdésre kívántunk választ kapni. Mindenekelőtt bizonyítékot akartunk szerezni arra vonatkozólag, hogy valóban kvázi-rugalmas szórásfolyamat eredményeként voltak-e megfigyelhetők az erdeti méréseknél a kis szögekben megjelenő, nagy impulzusú deuteronok. Ezen túlmenően a maradék mag alapállapotára vezető reakciók arányának, az ilyen eseményekhez tartozó belső impulzuseloszlásnak a meghatározása és természetesen az eredményeknek az elméleti számításokkal való egyeztetése szerepelt a célkitűzések között.

A 4. ábrán a maradék mag kísérletileg megfigyelt gerjesztési spektruma látható. Az $E_g = 0$ gerjesztési energiánál jelentkező csúcs tartalmazza azokat az eseményeket, amelyeknél a deuteronon és a protonon kívül egy alapállapotú alfa részecs-



4. ábra



5. ábra

ke volt a harmadik reakciótermék. A csúcs szélessége az energiamérés pontosságának felel meg, és láthatóan jól elkülöníthetők a 20 MeV gerjesztési energiát igénylő és az alfa-részecske felbomlására vezető események.

Az alapállapoti csúcsba jutó eseményekre vonatkozóan az 5. ábra mutatja a maradék mag, illetve — ami ezzel equivalens — a deuteron cluster belső impulzuseloszlását. Amint láttuk, ez a függvény gyakorlatilag a cluster relatív mozgását leíró hullámfüggvény Fourier-transzformáltjának a négyzete, s így közvetlen információkat hordoz a magszerkezetről. Az ábrán látható eloszlás például jól illusztrálja azt a tényt, hogy a deuteron cluster csak lazán van kötve az alfarészecskéhez. A laza kötés azt eredményezi, hogy a hullámfüggvény jelentős része a magerők hatótávolságán kívül van, és itt az $E_s = 1{,}47$ MeV szeparációs energiának megfelelő exponenciális lefutással rendelkezik. Az ilyen függvény Fourier-transzformáltja $\frac{1}{(q_s^2 + q^2)}$ alakú, ahol q_s értékét a szeparációs energia határozza meg, a jelen esetben $q_s = 60$ MeV/c. A kísérletileg talált eloszlás szélessége valamivel kisebb, mint amit a tisztán exponenciális lefutás alapján elméletileg várnánk, az eltérésre a clusterek véges mérete ad magyarázatot.

Megnyugtató, hogy a kísérlet eredménye lényegében megfelel az elméleti várakozásnak, ez megerősíti az alkalmazott közelítések jogosságát, amit a korábbi nagyenergiás mérésnél talált szélesebb eloszlás némileg kérdésessé tett. Ugyanakkor egy lényeges eltérés tapasztalható a nagyobb impulzusok tartományában. Mivel a cluster modell alapján a relatív mozgást $2s$ állapotú hullámfüggvény írja le, amely a mag belsejében csomóponttal rendelkezik, az impulzus eloszlásban 200 MeV/c érték körül egy maximumnak kellene jelentkezni. Ezt — összhangban a korábbi mérések eredményével — a jelenlegi mérésnél sem lehetett kimutatni, ami óvatosságra int a tekintetben, hogy a cluster függvényeknek a mag belsejére vonatkozó kijelentéseit túlságosan komolyan vegyük.

Az impulzuseloszlás ismeretében mód nyílik arra, hogy meghatározzuk azt a szögtartományt, amelyben a hátrafelé haladó protonok a cluster belső mozgása következtében szétszóródnak, ennek ismeretében pedig a reakció teljes hatáskeresztmetszete számítható ki. Érdekes módon, ez lényegesen kisebbnek adódott, mint a koincidencia nélkül végzett mérések során kapott érték, ugyanakkor jó közelítéssel megegyezik az elméletileg várt értékkel. Ebből arra lehet következtetni, hogy a kis szögben megjelenő deuteronok egy tekintélyes része nem a feltételezett rugalmatlan szórás folyamatból ered. Ezt támasztja alá, hogy a protonokkal koincidenciában levő deuteronok impulzuseloszlása lényegesen keskenyebb, mint a koincidencia feltétel nélküli eloszlás, ami arra utal, hogy valamilyen más folyamatból is keletkeznek előrehaladó deuteronok.

Egy lehetséges magyarázat a többlet deuteronok megjelenésére az a feltételezés, hogy a protonok nem egy deuteron-clusterral jutnak kölcsönhatásba, hanem a mag két olyan neutronjával, amelyek valamilyen módon korrelált mozgást végző „dineutron" clustert képeznek. Láttuk, hogy a kis szögben kilépő deuteronok egy kicserélési folyamat termékei. Hasonló folyamat képzelhető el, ha a protonok egy dineutronnal jutnak kölcsönhatásba, a proton egy neutronnal helyet cserélve deuteront képez, ugyanakkor hátrafelé nem proton,

hanem neutron fog haladni. Egy ilyen reakció kimutatása elég nehéz, mert a deuteronokkal koincidenciában neutronokat kell detektálni, de az eredmény érdekes lenne abból a szempontból, hogy a protonoknak olyan nukleon párral való kölcsönhatásáról adna felvilágosítást, amely mind spinje, mind izospinje tekintetében különbözik a deuterontól. (A „dineutron" cluster spinje $S = 0$, izospinje $T = 1$).

A ^{6}Li magon végzett mérés azon túlmenően, hogy érdekes megfizikai információkat szolgáltatott, jelentős abból a szempontból is, hogy megnyugtatóan bizonyította az egész, meglehetősen bonyolult mérőberendezés használhatóságát. Az elért eredmények alapján hozzá lehet fogni hasonló típusú más mérésekhez is. Folyamatban van ugyanennek a reakciónak ^{7}Li magon való vizsgálata, előkészületek történtek nehezebb atommagokon végzendő mérésekre, a már említett neutron koincidencia kimutatására, tervbe vettük a deuteron break-up, vagyis a $D(p, 2p)\,n$ reakció vizsgálatát, nem is szólva a π-mezonos folyamatokról, mint amilyen például az ugyancsak vizsgálataink tárgyát képező $A\,(p, \pi\,d)\,B$ típusú reakció.

Az atommagoknak több száz MeV energiájú részecskékkel való vizsgálata a legutóbbi években a magfizika egyik legdinamikusabban fejlődő ága lett. A közelmúltban indult, vagy áll befejezés előtt a zürichi, a vancouver-i ciklotron, a los-alamosi lineáris gyorsító, amelyek 6—700 MeV energián az eddigieknél nagyságrendekkel nagyobb intenzitású protonnyalábot képesek szolgáltatni. Rekonstrukció, modernizálás előtt áll a dubnai, a Saclay-i protonszinkrotron, ami mind arra mutat, hogy az elkövetkező években számos új, izgalmas kérdés megoldása várható ezen a területen. Örvendetes, hogy ebbe az új kutatási irányba idejében és alkotó módon a KFKI magfizikusai is be tudtak kapcsolódni, és létrejöhetett egy kis kutató kollektíva, amely a klasszikus magfizika energiatartományánál jóval nagyobb energiájú részecskékkel képes eredményes vizsgálatokat végezni az atommag eddig rejtett tulajdonságainak megismerésére.

IONIMPLANTÁCIÓS KUTATÁSOK

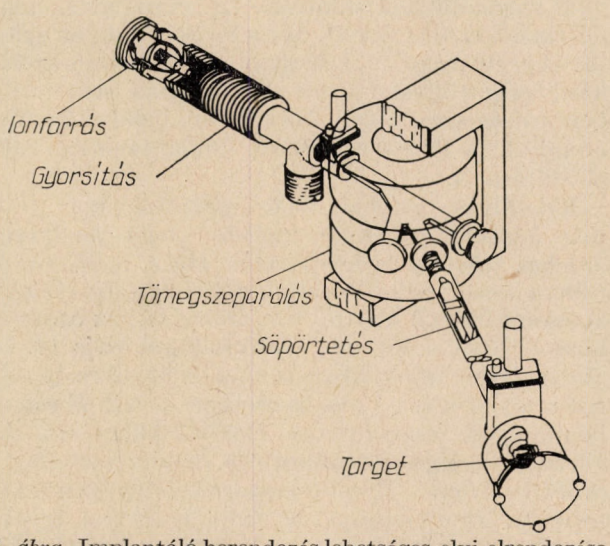
Gyulai József
KFKI Szilárdtestfizikai Főosztály

Az ionimplantáció szemünk láttára nött ki a magfizikából és a szilárdtestfizikából és érik napjaink egyik sokat érő és ígérő technológiájává. A KFKI-ban a moszkvai Kurcsatov Intézettel való baráti kapcsolatok révén már 1971. végén üzembe állt az első berendezés és létrejött — előbb a magfizikai, később a szilárdtestfizikai kutatások keretében — egy program-szervezet, amely elé határozott célokat tűztek.

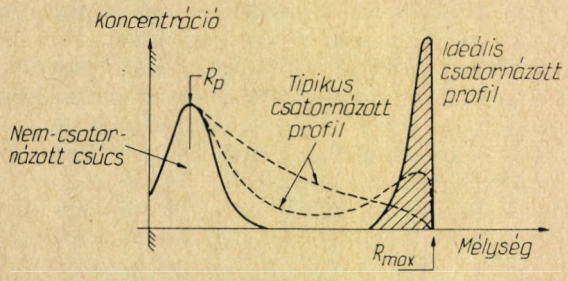
Mielőtt azonban ezekről és az elért eredményekről szólnék, az implantációról kell röviden beszélnem.

Az implantáció olyan módszer, amellyel korábban elképzelhetetlen pontossággal lehet atomokat egy szilárd test felületi rétegébe bejuttatni. Ez — határesetben — lehet mikroötvözés, amikor is a felület kémiai állapotát változtatjuk meg, de lehet — a másik határesetben — annak eszköze, hogy kevés (akár csak tízezred monorétegnyi), jól választott adalék atommal állítsuk be egy felület elektrosztatikus potenciálját. Az eljárás magfizikai: részecskegyorsítóban felgyorsított ionokat lövünk az adalékolni kívánt felületbe (1. ábra). Az ionok behatolásának kvantitatív leírását a belövés során magfizikai, a későbbi műveletek (pl. hőkezelés) folyamán szilárdtestfizikai törvények adják. A legtöbb implanterré fejlesztett gyorsítóban sepertetéssel terítik szét a típusosan 0.5—1 cm átmérőjű bombázó nyalábot, hogy viszonylag nagyfelületű (mondjuk 10×10 cm^2) tárgyak besugárzására is mód nyíljék. A belőtt ionok egy áramintegrátort is működtetnek, így a belőtt dózis pontosan kézben tartható. Jó minőségű sepertetés esetén egy 10×10 cm^2-es felületen 1%-nál jobb laterális homogenitást lehet elérni. Más módszerekkel jelenleg ez nem lehetséges. Amorf tárgyba lőve az ionokat, a mélységi eloszlás gaussgörbe, meghatározott csúcs-értékkel és szórással (2. ábra, nem csatornázott csúcs). Ebből az is következik, hogy többféle energiával bombázva az anyagot, szinte tetszőleges mélységi eloszlást létrehozhatunk (3. ábra). Ez a módszernek további jó tulajdonsága.

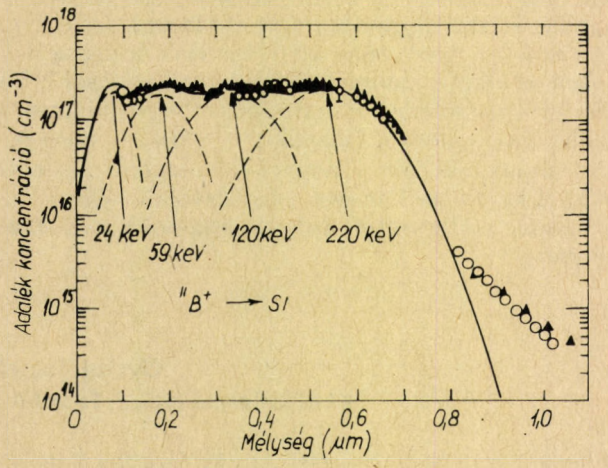
A következő előny abból ered, hogy a bombázás során kialakuló állapot távolról sem a termikus egyensúly állapota, ez azzal a következménnyel is jár, hogy az adalékolás szintjét nem korlátozzák olyan tényezők, mint a szilárd oldékonyság. Ez utóbbi szab határt ui. a diffúziós módszerrel elérhető maximális adalék-koncentrációnak. A módszernek mindössze egyetlen hátránya: az implan-



1. ábra. Implantáló berendezés lehetséges elvi elrendezése



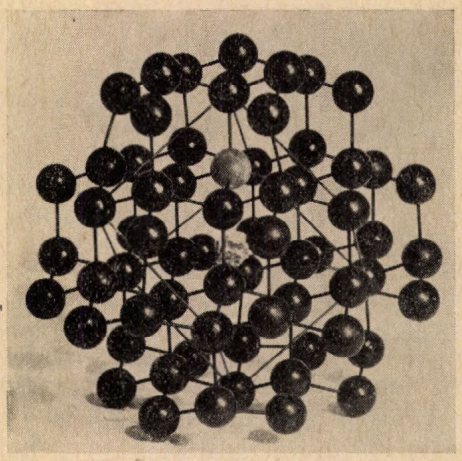
2. *ábra.* Implantációkor előálló adalék atom eloszlások. A csatornázás a kristályszerkezet következménye

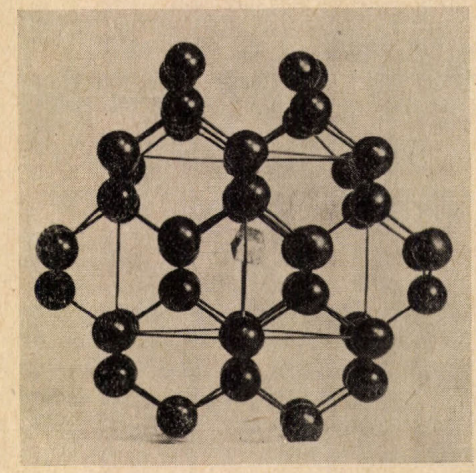


3. *ábra.* Többszörös implantálással előálló eloszlás

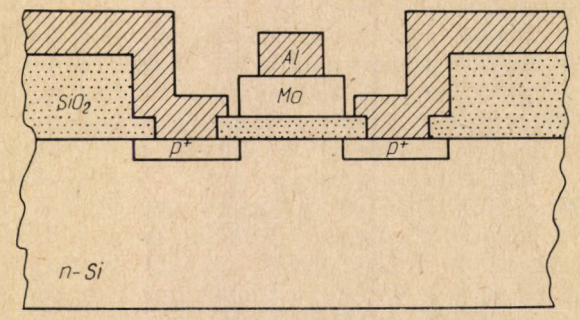
táció olyan „sokkot" jelent, hogy az alkalmazása súlyos sugárzási károsodással jár együtt. Itt nemcsak diszlokációk létrejöttére kell gondolnunk, hanem — a belövés paramétereitől, elsősorban a dózistól függően — akár a kristályos felület teljes amorfizálására is. Ez többnyire velejáró hátrány, bár van alkalmazás, amelynél pont ezt használják ki: nagyértékű ellenállások előállítása — a kristályrács vezetőképességének roncsolással való lecsökkentésével. A mai alapkutatások elsősorban a károsodott réteg újra kristályosodását, a tökéletes szerkezetnek most már adalékolt változatában való visszaállítását célozzák. Ez rendszerint valamiféle hőkezelést jelent. Ma a feladatot olyan szintig sikerült megoldani, hogy pl. févezetőkben az ún. kisebbségi töltéshordozók élettartama sem csökken túlságosan, tehát horizonton belülre került, mondjuk, a félvezető lézerek implantációval való előállítása is.

Kristályos testekbe való implantáláskor — a már említett roncsolás mellett — egy rendkívül érdekes jelenség is lejátszódik. Ha a belső ionok iránya közel esik (mondjuk fél fokon belül) egy alacsony indexű kristálytani irányhoz, az atomok közötti teret a lövedék csatornáknak látja (4. b. ábra). Ilyen irányokban sokkal mélyebbre hatolhat a lövedék és — ideális esetben — a 2. ábrán is bemutatott „csatornázott' eloszlás állhat elő. Az ábrán a részleges csatornázódás esetére vonatkozó profil is látható. Mivel a csatornázás nagyon érzékeny az irányviszonyokra, implantáláskor igyekszenek e hatást elkerülni pl. a tárgy kismértékű





4. *ábra.* A gyémántrács és egy tetraéderes szimmetriájú rácsközi pontban levő adalék atom különböző nézetekből: „véletlen" irányból (a), és ⟨110⟩-irányból (b)



5. *ábra.* Fém-kapus MOS (Metal-Oxide-Semiconductor) tranzisztor elvi metszete

elfordításával. Cikkünk későbbi részében szólunk egy olyan, az implantációval rokon analitikai eljárásról, amely viszont éppen a csatornahatás felhasználásával vált különlegesen értékes módszerré. Az implantáció, ha megfelelően kis átmérőjű ionnyalábbal végeznénk, alkalmas lehetne a felület mentén helyi adalékolásra is. Folynak is ilyen kísérletek, de eddig a siker csak formális: időben

nagyon hosszúra nyúlik az ilyen implantáció, mivel az ionnyaláb okozta hő-sokk káros hatásai miatt csak kis ionáram-sűrűséget lehet alkalmazni.

Ma az iparilag is általános alkalmazás a félvezető integrált áramkörök előállításával kapcsolatos: az ún. MOS-szerkezetű (5. ábra) integrált áramkörökben az áramvezérlést végző kondenzátornál a dielektrikum (az ábrán a molibdén alatti SiO_2 réteg) elektromos töltését állítják be olyan értékre, hogy már megfelelően kis külső feszültség rákapcsolása révén nyitni-zárni lehessen a tranzisztoron (az ábrán a két p^+ adalékolású rész között) átfolyó áramot. Az 1—2 volttal is működtethető telepes áramkörök felhasználhatóságában (zsebkalkulátorok, órák, katonai és űrkutatási alkalmazások) új korszakot nyit az implantáció. Ilyenkor a módszernek az igen kis dózisok (10^{10} — 10^{11} atom/cm^2, azaz mintegy tíz-százezred monoréteg !) tartományban is kitűnő kézben tarthatósága vált gyakorlati haszonná. Az integrált áramkörök gyártásában sokszor azt használják ki, hogy az implantált atomokra érvényes a geometriai árnyék elve, emiatt pl. a felgőzölt fémrétegek pontos maszkokként szerepelnek. Az 5. ábrán látható tranzisztornál a molibdén réteg jelölte ki a két p^+ tartomány közötti távolságot. Cége válogatja, hogy az implantációt ez utóbbi célra is használja-e vagy csak a tranzisztorok küszöbfeszültségének beállítására. Egy azonban biztos: korszerű félvezető gyár már nem létezhet implantálás nélkül. Ma a jó foto- vagy elektronlitográfiával kombinált implantált technológia ott tart, hogy egy néhány mm^2-es sziliciumlapkán egy kisszámítógép lényegi elemei kialakíthatók. A mikroprocesszorok megjelenésére gondolunk.

Most nézzük meg azokat az eredményeket melyeket az elmúlt évek során a KFKI-ban értünk el. A felsorolásunk nem fontossági sorrend — inkább azt az utat követi, hogy az alapkutatási háttérrel miként férnek meg, ill. abból hogyan nőnek ki az alkalmazási eredmények. Induljunk el a programunk „legelvontabb" ágán, a visszaszórásos mérés hazai megvalósításán. Mivel a módszer — sajnos — nem közismert, ejtsünk pár szót a mérés elvéről, az eljárás tejlesítőképességéről: MeV tartományban monoenergetikus és jól kollimált könnyű részecske-nyalábot (leggyakrabban H^+, He^+) lövünk a vákuumban levő — célszerűen goniométerre szerelt — vizsgálati anyagra. A becsapódó részecskék minden irányban szóródnak — többek között visszafelé is, így egy részük újra kilép a vákuumba. E kilépő részecskék energiája elsősorban két tényezőtő függ:

— milyen tömegű atomokon szóródtak,
— az ütközés előtt hány atommal léptek kis energiaátadással járó kölcsönhatásba, azaz lényegében mekkora utat tettek meg az anyagban.

Az első esemény többé-kevésbé egzaktul számítható. Az energiák viszonya:

$$k^2 = \frac{E}{E_0} = \left(\frac{m \cos \theta + \sqrt{M^2 - m^2 \sin^2 \theta}}{m + M} \right)^2,$$

ahol M, m az ütközésben szereplő két tömeg, θ a szórási szög, merőleges beesésnél. A második körülmény hatását is figyelembe véve — félemprikusan — az energiacsökkenés mélységskálává alakul:

$$\Delta E = [S] \Delta x,$$

ahol ΔE az energiaveszteség, Δx a felülettől számított mélység. Az $[S]$ skála-faktor számítható és mérhető is. Ez az egyszerű közelítés MeV-es H^+, ill. He^+ ionokra, a legtöbb anyagra (bennünket főleg a félvezetők érdekelnek), mintegy 1—2 μm mélységig helytálló.

Mi következik tehát? Először is, hogy egy vékonyréteg vagy felület roncsolásmentes analízisét lehet elvégezni, ha adott beeső részecskedózisra megmérjük a visszaszórt részek energiaeloszlását, másodszor, az összetételt mint a mélység függvényét is meg lehet határozni.

De ez még nem minden ! A részecskékre bekövetkezhet a csatorna-hatás, azaz ha kristályos anyagba annak valamelyik alacsony indexű kristálytani tengelyének (vagy síkjának) irányából lövünk, a részecskék számára a kristály szinte átlátszóvá válik (4. b. ábra). Az egyszerű háromszögelés módszerével — több irányból nézve — nemcsak az idegen atomok jelenlétét tudjuk kimutatni, hanem azok rácsbeli elhelyezkedését is ! A rácspontban ülő idegen atomokat ui. csak akkor „látja" a nyaláb ha azok nincsenek a mátrixatomok „árnyékában", azaz, ha az analizáló részecskék nem kristálytani tengely irányából érkeznek.

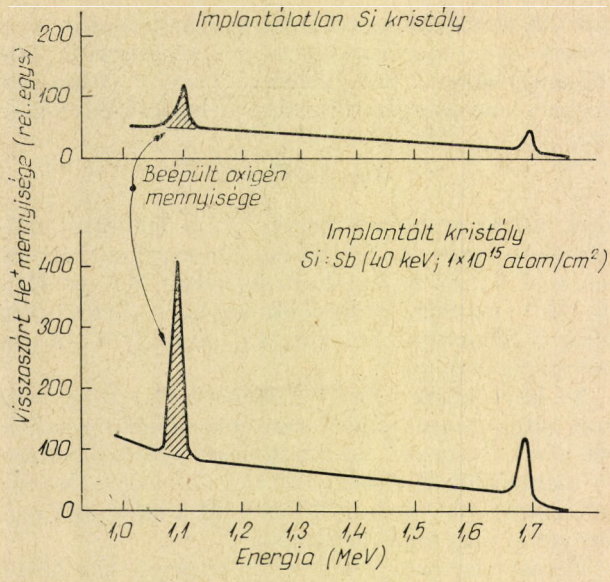
A módszer megvalósításához — még akkor is, ha mint a KFKI-ban, a megfelelő energiastabilitású részecskegyorsító korábban meg is épült, sok egyéb szükséges: századfokra pontos goniométer, megfelelő felbontású részecske-detektor, erősítők és egy sokcsatornás analizátor.

Az oxigén kimutatása, ill. oxigéntartalmú vegyületek (pl. SiO_x) kémiai analizise többek között a félvezető iparban is nagyon fontos kérdés. Egy új ötlet az oxigénnek visszaszórással való kimutathatóságában mintegy 30-as érzékenységnövekedést eredményezett, és így a jelenkori tudomány egyik legérzékenyebb oxigéndetektálási módszeréhez jutottunk. Az eljárás azt használja ki, hogy a Rutherford hatáskeresztmetszetnek rezonanciája van az oxigénen szóródó 3,05 MeV-es He^+ ionokra: ilyenkor egy jó nagyságrenddel megnő a visszalökődő részecskék hozama. Ezzel már olyan problémákat vizsgálunk, mint az implantálás oxidációt növelő, ill. egyes anyagokra passziváló hatása (6. ábra). A módszer gondolata Keszthelyi Lajostól származik.

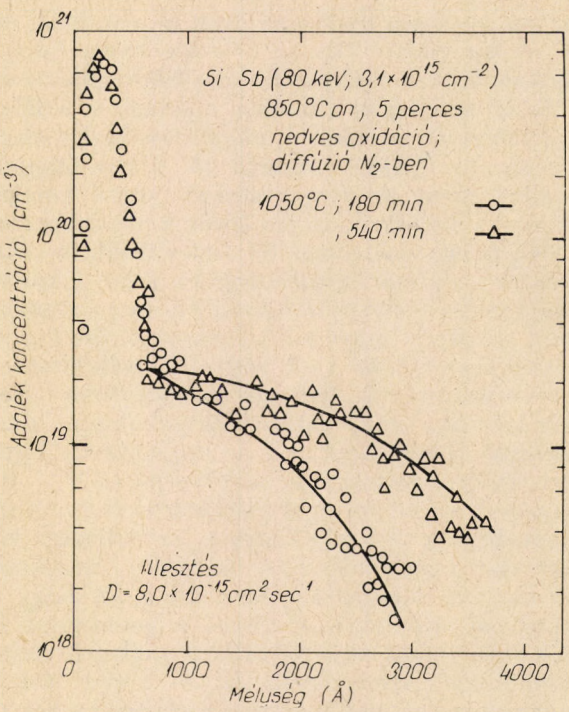
A csoport másik ötlete a lassú neutronokkal bekövetkező $^{10}B(n,\alpha)^7Li$ reackiót használja fel az implantált bór (amely a legfontosabb adalék a tranzisztor-gyártásban !) meghatározására.

Már az implantációs kutatások megindításánál jelentős volt az a tapasztalat, amelyet a California Institute of Technologyban (Caltech) szereztünk.

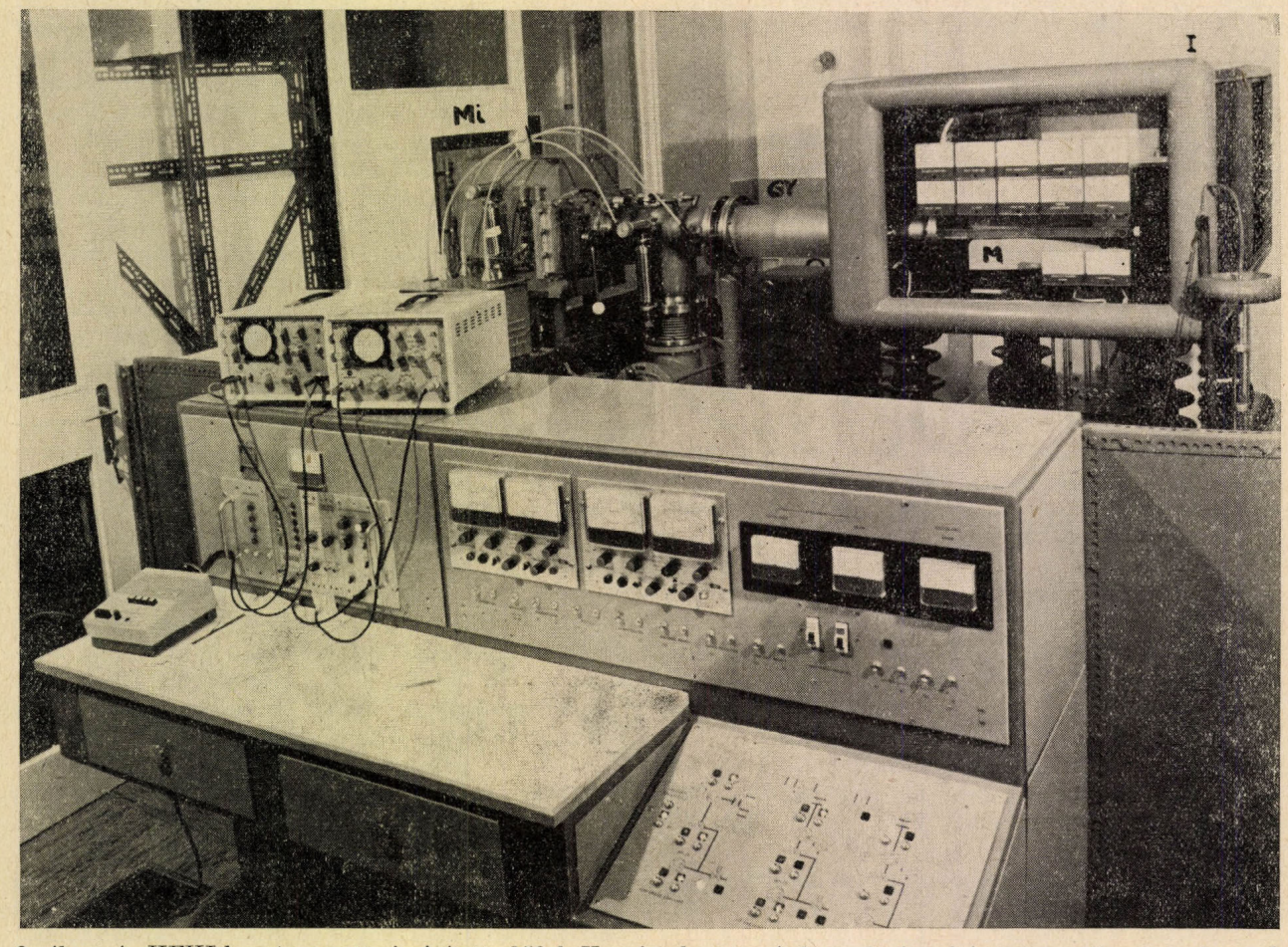
A közös kutatásokat az implantációnak mint a diffúzió előtti adalékolásnak a kutatásával kezd-



6. ábra. Azonos hőkezelésnek (750°C, 5 perc, nedves O_2 atmoszférában) alávetett nem-implantált és antimonnal implantált szilicium oxidációja. A vonalkázott területek arányosak a felületen levő oxigén atomok számával



7. ábra. Antimon diffúziója implantált eloszlásból, visszaszórásos mérés. A D diffúziós állandót az erre az esetre érvényes erfc eloszlás függvényből származtatjuk



8. ábra. A KFKI-ban tervezett és épített 150 keV-es implanter. A berendezés olajmentes vákuumrendszerrel épült és nagy sorozatok automatikus megmunkálására alkalmas. A minták behelyezése a szomszédos pormentes laboratóriumból történik

tük. Ez a téma nagyon perspektivikus a bipoláris (pnp, ill. npn) tranzisztorokkal működő integrált áramkörök technológiájában. Az implantáció kísérőjelenségei miatt azonban nem triviális, hogy a diffúzió hogyan zajlik le ilyen esetben azaz a Fick-törvények szerint vagy nem. Az antimon és gallium volt az a két anyag, amelyet implantáltunk majd diffundáltattunk. Diffúzió előtt azonban az ún. hóeke effektussal összepréseltük az eredetileg is keskeny implantált eloszlást. (A hóeke effektus akkor állhat elő, ha egy felületén adalékolt lapkát oxidálunk. Ha az oxidfront haladásának, a diffúziónak, valamint az adalékatomoknak a két fázis közötti megoszlására jellemző, ún. szegregáció „mérkőzésének" eredményeképpen az oxidfront „tolja" maga előtt az adalékot.) Kiderítettük, hogy antimonnál mind az implantált, mind egy ilyen „összenyomott" eloszlásból kiinduló későbbi diffúzió reguláris (7. ábra, visszaszórással mért eloszlás). Gallium esetében Si_3N_4 védelmet használva első ízben sikerült ezt az adalék-fajtát a szilárd oldékonyságot elérő mennyiségben a sziliciumba bediffundáltatnunk.

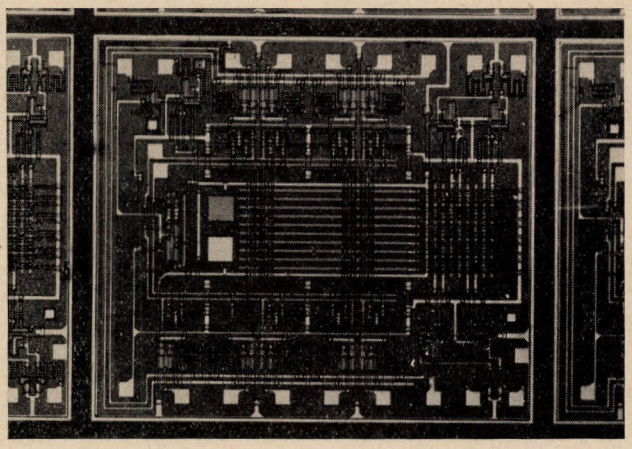
A KFKI neutronaktivációs analitikai tapasztalata is sokat segített a témának: mivel az ún. anódos rétegeltávolítással 40—60Å-ös lépésekben tudjuk a sziliciumkristályokat vékonyítani, e módszernek az aktivációs analizissel való kombinációja révén pontos eloszlásgörbéket tudtunk az implantált mintáinkon felvenni.

A KFKI Spektroszkópiai Laboratóriumával és a leningrádi Joffe Intézettel közösen az infravörös technikát is felhasználtuk az implant rétegek minősítésére.

A moszkvai Lebegyev Intézettel együttműködve pedig az implantált gyémánt (magashőmérsékleten is használható félvezető!) kutatásában születtek eredmények.

Az implantált pn-átmenetek elektromos tulajdonságai körében megállapítottuk, hogy a letörési feszültség implantált esetben is a pn-átmenet görbületeitől függ és kimutattuk, hogy számításokkal is követni, ill. jósolni lehet e fontos paramétert.

Az új implanter fejlesztése érdekében végzett ionoptikai számításainkról kiderült, hogy azok annyira hézagpótlóak, hogy az implantergyártó cégek érdeklődését is komolyan felkeltették.



Ezek azok az alapkutatások, amelyek lehetővé tették, ill. segítették a fejlesztő munkánkat.

Ez utóbbi tevékenységünk — amelyet az Országos Műszaki Fejlesztési Bizottság is támogat — szintén ért el eredményeket. Ezekről szólunk végül, de nem utolsósorban.

A 8. ábra mutatja az ipari célokra is alkalmas implanterünket. A turbomolekuláris szivattyútól eltekintve- teljesen hazai anyagokból készült. A berendezés programozható, gyors és viszonylag kis helyigényű.

Az áramköri fejlesztő tevékenységünk során eddig az ún. implantált p-csatornás MOS technológiát (5. ábra) dolgoztuk ki olyan szintig, hogy tervezérelt tranzisztoraink néhány éve működnek a KFKI egyes elektronikai termékeiben. Kezdeti sikereket értünk el a komplementer (CMOS) technológia kutatásában, és üzemképes p-csatornás MOS inverterek születtek. A sikereinkben osztozik az Egyesült Izzó, a HIKI, TKI és MÜFI gárdája is, mivel sok technológiai lépést velük együttműködve illetve segítségükkel valósítunk meg.

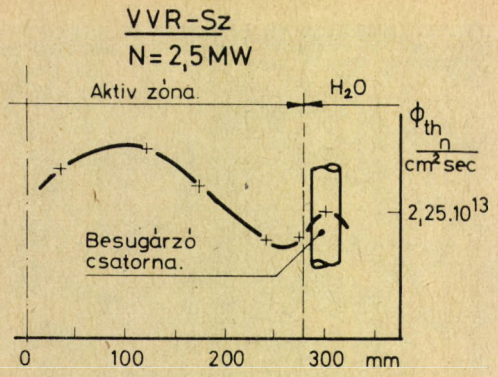
Kísérletek folynak a H18-as nyolccsatornás multiplexer (HIKI) implantált változatának létrehozására és 1976-ban egy folyadékkristályos kijelző meghajtó áramkörén „gyakorolnak" a fejlesztéssel foglalkozó kutatóink. Ez az áramkör amely egy csak olvasható memoriából és annak áramköréből áll a fenti ábrán látható. E munkánk célja az, hogy széles spektrummal elvégezzük azt az előkészítő tevékenységet, amely biztosítja e nélkülözhetetlen technológia bevonulását a hazai ipari termelésbe.

A KFKI REKONSTRUÁLT REAKTORA

Az első magyar VVR-Sz kutató reaktort a Szovjetunió segítségével 1959. márciusában helyeztük üzembe. Ezzel nagy lendületet kapott a hazai nukleáris kutatás, és megnyílt annak a lehetősége, hogy a magyar kutatók és technikai szakemberek most már e tudományág kísérleti területeit is műveljék, bekapcsolódjanak munkájukkal a szocialista országokban folyó programokba. Ebben az időszakban számos kutatási téma indult el és gazdag tapasztalatokkal rendelkező szakembergárda alakult ki. Időközben azonban az egyre gyorsuló tudományos és technikai fejlődés szükségessé tette a reaktor rekonstrukcióját.

A legfontosabb rekonstrukciós célkitűzés a termikus neutronfluxus megkétszerezése, valamint a besugárzási és kísérleti lehetőségek javítása volt. A rekonstrukciót 1967-ben végrehajtottuk s a rekonstruált reaktor a VVR-SzM típusjelet kapta. A két reaktortípus legfontosabb jellemzőit a mellékelt táblázat tartalmazza.

A rekonstrukció során új fűtőköteg típusra tértünk át, az eredeti H_2O neutronreflektort pedig



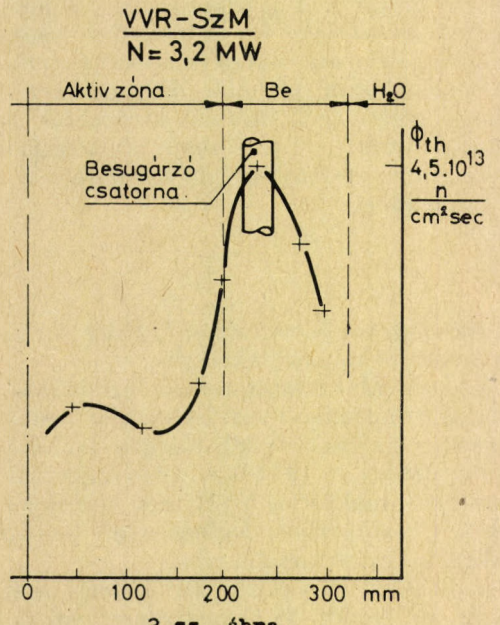
berillium gyűrűvel egészítettük ki. Az így elért neutronfluxust szemléletesen mutatja az 1., ill. a 2. sz. ábra.

Az 1. sz. ábrán a VVR-Sz, a 2. sz. ábrán pedig a VVR-SzM (rekonstruált) reaktor radiális termikus neutron fluxuseloszlását ábrázoltuk. Látható, hogy jelentős fluxusnövekedés jött létre a Be reflektorban. Természetesen ide helyeztük az izotóp gyártásra szolgáló új „függőleges" besugárzó csatornákat és innen „tápláljuk" a — vízszintes — nyalábfizikai csatornákat is.

A reaktorban előállított sugárzó izotópok száma évről-évre növekszik. Szinte valamennyi olyan sugárzó izotóp hazai előállítása folyik, amely reaktorban termelhető. Az ilyen izotópok felhasználóinak mintegy fele orvosi intézmény. Ezek az intézmények a készítményeket diagnosztikai s terápiás célokra használják fel.

Az ipari és mezőgazdasági vállalatokon kívül sok tudományos kutató intézet, laboratórium, sőt újabban taniintézetek laboratóriumai is igénylik a izotópokat.

Kutató reaktorunk fontos szerepet tölt be a hazai nukleáris és szilárdtestfizikai kutatások fejlődésében is. Az alkalmazott kísérleti technika az elmúlt években nagy fejlődésen ment át. A reaktor öt vízszintes csatornájánál számos unikális kísérleti eszköz létesült: neutronszelektor; csepp-



2. sz. ábra.

folyós nitrogénnel hűtött berillium szürős neutroncsatorna; neutron spektroszkópiai célokra teljesen automatizált, programozható neutron diffraktométer és három tengelyű spektrométer, melyek a szilárdtestek és folyadékkristályok, szerkezetének vizsgálatára szolgálnak.

A neutron aktivációs analízis a modern anyagvizsgálat egyik legnagyobb teljesítőképességű módszere. Érzékenysége sok elemre nézve meghaladja a jelenleg használt kémiai, ill. fizikai-kémiai módszerekét. E módszer hazai bevezetését és széles körbeni alkalmazását is a reaktor tette lehetővé. Az Intézetben 1960. óta folynak neutronaktivációs analitkai vizsgálatok. Ezen idő alatt a reaktorban a kutatók közel 14.000 mintát sugároztak be és számos neutronaktivációs analitikai eljárást dolgoztak ki.

Reaktorunk 1967-ben végrehajtott rekonstrukciója során messzemenően kihasználtuk azokat a műszaki tartalékokat, melyek gazdaságosan realizálhatók voltak a neutronfluxus emelésére és a kísérleti lehetőségek bizonyos mértékű javítására. A rekonstrukció során alkalmazott nagyobb terhelhetőségű fütőkötegekkel a 10 MW hőterhelés elérhető ugyan, de a jelenlegi hűtőrendszer ezt a teljesítményszintet ma még 5 MW-ban limitálja.

Megnevezés	1959—1967 VVRSz.	1967— VVR—SzM,
Aktív zóna adatok		
U^{235} kritikus mennyisége: (g)	2900	1650
Első üzemi töltet (g):	4100	3200
Első üzemi töltet többlet reaktivitása ($):	6,8	14
Max. hőteljesítmény (MW):	2,5	5
Fütőköteg		
típusa	EK—10	VVR—SzM
dúsítása (%)	10	36
Neutronfluxus adatok:		
Az aktív zóna termikus neutronfluxus átlaga: (n/cm²sec)	1.10^{13}	2.10^{13}
A besugárzó csatornák max. termikus neutronfluxus átlaga (n/cm²sec)	$2{,}2.10^{13}$	$4{,}5.10^{13}$
Neutron csapda-csatorna max. termikus neutronfluxusa: (n/cm²sec)	4.10^{13}	$9{,}2.10^{13}$
Gyorsneuton fluxusú besugárzó csatorna max. n. fluxusa: (n/cm²sec)	—	$3{,}5.10^{13}$
Szolgáltatási lehetőségek:		
Vízszintes kísérleti csatorna (drb)	10	11
Függőleges besugárzó csatorna (drb)	30	30
Aktivációs analitikai besugárzó berendezések (drb):	1	2

FOTOEFFEKTUS IGEN NAGY FÉNYINTENZITÁSOKNÁL: A TÖBBFOTONOS FOTOEFFEKTUS KIMUTATÁSA LASERFÉNNYEL

Farkas Győző
KFKI Optikai Főosztály

Ismeretes az a rendkívüli fontos szerep, melyet a fotoeffektus felfedezése és értelmezése jelentett a kvantumelmélet kialakulásának korai éveiben.

A H. Hertz, majd Lénárd Fülöp által végzett kísérletek során kiadódott, hogy egy „A" kilépési munkával rendelkező fémből ν frekvenciájú és I intenzitású fénnyel történő megvilágítás hatására időkésés nélkül E_k kinetikus energiával bíró elektronok olyan amissziója lép fel, melyre

$$h\nu = A + E_k, \tag{1}$$

$$j \propto I \tag{2}$$

ahol j a fotoelektron-áram, tehát a $j = f(I)$ függés *lineáris*. A jelenség értelmezése Einstein nagyarázat alapján egyszerűvé vált: egy adott $h\nu$ energiájú foton direkt kölcsönhatásba lép egy adott elektronnal az (1)-nek megfelelő energiacsere útján, megmagyarázva egyben a $j \propto I$ linearitást és az elektronkilépés promt jellegét.

A későbbi évtizedek során a kvantummechanika alapkérdéseire vonatkozó optikai kísérletek mindegyike hangsúlyozottan a fotoeffektus útján történő detektálás lineáris jellegén alapult, így a KFKI-ban 25 évvel ezelőtt végzett ismert fotonkísérletek is.

Alapvetően megváltozott a helyzet azonban a laserek megjelenésével; a rendkívül intenzív fénynyalábok alkalmazása során a foton-elektron kölcsönhatási folyamatok új formában jelentkeznek. A $h\nu < A$ esetben ui. (1) alapján például semmiféle elektronkilépés nem volna lehetséges, ugyanakkor az intenzív laserbesugárzás az anyagot akár fel is robbanthatja. Milyen elektronemissziós folyamatokat várhatunk ezért általában amikor a nagyintenzitású lasernyalábban oszcilláló elektromágneses tér kölcsönhat a fém elektronjaival? A fémnek egyszerűsített derékszögű potenciálgödröt tulajdonítva az emissziós jelenségek várható formáit az 1. ábrán vázoltuk:

1, Fotoeffektus
2, Optikai alagút-effektus: a potenciálfalat a fény elektromos tere periodikusan „letöri"
3, Termikus emisszió: az abszorbeált fényenergia felmelegíti a fémet.

Világos, hogy ezen — általában együttesen jelentkező — folyamatoknál figyelembe kell vennünk, hogy az intenzív lasernyalábokban oszcilláló elektromos terek már összemérhetők lehetnek az elektronokat a fémben kötő Coulomb terekkel. Így a jelenségkör vizsgálatát mind elméleti, mind kísérleti szempontból sajátos módszerekkel kell végezni: a kutatások célkitűzése azon új alapvető jelenségek kísérleti feltárása és elméleti értelmezése, melyek az igen erős perturbációk esetén esetleg a perturbációszámítás magasabb közelítéseivel, sőt annak érvényességi határait meghaladó perturbációk esetén, eddig ismeretlen törvényszerűségek útján magyarázhatók meg.

Ezen kérdések tisztázása céljából indultak meg a lesernyaláboknak a fémekkel történő kölcsönhatásait vizsgáló kutatások a KFKI-ban az 1965-ös év folyamán.

Elméleti meggondolások

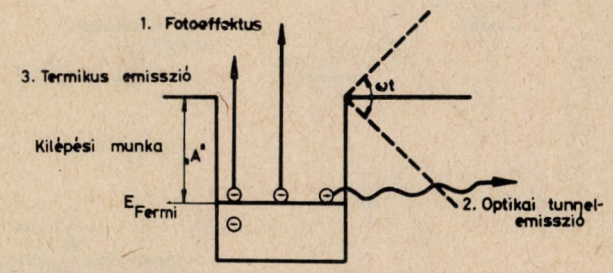
Hogyan valósulhat meg egyáltalán a fotoeffektus fémekben?

Sommerfeld nyomán a vezetési elektronokat szabadelektron-gázként tekinthetjük. Szabadelektron azonban mint ismeretes, nem abszorbeálhat fotont, mivel az energia-, és impulzusmegmaradás nem biztosítható egyidejűleg. Ezért egy „harmadik test" jelenléte szükséges. Erre két lehetőség adódik. Először, az elektron a fém felületén fellépő hirtelen ($\sim 10^{-7}$ cm) potenciálugrás mint „harmadik test" terében abszorbeálhat fotont: ezen folyamat az optikai elektromos térvektornak a fém felületére merőleges komponensétől függ. Ez a *felületi fotoeffektus*, melynek küszöbenergiája $A = 2-5$ eV. Másrészt, a fém periodikus kristályrácsához kötött elektron is abszorbeálhat fotont a rácsnak mint „harmadik test"-nek segélyével: ez a *térfogati fotoeffektus*, mely nem függ a fény polarizációjától és küszöbenergiája $A = 8-10$ eV. A kisebb „A" értékek következtében elsősorban felületi fotoeffektus valósulhat meg fémekben rubin ($h\nu = 1{,}8$ eV), illetve Nd($h\nu = 1{,}2$ eV) lasereket használva.

Rögtön felvetődik azonban a kérdés: ha $A = 4-5$ eV kilépési munkájú tiszta fémeket és $h\nu = 1-2$ eV fotonenergiákat alkalmazzuk akkor $h\nu < A$, az (1) Einstein-egyenlet nem valósulhat meg; hogyan jön létre mégis fotoelektron emisszió?

Tudjuk, hogy az (1,2) összefüggések azon perturbációszámítás eredményei, amelyeket a $V(\vec{r})$ potenciálgödörrel rendelkező fém és az $\vec{A}(\vec{r}, t)$ vektorpotenciállal leírt fénysugárzás esetén a Schrödinger-egyenlet megoldásakor nyerünk, a

$$h\nu \geq A$$



Lasersugárzás hatására fellépő lehetséges elektronemissziós folyamatok fémekből

1. ábra

feltétel mellett a *perturbációszámítás első közelítése esetén*. A $h\nu < A$ esetekre a megoldás a perturbációszámítás magasabb rendű közelítéseiből adódik; általában az $n = \left[\frac{A}{h\nu} + 1\right]_{\text{egészrész}}$ esetben az n-edik közelítés adja az eredményt, amikor az (1,2) összefüggések helyébe az új

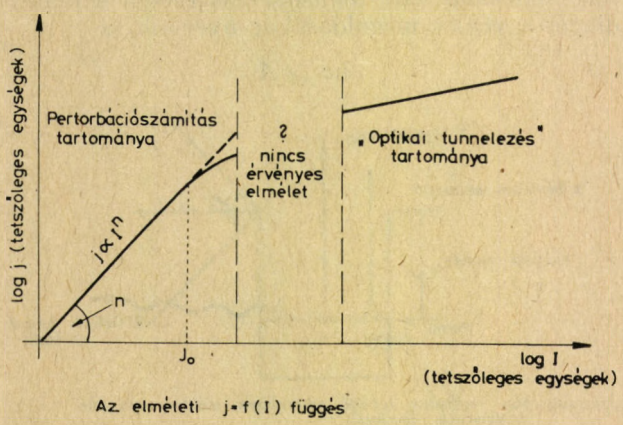
$$n\,h\nu = A + E_k \tag{3}$$

$$j \propto I^n \tag{4}$$

összefüggések lépnek, tehát a fotoáram fényintenzitásfüggése *nem lineáris:* a folyamatot úgy foghatjuk fel, hogy egyetlen elektronnal n számú foton lép egyidejűleg kölcsönhatásba. Ezért ezen jelenséget *n-ed rendű többfotonos fotoeffektusnak nevezzük.*

Világos azonban, hogy nagy I értékeknél már nem szabad alkalmaznunk egyszerűen a perturbációszámítást, melynek alkalmazhatósági köre az ismert kritériumok által korlátozva van. Ezen esetekre Keldis munkája nyomán általánosabb elméleti módszereket dolgoztak ki éppen napjainkban, melyek már nem az egyszerű perturbációszámításon alapulnak. Eredményeiket log–log skálán a 2. ábrán vázoljuk, ahol a görbe iránytangense éppen n-et adja. Láthatjuk, hogy a viszonylag alacsony I fényintenzitások tartományában visszaadják az n-ed-rendű perturbációszámítás $j \propto I^n$ eredményét, majd attól eltérnek; igen nagy I értékekre pedig közelítőleg a klasszikus tunnelemisszió formuláját adják. A közbenső I értékeknél ezen elméletek sem alkalmazhatók. Fő eredményük, hogy megadnak egy I_0 küszöbintenzitást, melynél $j = f(I)$ eltér az n-edrendű hatványfüggéstől, mely tény jelzi, hogy már nem csupán „tiszta" n-fotonos folyamattal állunk szemben: megkezdődik az átmenet az optikai tunnelemisszió felé.

Végül a legújabb számítások a kísérletekkel egybehangzóan megmutatták, hogy nagy I értékek felé, viszonylag hosszú idejű gerjesztő fényimpulzusokat használva, az anyag felmelegedése következtében fellépő termikus emisszió túlszárnyalja a fotoáramot. Ezért igen rövid fényimpulzusok alkalmazása ajánlatos; ekkor azonban további újabb jelenség várható: nem lévén idő teljes termikus egyensúly kialakulásához, csupán a vezetési elektrongáz melegszik fel ami a Fermi-eloszlás, vagyis „A" dinamikus megváltozásához vezet újabb $j = f(I)$ függést adva az igen nagy intenzitások tartományában.



Az elméleti j=f(I) függés

2. ábra

Megjegyezzük, hogy az itt ismertetett elméletek nagy része a KFKI-ban végzett kísérleti eredmények stimuláló hatására jött létre.

Kísérleti eredmények

A lasersugárzás hatására fellépő elektronemisszió mechanizmusának tanulmányozása céljából végzett kísérletekben általában leggyakoribb két típus: a rubinlaser ($h\nu \sim 1{,}8$ eV), ill. a Neodimiumlaser ($h\nu \sim 1{,}2$ eV) fényimpulzusait szokás használni. Ezen laserek háromféle impulzusformát szolgáltatnak:

a, Mikroszekundumos (10^{-6} sec) impulzusokat statisztikus időbeli egymásutánban. Teljesítményük: $\sim$ 10 Kilowatt

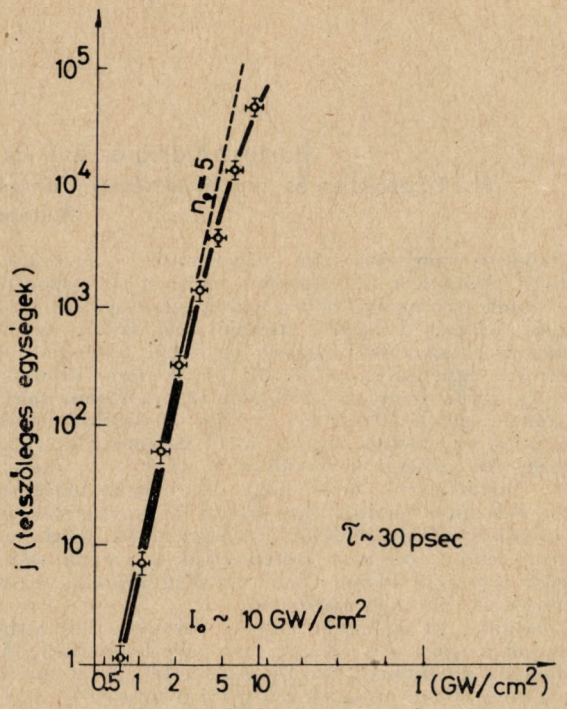
b, Nanoszekundumos (10^{-9} sec) tartamú egyes lefutású ún. „óriási impulzusokat", teljesítményük: $\sim$ 100 Megawatt

c, Pikoszekundumos (10^{-12} sec) ún. „ultrarövid" impulzusokat, ill. impulzussorozatokat; teljesítményük: $\sim$ 1 Gigawatt.

Ezen impulzusokat a monitort képező linerás fotocellára, ill. a vizsgálandó katódra irányítva egyidejűleg mérhető a bemenő fényimpulzus I intenzitásával arányos, ill. a vizsgálandó fotokatódból kiváltott j emissziós árammal arányos jel, melyekből a $j(I)$ függés meghatározható. Az előzőekben vázolt elméletek megadják mindazon ismérveket, melyek segélyével a kísérletek eredményéből a „tiszta" többfotonos felületi fotoefektus fellépése egyértelműen azonosítható; ezek közül a legfontosabbak:

1. Polarizációfüggés: a felületi fotoeffektus az E elektromos fényvektornak csupán a katód felületére merőleges $E_\perp$ komponensétől függ, míg a térfogati fotoeffektus és a hőemisszió árama az elektromos fényvektor $|E|$ abszolút értékétől.
2. A $j(I)$ függés $j \propto I^n \propto |E_\perp|^{2n}$ alakú, egészen $\sim$10 Gigawatt/cm^2 értékekig, melyeken túl a függés már más jellegű. A kísérletekből „n" meghatározható.
3. A fotoelektronok kilépése promt, míg a termikus elektronok „késnek".

A többfotonos fotoeffektus kimutatására irányuló első kísérletek melyekben „a" típusú „hosszú" impulzusokat használtak, nem vezettek sikerre, mivel csupán a felmelegedésből származó termikus emissziót tudták észlelni. Azért a KFKI-ban optimális és lehetőleg ideális körülményeket megvalósító kísérletsorozatokat indítottunk: először rövid „b" típusú, majd később ultrarövid „c" típusú pikoszekundumos impulzusokat alkalmazva és iedális optikai (reflexiós) tulajdonságokkal bíró nemesfém (Au, Ag), ill. Ni katódokat használva, melyekre a lasernyalábot kb. 5°-os súrlódó be-



3. ábra

eséssel ejtettük. Így egyrészt az impulzusok igen rövid tartama, másrészt a szinte 100%-os reflexió következtében az abszorpció igen nagymértékű háttérbeszorításával a termikus emissziót kellően kiküszöböltük.

Vizsgálataink első lépéseként (Rubin laser; „b" típusú impulzus; Ag katód) polarizációfüggés útján kimutattuk, hogy tiszta fotoemisszió $h\nu < A$; $n = 3$ esetben is fellép, amikor is j kizárólag az E elektromos fényvektornak a katódra merőleges $E_\perp^n$ komponensétől függ: a fotoeffektus többfotonos és felületi jellegű.

Következő kísérletünkben (Rubin laser; „b" típusú impulzus és Ag katód) meghatároztuk a $j(I)$ függést. Kiadódott, hogy a viszonylag alacsony (a katód felületére átszámított ($I = 0{,}2$—$0{,}5$ MW/cm^2 intenzitásértékig az elméleti $n = \left[\frac{A}{h\nu} + 1\right]_{\text{egészrész}} = \left[\frac{4{,}8}{1{,}8} + 1\right]_{\text{egészrész}} = 3$ értékeket kaptunk a $j \propto I^n$ összefüggésre, majd nagyobb intenzitások felé a függés erősebb. Ennek magyarázatát további kísérleteink adták meg: az $I \sim 0{,}2$—$0{,}5$ MW/cm^2 tartományban az elektronok megjelenése promt (= fotoelektronok), míg a $\sim 0{,}5$—$1{,}2$ MW/cm^2 tartományban az elektronok késnek: a termikus emisszió dominál; itt a j impulzusok időbeli alakja is eltorzul és szabálytalanná válik. A $j(I)$ függésnek magasabb I laserintenzitások tartományában történő vizsgálata céljából ezért újabb kísérleti körülményeket kellett választanunk: áttértünk a 3 nagyságrenddel rövidebb, ugyanakkor kb. szintén 3 nagyságrenddel intenzívebb „c" típusú pikoszekundumos és gigawattos laserimpulzusok sorozatának alkalmazására. A használt laserhullámhosszak ill. „A" értékek különböző kombinációjával az $n = 2, 3, 4, 5$ esetekben ki tudtuk mutatni $I \sim 1$ GW/cm^2 intenzitások mellett a tiszta többfotonos fotoeffektust a termikus emisszió minden nyoma nélkül, amit az újabb polarizációfüggés-kísérleteink is alátámasztották kimutatva, hogy $j \propto |E_\perp|^{2n}$. Későbbi munkánkban a laserintenzitás további növelésével megtaláltuk az elméletileg megjósolt I_0 küszöbintenzitás-értéket, mely felett az emisszió már eltér a $j \propto I^n$ összefüggéssel jellemezhető többfotonos fotoeffektus mechanizmusától, jelezve az optikai tunnelemisszió hatásának jeleit (3. ábra). Ezen I_0 érték kb. 10 GW/cm^2-nek felelt meg (ekkor a fényben oszcilláló elektromos térerősség értéke: $E_\perp \sim$ $\sim 10^7$ V/cm). A megfigyeléshez a kísérleti adottságokból következően $\tau = 7$ psec, ill. $\tau = 30$ psec-os időtartamú egyes lefutású laserimpulzusokat használtunk, melyek tartamát a laser $\Delta\nu$ sávszélességn határozta meg: $\Delta\nu \cdot \tau \sim 1$ formában. Amennyiben ezzel ellentétben más, a $\Delta\nu$ és τ között bonyolult relációnak megfelelő $\sim 10^{-13}$ sec-nak megfelelő szubszerkezettel rendelkező ~ 50—100 psec-os fényimpulzusokat alkalmaztunk $n > \left[\frac{A}{h\nu} + 1\right]_{\text{egészrész}}$ értékeket kaptunk, mely eredményt egyes külföldi szerzők a Fermi-eloszlás fentebb említett ultragyors dinamikus megváltozásából következő, más, különböző, $n' \leq n$ rendű többfotonos fotoemissziófolyamatok szimultán fellépésével magyaráznak. Ezt azon kísérleti tény is alátámasztja, hogy a polarizációfüggés itt is a fény elektromos vektorának a felületre merőleges $E_\perp$ komponenstől függ.

Megjegyezzük, hogy felsorolt kísérleteink mindegyike az irodalomban elsőként mutatta ki az említett effektusokat, melyeket mások megismételtek alátámasztva saját eredményeinket; ugyanekkor munkáink hatására a problémakör nemzetközi irodalmában nagyszámú új elméleti munka született. Az eredmények összefoglalása és diszkussziója több nagy nemzetközi monográfiában megtalálható.

Munkáink egyrészt a Moszkvai FIAN-nal, Prohorov, Keldis akadémikusok és munkatársaik segítségével, másrészt a Saclay-i kutatóközpont kutatóinak közreműködésével igen szoros együttműködésben folynak.

A STATISZTIKUS TERMODINAMIKA ELEMEINEK BEVEZETÉSE A KÖZÉPISKOLÁK III. OSZTÁLYÁBAN

Bartucz Mária és Ruff Imre
ELTE Szervetlen és Analitikai Kémiai Tanszék, Budapest

. . . A mikroszkopikus részecskék mozgására vonatkozó legegyszerűbb valószínűségi törvényszerűségek megismerése lehetővé teszi, hogy:

1. a fizikai-kémiai rendszerek makroszkopikusan észlelhető állapotát molekuláris szinten is tudjuk kvantitatív módon jellemezni;

2. a molekuláris szintről kiindulva megtaláljuk azt az „erőt", amely arra lesz jellemző, hogy a fizikai-kémiai rendszerekben a makroszkopikus paraméterek változásának hatására bekövetkező átalakulások miért úgy és addig játszódnak le, ahogyan ezt tapasztaljuk.

A kitűzött feladatok megoldását egy egyszerű rendszer modelljén kezdjük el, s az itt kapott eredményeket fogjuk általánosítani.

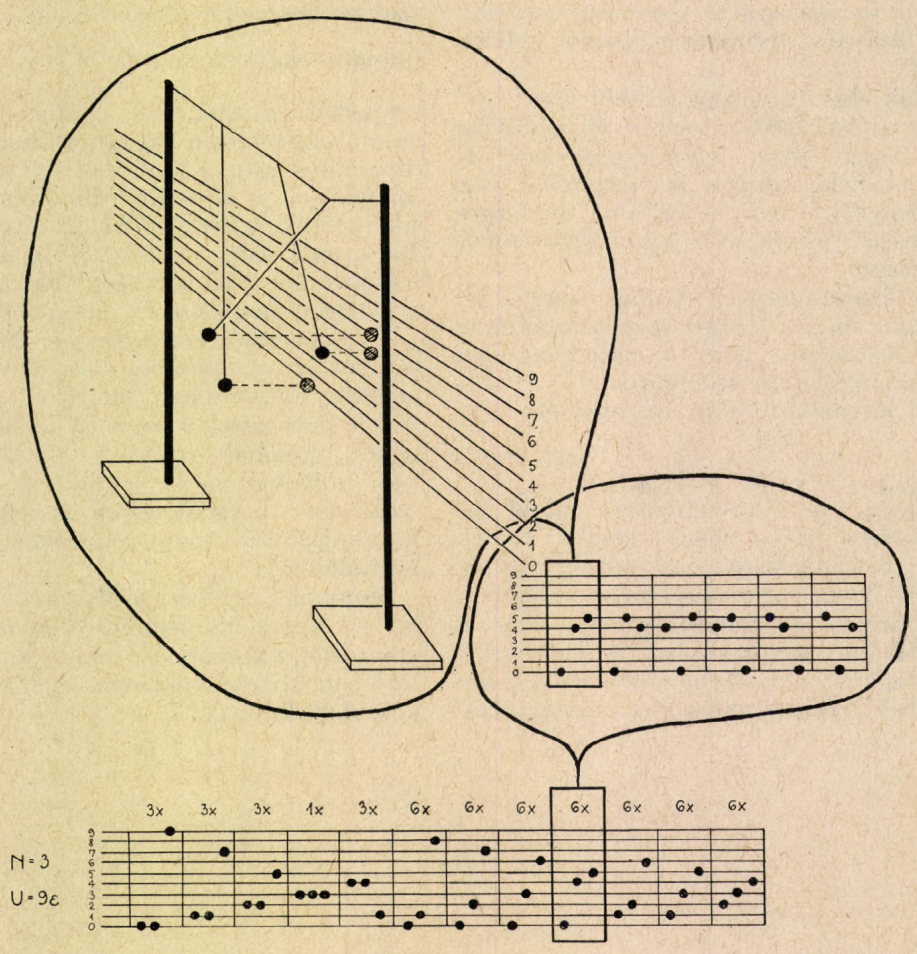
Az egyszerű rendszer legyen egy *szilárd test*, például szilárd nemesgáz, és álljon mindössze három atomból. A szilárd testek jellemzője, hogy a kristályt felépítő részecskék a gázmolekulákéhoz hasonló rendezetlen transzlációs mozgást nem végezhetnek, „helyhezkötöttek". Számukra a rendezetlen mozgást a rácspontokhoz, mint egyensúlyi helyzetekhez viszonyított *rezgőmozgás* jelenti. A három atomból álló szilárd testnek készítsük el az alábbi nagyon egyszerű modelljét! (1. ábra) Az egyensúlyi helyzetük körül rezgő atomokat egy-egy ugyanolyan hosszú fonálon függő, azonos méretű és tömegű golyó jelképezze, melyek nyugalmi helyzetük, mint egyensúlyi helyzet körül ingamozgást végezhetnek. Az atomok közti kölcsönhatást — a rácserőket — modellezzük azzal, hogy mindhárom ingát egy közös vízszintes fonálra függesztjük fel. egymástól azonos távolságra (rácsállandó). Ezzel az ingák közti energiacsere lehetőségét is megteremtettük (az ingák csatolt rezgést végeznek), hiszen a szilárd test atomjainak rezgési energiája is *változhat, cserélődhet.*

Lendítsük ki az egyik golyót vízszintes helyzetbe! Hagyjuk magára a rendszert, csak véletlenszerűen, időközönként pillantsunk rá. Tételezzük fel, hogy súrlódó közeg nincs, tehát az ingák csillapításmentesen lengenek. Először csak azt figyeljük meg, hogy amikor a rendszerre nézünk hány golyó mozog, hány van nyugalomban. Elég nagyszámú megfigyelés alapján a következőket mondhatjuk. Azokat az állapotokat tapasztaljuk leggyakrabban, amelyekben mind a három golyó leng és

---

Elhangzott az ELFT rendezésében Zalaegerszegen megtartott Anyagszerkezet 76' ankéton.

Részletek az MTA Elnökségi Közoktatási Bizottságának kísérleti tantervéhez készülő jegyzetből.



1. ábra

ezek különböző mértékben térnek ki az egyensúlyi helyzetből, vagy csak kettő tér ki, szintén különböző mértékben, a harmadik golyó pedig nyugalomban van. Ezek a rendszer *mikroszkopikusan rendezetlen* állapotai. Azokat az állapotokat, amelyekben vagy egyformán leng mind a három golyó, vagy kettő azonos módon tér ki és egy nyugszik, ritkán észleljük. Ezekben az állapotokban a rendszerben mikroszkopikusan valamiféle *rend* uralkodik.

A következőkben már ne csak azt figyeljük, hogy egy-egy rápillantáskor hány inga mozog és hány áll, hanem az ingák mozgását és nyugalmát írjuk le kvantitatívan is. A klasszikus mechanikai ismereteink azt sugallják, hogy ez igazán nem probléma, felírjuk mindhárom inga mozgásegyenletét a megfelelő kiindulási feltételeket figyelembe véve. Ezekből ki lehet olvasni, hogy melyik golyó mikor, hogyan fog mozogni.

Ne felejtsük el azonban, hogy mit modelleznek ezek a golyók! Egy szilárd test egy-egy atomját, vagyis egy rendszer mikroszkopikus alkotórészeit. Lehetnek-e az *egyes* részecskék mozgásáról olyan megfigyeléseink, melyek alapján minden egyes atom mozgásegyenletét felírhatjuk?

A vizsgált rendszerről információkat gyűjteni mérésekkel, kísérletekkel tudunk. A mérési eredmények csak a rendszer makroszkopikus állapotát jellemzik, mert a mérőeszközök egyszerűen méretüknél fogva (sok nagyságrenddel nagyobbak, mint a rendszert alkotó részecskék) nem alkalmasak arra, hogy figyelemmel kísérjék a rendszer minden egyes részecskéjének mozgását, „sorsát".

Az elkészített modell tehát „tökéletesebb", mint a modellezett rendszer, több információt ad, mint amennyit a vizsgált rendszerről valóban kaphatunk. Az *egyes* atomokról túl sokat tudunk.

A makroszkopikus rendszer mikroszkopikus részecskéinek mozgását, lehetséges állapotait körülbelül úgy tudjuk figyelemmel kísérni, úgy észleljük, ahogyan pl. egy vak ember tájékozódna a golyók mozgásáról a mi modellünkben. Ezt például a következőképpen tehetné meg. Kilendíti az egyik golyót vízszintes helyzetbe — energiát közöl a rendszerrel —, majd a rendszert magára hagyja. Elhelyez egy lemezt a golyók lengési síkjára merőlegesen és figyeli a koppanásokat. A megfigyeléseit különböző „lemezállásoknál" megismétli. Ha a lemez távol van, többszöri ismétlés esetén is csak ritkán hall koppanásokat, ha közelebb viszi, egyre gyakrabban, esetleg különbséget tud tenni a koppanások erőssége között is.

A golyók mozgásának ilyen megfigyelése miről tájékoztatja a vak embert és miről nem? Amikor pl. a lemez messze van a rendszertől nagyon ritkán hall koppanást. Ebből arra következtethet, hogy az általa közölt energiából nagyon kevésszer jut egy-egy ingának annyi, hogy elérje a távoli lemezt. Ha közelebb viszi a lemezt, nő az ütközések száma, ami azt jelenti számára, hogy azok az esetek gyakrabban valósulnak meg, amelyekben a rendszerrel közölt energia kisebb adagokban, több golyóra oszlik el. Azt viszont sohasem fogja tudni, hogy pontosan melyik golyó koppanását észlelte. Makroszkopikusan a rendszerről ugyanazt észleli, ha az első és a második golyó mozog, a harmadik pedig áll (meghatározott helyzetből figyelve a rendszert) és akkor is, ha a második van nyugalomban, és az első meg a harmadik mozog. Megfigyelőnk tehát csak a három golyó *együttesének* valószínű mozgását ismerheti meg. A koppanásokból azt megtudhatja, hogy éppen akkor hány golyó mozgott, hány állt, de azt már nem, hogy melyik golyó pontosan mit csinált.

Miután a golyók, és ezzel az általuk modellezett mikroszkopikus részecskék mozgásának jellemzésére a mozgásegyenletekkel való egyenkénti leírás nem alkalmas, más útat kell keresnünk. Helyezzünk el a berendezés mellé az 1. ábrán látható módon *energiaskálát* is, melynek osztásrészei ε távolságban vannak egymástól. A skálán a legnagyobb energiaérték 9ε, ekkora összenergiával rendelkezik bármelyik golyó és egyúttal az egész rendszer, ha a golyót vízszintesen kimozdítjuk.

Továbbra is véletlenszerűen figyeljük az ingák lengését, de most már az energiaskáláról azt is olvassuk le, hogy egy-egy ránézéskor mekkora energiával rendelkeznek a mozgásban levő golyók. Ezeket az energiaértékeket a lengések fordulópontjában olvassuk le. Ha nem pontosan 0, ε, 2ε, ..., 9ε nagyságúak, akkor megfelelően le-, illetve felkerekítünk. Így minden egyes megfigyeléskor tulajdonképpen azt tudjuk meg, hogy a rendszerrel közölt összesen 9 energia hogyan oszlik meg a három inga között. A kiindulási állapotban pl. két inga nyugalomban van, egy pedig 9ε energiával rendelkezik. Megfigyeléseink nagyon szemléletessé válnak, ha egy olyan „kottán" rögzítjük őket, melynek egy-egy vonala egy-egy energiaértéknek, energiaszintnek felel meg, a kiindulási állapotot pl. a 2. ábrán látható módon. Ez a három részecskének egy lehetséges eloszlása a különböző energiaszinteken, azt a feltételt figyelembe véve, hogy a rendszer összenergiája 9ε. Másképpen: a 9ε energia egy *lehetséges eloszlása* három részecske között. Ugyanez az eloszlás még kétféleképpen valósulhat meg (l. a 3. ábrán).

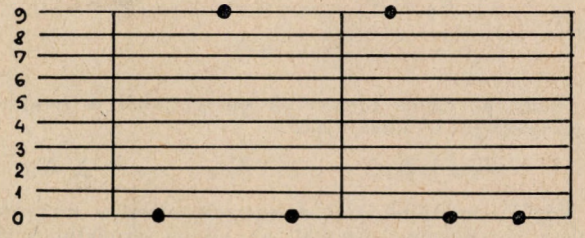
A modell-rendszerre való egyik rápillantáskor azt tapasztaljuk, hogy két inga leng, egy pedig nem. Hányféleképpen részesülhet a három inga a 9ε összenergiából úgy, hogy ránézéskor a rendszernek ilyen állapotát észleljük? A lehetséges eloszlások megkereséséhez használjuk az „energiakottát"! Mivel egy inga nyugalomban van, ezt rögtön bejelölhetjük a 0 energiaszinten. Mivel a három inga közül bármelyik lehet az, amelyik áll, ezért ez három lehetőséget jelent. A következő ingának 0 és 9ε nagyságú energiát kivéve bármekkora energiája lehet. Legyen 4ε energiája, s akkor a harmadik ingát jelképező golyó már csak az 5ε energiának megfelelő szintre kerülhet. A második golyó elhelyezésére a kottán még két lehetőség van (kerülhet a 4ε és az 5ε energiájú szintre is), a harmadikéra azonban már csak egy. A 9ε energiának 0; 4ε; 5ε „adagokban" való eloszlása a három ingára tehát összesen hatféleképpen valósulhat meg. Ezeket lerajzoltuk az 1. ábrán. A rendszernek a „két inga leng, egy áll" állapotát még háromféle eloszlás eredményezheti, s ezen eloszlások mindegyike szintén hatféleképpen jöhet létre.

Egy másik megfigyeléskor azt tapasztaljuk, hogy mindhárom inga mozog. Ha leolvassuk az energiájukat is, az összesen lehetséges hét energia értékhármas valamelyikét kapjuk. A rendszernek „a mind a három inga mozog" állapotában a 9ε energia eloszlása a három ingára háromféle lehet. Az egyes eloszlások még, egy kivételével, mind három- vagy hatféleképpen valósulhatnak meg.

A rendszerrel közölt 9ε energiának a három inga között tehát tizenkét *lehetséges eloszlása* van. Ezt a tizenkét eloszlást lerajzoltuk az 1. ábrán. Egy-egy lehetséges eloszlás megvalósulási lehetőségeinek száma azonban eltérő. Azok az eloszlások jöhetnek létre többféleképpen (6), amelyekben az egyes ingák energiája külön-



2. ábra



3. ábra

böző, amelyekben pedig vannak azonos energiával rendelkezők, ott a lehetőségek száma lecsökken (3 vagy 1). A lehetséges tizenkétféle eloszlás *megvalósítási lehetőségeinek* száma összesen 55.

A következőkben próbáljuk meghatározni menyi annak a valószínűsége, hogy ha legközelebb ránézünk az ingákra, akkor azok éppen az (1ε; 3ε; 5ε) energiaeloszlással jellemezhető állapotban lesznek. Azt, hogy az 55 eloszlás bármelyike ugyanolyan valószínűséggel létrejöhet, az ingák közti energiaátadás lehetővé tétele biztosítja. Annak, hogy a 12 lehetséges, de 55-féleképpen megvalósítható eloszlás valamelyikét észleljük $P = \frac{1}{55}$ a valószínűsége. A bennünket érdeklő eloszlás megvalósítási lehetőségeinek száma azonban 6, tehát a kérdezett valószínűség $P' = \frac{6}{55}$. Ez a vizsgált esemény bekövetkezésének matematikai valószínűsége. Vezessük be a matematikai valószínűség helyett a *termodinamikai valószínűség* fogalmát. Ez egyszerűen a vizsgált mennyiség (itt most az energia) a rendszert alkotó mikroszkopikus részecskék közötti *egy lehetséges eloszlásának megvalósítási lehetőségei számával* azonos.

A termodinamikai valószínűség tulajdonképpen nem más, mint a matematikai valószínűség kifejezésének számlálója. Zárt rendszer esetén tehát a termodinamikai és a matematikai valószínűség arányosak egymással, hiszen az összes megvalósulások száma (a nevező) állandó. Így a termodinamikai valószínűség is kifejezi azt, ami számunkra fontos: megmondja, hogy mennyivel többször fogjuk látni az egyik fajta eloszlást, mint a másikat, vagy a harmadikat, ha véletlenszerűen oda-odanézünk az ingák rendszerére. Úgy is fogalmazhatjuk ezt, hogy a termodinamikai valószínűség megmondja, hogy viszonylag mennyivel *hosszabb időt* tölt a rendszer egy adott állapotban, mint a másikban.

A 3 részecskés modellben az egyes eloszlások termodinamikai valószínűsége tehát 1,3 vagy 6 lehet. Pl. a (0; 3ε; 6ε) eloszlással jellemezhető állapot termodinamikai valószínűsége, vagyis megvalósulási lehetőségeinek száma, $w = 6$. A továbbiakban a k-adik eloszlás termodinamikai valószínűségét jelöljük w_k-val, és W-vel az összes lehetséges eloszlás termodinamikai valószínűségének összegét, tehát:

$$W = \sum_k w_k$$

Mielőtt tovább folytatnánk az ismerkedést a makroszkopikus fizikai-kémiai rendszerekkel és az azokat felépítő mikroszkopikus részecskék világával, foglaljuk össze röviden, amit a három részecskéből álló szilárd test mikroszkopikus viselkedéséről az „ingás modell" segítségével kideríttettünk.

A rendszer lehetséges állapotait mikroszkopikusan a rendszerrel közölt összes *energiának* a szilárd testet alkotó atomok közt lehetséges eloszlásaival jellemeztük. Figyelembe vettük azt, hogy minden atomnak ugyanazok a lehetséges energiaszintjei (ε_0, ε_1, ε_2, ..., ε_i, ...). Egy-egy megvalósuló eloszlást ismerünk, ha a következőket tudjuk róla:

Mennyi a különböző energiaszinteknek megfelelő energiával rendelkező részecskék száma (N_0, N_1, ..., N_i, ..., N_9)? Feltétlenül teljesülnie kell minden eloszlás esetén, hogy a különböző energiájú részecskék számának összege kiadja az összes részecskeszámot:

$$N_0 + N_1 + \ldots + N_i + \ldots = N,$$

azaz

$$\sum_i N_i = N,$$

és hogy az egyes részecskék energiájából a rendszer összenergiája is kiadódjék:

$$U = N_0\varepsilon_0 + N_1\varepsilon_1 + \ldots + N_i\varepsilon_i + \ldots = \sum_i N_i\varepsilon_i$$

Végül ismernünk kell a vizsgált eloszlás megvalósulási lehetőségeinek számát, az eloszlás termodinamikai valószínűségét (w_k).

A nagyobb termodinamikai valószínűség azokhoz az eloszlásokhoz tartozott, amelyekben a részecskék energiája különböző, vagyis az eloszlásban, a rendszer állapotában nagyobb a rendezetlenség.

Sok részecske legvalószínűbb eloszlása

Közelítsük modellünket jobban a valósághoz: Álljon a vizsgálandó és leírandó rendszer egyre több részecskéből! Vajon az „energiakotta" segítségével hány részecske esetén tudnánk még meghatározni a három atoméhoz hasonló egyszerű módon a lehetséges eloszlásokat és megvalósulási lehetőségeik számát? 4 — 10 részecskéig nagy figyelemmel és következetességgel esetleg még menne tévesztés nélkül, de biztosan elfáradnánk a végére.

Egy grammatomtömegnyi szilárd nemesgázban — maradjunk egyelőre ennél a példánál — nem 10, hanem kereken 10^{23} atom található, sőt ennek akár milliomod részében is 10^{17} részecske van. Az összenergiának ennyi részecske között lehetséges eloszlásait képtelenség lenne az eddigi módszerrel meghatározni. Nemhogy az összes lehetséges eloszlást, de még csak egyet, és az ehhez tartozó megvalósulási lehetőségek számát sem tudnánk leírni. Kell tehát egy általános módszer, amely segítségével nagy részecskeszám esetén is meghatározhatók a lehetséges energiaeloszlások és termodinamikai valószínűségük. Ezt a matematikai módszert *Maxwell* és *Boltzmann* dolgozták ki. Alkalmazásával kiszámítható adott részecskeszám és összenergia mellett a bennünket érdeklő legrendezetlenebb eloszlás megvalósítási lehetőségeinek a száma és az, hogy egy adott energiával hány részecske rendelkezik.

Bárki azonnal megkérdezhetné most, hogy mit jelent a legnagyobb termodinatmikai valószínűségű eloszlás, hiszen az eddigi példákban több eloszlás is rendelkezett ugyanazzal a termodinamikai valószínűséggel, s akkor ezek közül melyik a legvalószínűbb? A vizsgált rendszert alkotó részecskék számának növekedésével egyre kevesebb azonban az azonos, de legnagyobb megvalósulási lehetőségű eloszlások száma, és ezzel párhuzamosan ennek az eloszlásnak, illetve néhány eloszlásnak a termodinamikai valószínűsége olyan nagy lesz, hogy megközelíti az összes lehetséges eloszlás megvalósítási lehetőségeinek az összegét. Végül nagyon nagy részecskeszám esetén már csak egyetlen olyan eloszlás lesz, amelyhez a legnagyobb termodinamikai valószínűség tartozik és e mellett az összes többi gyakorlatilag nem számít:

$$W \approx w_{\max}$$

Senki ne gondoljon azonban arra, hogy ha a rendszer részecskéi „rátaláltak" az energia közöttük lehetséges legvalószínűbb eloszlására, akkor a rendszer ebben az állapotban változatlan marad. A részecskék közti energiacsere más eloszlások megvalósulását is lehetővé teszi, pl. a legnagyobb megvalósulási lehetőségű eloszlásból létrejöhet egy olyan eloszlás, amelyben a k-adik nívóról egy részecske a $(k + 1)$-re, egy pedig a $(k - 1)$-re kerül. E kétféle eloszlás — sok részecskéből álló rendszer esetén — nagyon hasonló. Képzeljük el, hogy adott energia nagyon sok részecskére hány, a legvalószínűbbhöz még nagyon hasonló módon oszolhat el. „Élettartama" során a rendszer „belekerül" az ezeknek az eloszlásoknak megfelelő állapotokba is. A legvalószínűbbtől nagyon különböző eloszlások azonban nagyon gyorsan megszűnnek azáltal, hogy a rendszer sokkal valószínűbben a maximális rendezetlenségbe alakul vissza. A rendszer állapota mintegy „rezeg" a legvalószínűbb eloszlású és az ehhez nagyon hasonló eloszlású állapotok között. Ezt a „rezgést" *fluktuációnak* nevezzük. Mi mégis csak a legvalószínűbb eloszlásról beszélünk, aminek az az oka, hogy a rendszer „élettartamának" nagyon nagy százalékát tölti ebben az eloszlásban, s ennél sokkal rövidebb ideig van a legvalószínűbbhöz nagyon hasonló, de annál sokkal kisebb valószínűségű állapotokban.

A legvalószínűbb eloszlás termodinamikai valószínűségének és a rendszer ezen állapotában az egyes energiaszintekre jutó részecskék számának matematikai úton

való részletes kiszámítását nem mutatjuk be, csak a végeredményt közöljük.

A vizsgált rendszer álljon N számú atomból, és az energia, amelynek az N atom közötti legrendezetlenebb eloszlása érdekel bennünket, legyen U. A *termodinamikailag legvalószínűbb eloszlásban* az $\varepsilon_0, \varepsilon_1, \ldots, \varepsilon_i, \ldots$ szinteken levő, illetve az ezeknek megfelelő energiával rendelkező részecskék száma $N_0, N_1, \ldots, N_i, \ldots$ Ezeket a következő összefüggés segítségével tudjuk kiszámítani:

$$N_i = \frac{N}{f} 10^{-\frac{\varepsilon_i}{rT}} \tag{1}$$

Első látásra biztosan bonyolultnak és ijesztőnek tűnik a képlet, de meg fogjuk látni, hogy nagyon értékes információt tartalmaz számunkra a vizsgált rendszerről.

A képlet szerint az i-edik energiaszinten levő részecskék száma arányos az összes részecske számával (N), „hatványozottan" fordítva arányos a nívó energiájának (ε_i) és a rendszer abszolút hőmérsékletének (T) viszonyával. Van benne még egy állandó, amelyet a gázállandóból és az Avogadro-féle számból a következőképpen kell kiszámítani: $r = \frac{2{,}3 \cdot R}{N_A}$, és végül egy f-fel jelzett dimenzió nélküli mennyiség, melyet pedig az egyes nívók energiája, r és T ismeretében az alábbi módon lehet meghatározni:

$$f = 10^{-\frac{\varepsilon_0}{rT}} + 10^{-\frac{\varepsilon_1}{rT}} + \ldots + 10^{-\frac{\varepsilon_2}{rT}} + \ldots = \sum_i 10^{-\frac{\varepsilon_i}{rT}} \tag{2}$$

Egyszerű józan ésszel nem is vár az ember mást, mint azt, hogy a különböző szinteknek megfelelő energiával rendelkező részecskék száma az összrészecskeszámmal *egyenesen arányos*, adott átlagenergia $\left(\overline{U} = \frac{U}{N}\right)$ és hőmérséklet mellett. Az is nagyon észszerűnek látszik, hogy N_i az energia növekedésével nem lineárisan, hanem annál sokkal rohamosabban változik, exponenciálisan csökken. Egy adott ε_i energiájú állapotot a részecskék annál nehezebben érnek el, minél magasabb ez az energia. De mit jelent az, hogy magas vagy alacsony ez az energiaérték? Ha pl. 1 erg, akkor ez nagy energia vagy kicsi? Nyilvánvaló, hogy minden energiaértéket a részecskék átlagenergiájához kell viszonyítanunk: ha az átlagenergia 10 erg, akkor az 1 erg kicsi, de az 0,1 erg átlagenergiához képest ugyanaz az 1 erg nagy. Az átlagos kinetikus energiáról viszont tudjuk, hogy azt a hőmérséklet méri, tehát egy eloszlásban egy nívó betöltöttsége a nívó energiájának és a hőmérsékletnek a *viszonyától* függ. Alacsony hőmérsékleten a kis energiájú nívókon van sok részecske és azokra a nívókra, amelyek energiája nagyobb, mint a részecskék átlagos kinetikus energiája nem jut részecske, vagy csak nagyon kevés. Az $\frac{\varepsilon_i}{T}$ növekedésével N_i „hirtelen" változik. Magasabb hőmérsékleten a nagyobb energiájú nívókra is számottevő mennyiségben jutnak részecskék, az $\frac{\varepsilon_i}{T}$ hányadossal N_i változásának üteme sokkal lassabb.

Az azonban nem ilyen magától értetődő, hogy N_i ezen túlmenően még függ f-től is úgy, ahogy azt f képlete mutatja. Ezt megmagyarázni, f-nek fizikai jelentést adni még a kiszámítására felírt (2) összefüggés alapján sem tudunk. Mi akkor hát ez az f mennyiség? Milyen információt tartalmaz a rendszerről? Mi a fizikai jelentése?

Ahhoz, hogy a feltett kérdésekre válaszolni tudjunk, előbb alakítsuk át az (1) összefüggést úgy, hogy az f is egy tizes alapú hatvány kitevőjében legyen.

$$N_i = 10^{-\frac{\varepsilon_i + rT\lg f}{rT}} \cdot N \tag{3}$$

Jelöljük a továbbiakban a $-rT\lg f$ mennyiséget $\overline{F}$-gal. (Felülvonással mindig az egy részecskére jutó átlagmennyiségeket jelöljük.)

$$N_i = N \cdot 10^{-\frac{\varepsilon_i - \overline{F}}{rT}} \tag{4}$$

Nézzük meg figyelmesen az átalakított képletet! $\overline{F}$ értéke adott T hőmérsékleten, az $\varepsilon_0, \varepsilon_1, \ldots, \varepsilon_i, \ldots$ nívósorozat esetén *állandó*. Tehát, amikor a legvalószínűbb eloszlásban meghatározzuk az $\varepsilon_0, \varepsilon_1, \ldots, \varepsilon_i, \ldots$ energiával rendelkező részecskék számát, akkor minden esetben az adott nívónak megfelelő energiából ugyanazt az állandó energiaértéket le kell vonni. Ez pedig egyszerűen azt jelenti, hogy a nulla energiának ε_0-hoz való hozzárendelésével nem a legszerencsésebben választottuk meg az $\varepsilon_0, \varepsilon_1, \ldots, \varepsilon_i, \ldots$ nívósorozat nullaszintjét, hiszen ha az adott energiasorozat nullája $\overline{F}$-fel lejjebb lenne, azaz a sorozatban lehetséges minden energiaértékből kivonnánk $\overline{F}$-et (ne felejtsük el, hogy $\overline{F}$ negatív szám), akkor a legvalószínűbb eloszlást leíró összefüggésben nem jelenne meg sem f, sem $\overline{F}$:

$$N_i = N \cdot 10^{-\frac{\varepsilon'_i}{rT}},$$

hiszen az $\varepsilon'_0 = \overline{F}$, $\varepsilon'_1 = \varepsilon_1 + \overline{F}$, és így tovább.

A nívósorozat átszámolásával azonban nem sokat nyernénk, mert ugyan a legvalószínűbb eloszlás kiszámítása egyszerűbb lenne, de előtte a legkényelmesebb energiaskála nullapontjának kiszámítása jelentené a többletmunkát: f (és $\overline{F}$) kiszámítását semmiképpen nem „úszhatjuk meg". Törődjünk ebbe bele, és tekintsük $\overline{F}$-et az energiaszintek egy adott sorozata *természetes nullanívójának*, amelyet azért kell figyelembe vennünk mert a nívósorozat kezdőpontját (nullanívóját) a természet jelöli ki, nem a mi önkényességünk.

Próbáljuk meg inkább azt kideríteni, hogy $\overline{F}$ nem jellemzi-e valamilyen módon a rendszert, illetve mit jelent ez az $\overline{F}$-nívó a rendszer számára? Mi lenne pl. akkor, ha $\varepsilon_0 = \overline{F}$? Helyettesítsük be ezt az energiaértéket a (4) összefüggésbe:

$$N_0 = N \cdot 10^{-\frac{\overline{F} - \overline{F}}{rT}}$$

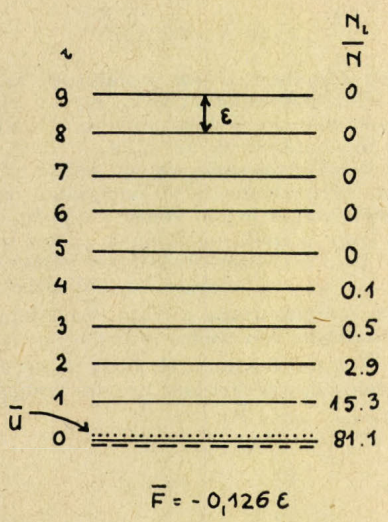
$$N_0 = N$$

Ebben az esetben az *összes* részecske az $\overline{F}$ energiaszinten lenne, minden részecske $\overline{F}$ energiával rendelkezne. Lehetséges-e ez a valóságban? Nem, mert az $\overline{F}$-nívó energiája mindig kisebb, mint a vizsgált rendszer részecskéi számára megengedett legkisebb energiájú állapoté. Ha mégis megvalósulhatna ez az „eloszlás", akkor pl. a modellünkben az ingák $\varepsilon_0 = 0$ (az általunk rögzített skálának megfelelően) energiánál még kisebb energiával rendelkeznének. Az ingák „mélyebbre lógnának", mint ahogy azt a felfüggesztésükre használt madzag engedné. Ugye ez elég nagy képtelenségnek tűnik?

Azt azonban nyugodtan mondhatjuk, hogy *az* $\overline{F}$ *energiaszint egy nívósorozatra jellemző* átlagnívó, amely elég szokatlan, de a rendszer leírása szempontjából jól hasznosítható sajátságokkal rendelkezik. Például $\overline{F}$ egy olyan furcsa átlag, amely az általa jellemzett nívósorozat energiatartományán kívülre esik, mégpedig a rendszer részecskéi számára megengedett legkisebb energiájú szint alá és nem az energiaszintek közé (4. ábra).

Láttuk azt is, hogy ha ezt az energiaszintet is benépesíthetnék részecskék, akkor a részecskéknek nemcsak egy része, hanem mindjárt az összes ezen a nívón lenne. Ezzel egyszerűen értelmét vesztené az a kérdés, hogy a legvalószínűbb eloszlásban hány részecskének van a lehetséges energiaszinteknek megfelelő energiája, megszűnne a statisztika.

Gondoljunk vissza arra, hogyan lehetne $\overline{F}$-t kiszámítani ($\overline{F} = -rT\lg f$, és a (2) összefüggés). Ismerve r, T és a rendszer részecskéi által felvehető energiaértékeket (a nívósorozatot) $\overline{F}$ meghatározható. Nem kell tudnunk azonban, hogy *hány* részecskéből áll a rendszer, $\overline{F}$ értéke ettől *független*. $\overline{F}$ tehát adott hőmérsékleten *csak* a



4. ábra

vizsgált rendszer részecskéi számára megengedett energiaértékektől, ezek sorozatától függ. *Az $\bar{F}$ energiaszint egy nívósorozatra jellemző átlagnívó, amellyel az energiasorozatot helyettesíteni, jellemezni lehet.* ...

... Nem szabad azonban arra gondolni, hogy ha ismerjük az $\bar{F}$-nívó értékét, akkor ez definiál számunkra és a rendszer számára egy hőmérsékletet és egy nívósorozatot. Ez csak fordítva igaz, hiszen lehet ugyanakkora az $\bar{F}$-nívója két különböző nívósorozatú és hőmérsékletű rendszernek.

Az „átlagnívó" néhány tulajdonsága

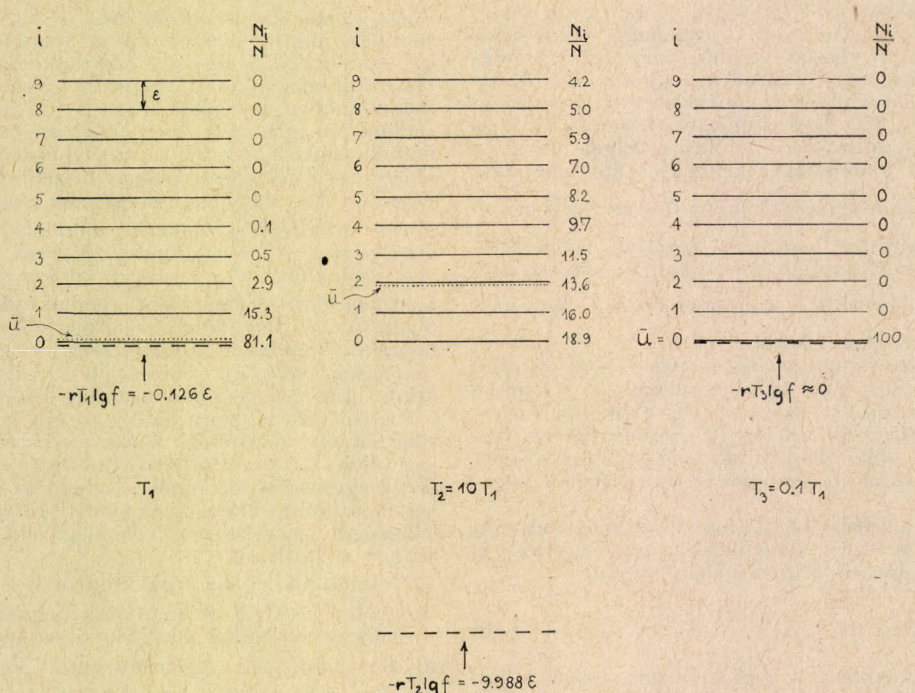
Nézzük meg, hogyan viselkedik ugyanannak az energiasorozatnak az $\bar{F}$-nívója akkor, ha a rendszer hőmérséklete megváltozik, pl. ha az eredeti tízszeresére nő, vagy ha a tizedrészére csökken. A rendszer kiindulási állapotában a hőmérséklet legyen T_1, az egy részecskére jutó energia $\bar{U}$, és a lehetséges energiaszintek közti különbség pedig mindig ugyanakkora, ε. (5. ábra.) A rendszer mindhárom állapotában a nívók mellett feltüntettük a részecskék legvalószínűbb eloszlását is, mégpedig mindig az összrészecskeszámhoz viszonyítva %-ban (relatív betöltöttség).

A *hőmérsékletnövekedés* következtében nő a rendszer összenergiája. Ez alaposan módosítja a számunkra érdekes legvalószínűbb eloszlásban az egyes nívókon levő részecskék számát. Míg T_1 hőmérsékleten az alacsonyabb energiájú nívókon vannak csak részecskék (gyakorlatilag csak az első öt nívón) és ezek száma az energia növekedésével rohamosan csökken, addig a magasabb (T_2) hőmérsékleten a részecskék mintegy „szétszóródnak" a lehetséges nívókra, és az energianövekedésnek viszonylag egyenletesebb részecskeszám-változás felel meg. Ezzel párhuzamosan az $\bar{F}$-*nívó* úgy változik, hogy a nullaszinthez képest *még kisebb energiaértéket képvisel.*

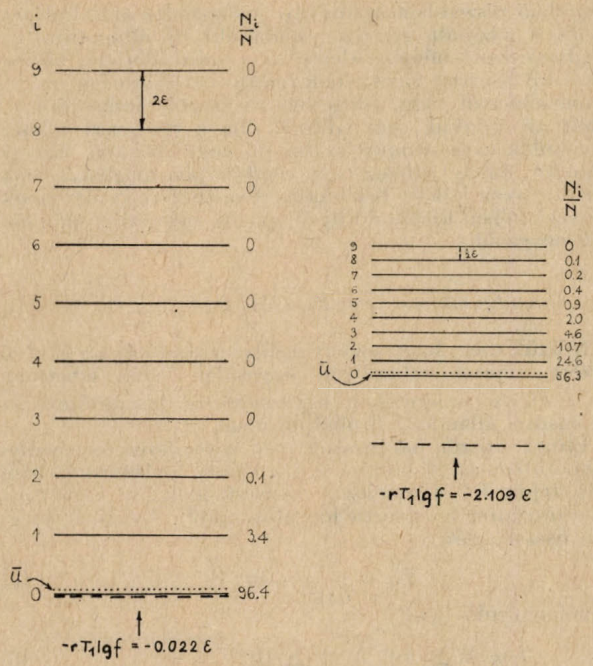
Ha a hőmérséklet *tizedrésze* lesz a kiindulási hőmérsékletnek, akkor a részecskék átlagenergiájának csökkenése következtében a legvalószínűbb eloszlás úgy módosul, hogy csak a legkisebb energiájú nívókon lesznek részecskék (a példánkban csak az ε_0 szinten). Az $\bar{F}$-nívó pedig majdnem egybeesik a nullanívóval, gyakorlatilag egyáltalán nem különbözik attól.

$\bar{F}$ abszolútértékének változása azonban sokkal nagyobb mértékű, mint a hőmérsékletemelkedés vagy csökkenés. Ez érthető is, hiszen $\bar{F}$ egyenesen arányos a hőmérséklettel, de ugyanakkor hatványozottan is függ tőle.

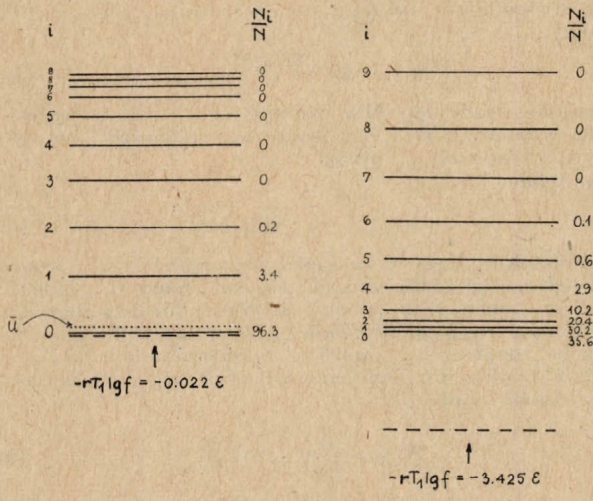
Vizsgáljuk meg most azt, hogyan módosul az összenergiának a rendszer részecskéi közti legvalószínűbb eloszlása és mi történik az $\bar{F}$-nívóval akkor, ha a hőmérséklet és az átlagenergia ugyanakkora marad, de a rendszerben olyan változás következik be, mely eredményeként a részecskék számára megengedett energiaértékek sorozata más lesz. (Majd később látni fogjuk, hogy ilyen pl. a megfagyás és a párolgás folyamata.) Bekövetkezhetnek pl. olyan átalakulások, hogy az összenergia a kiindulási állapothoz képest pl. kétszerakkora vagy feleakkora adagokban cserélődhet a rendszer részecskéi között. Az egyes nívók relatív betöltöttségének és az $\bar{F}$-nívó nullaszinthez viszonyított helyzetének változása olvasható le ezekben az esetekben a 6. ábráról. Az alacsonyabb energiájú nívók relatív betöltöttségének növekedése annak a következménye, hogy a rendszer részecskéi



5. ábra



6. ábra



7. ábra

ugyanolyan körülmények között csak nagyobb (pl. kétszeres) adagokban adhatnak át egymásnak energiát. Ez abban is megnyilvánul, hogy az $\overline{F}$-szint közelebb kerül a nullanívóhoz. A változás hasonló a rendszer állapotában hőmérséklet csökkenés hatására bekövetkező változáshoz.

A kisebb adagokban való energiacsere lehetősége pedig a részecskéknek az adott nívókon való egyenletesebb eloszlását eredményezi. A nívósorozatra jellemző $\overline{F}$-szint „lejjebb" kerül, abszolútértékben nagyobb lesz. Ilyen jellegű a hőmérsékletnövekedés okozta változás is.

Egy rendszer részecskéi számára olyan nívósorozat is megengedett lehet, amelyben a lehetséges állapotok energiája nem azonos értékkel változik, mint az eddigi példákban, hanem ez a különbség fokozatosan nő vagy csökken. Az ilyen energiasorozatoknak megfelelő eloszlásokat és az $\overline{F}$-nívók értékét tartalmazza, meghatározott körülmények között a 7. ábra. . . .

Az egyensúlyi állandó

Eddig megismertük egy nyugalomban levő rendszer — pl. egy tartályba zárt gáz, vagy egy szilárd test — meghatározott körülmények között észlelhető állapota és a rendszer alkotórészeinek a nyugalommal látszólag ellentétes viselkedése (állandó mozgás, egymással való kölcsönhatás, energiacsere) közti kapcsolatot, vagyis megtudtuk azt, hogy a mikroszkopikus részecskék nyüzsgése miként eredményezi a rendszer makroszkópikus megjelenését. Azt is megvizsgáltuk, hogyan függ a mikroszkopikus viselkedés pl. a hőmérséklettől, vagy attól, hogy a rendszer részecskéi mekkora adagokban adhatnak át egymásnak energiát.

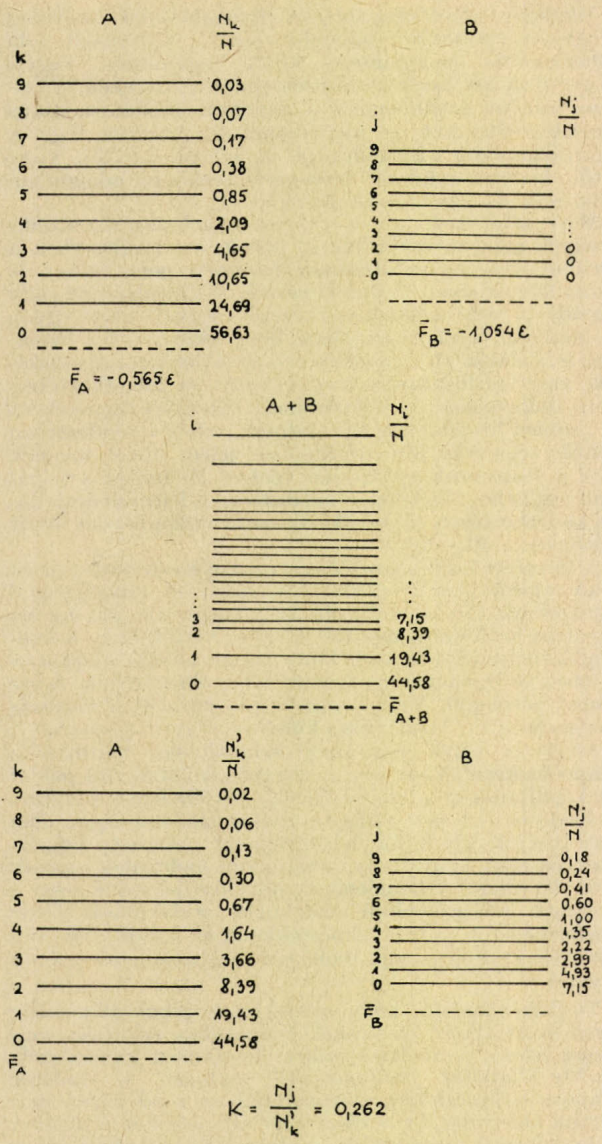
Mostanáig csak olyan rendszerekkel foglalkoztunk, amelyek azonos részecskékből álltak, s a rendszerben a körülmények változtatásának hatására nem zajlott le semmiféle *folyamat* (kémiai reakció, fázisátalakulás vagy a rendszer részecskéinek szerkezetét megváltoztató egyéb átalakulás). Gyakori azonban, hogy akár önként (spontán) is, de akár pl. a rendszer hőmérsékletének, nyomásának vagy térfogatának megváltoztatása következtében ilyen *átalakulások* is lejátszódnak. Ezek eredményeként új „típusú" részecskék keletkeznek, tehát a rendszerben *többféle* részecske lesz egyidejűleg jelen. Miért mennek ezek a változások egyáltalán végbe? Mi hajtja a folyamatokat és hogyan lehet kvantitatívan is leírni az átalakulás következtében kialakuló új, makroszkopikusan ismét változatlan állapotot?

A felvetett kérdésekre először egy egyszerű rendszerben bekövetkező $A \rightleftarrows B$ átalakulás részletes vizsgálatával válaszolunk. Ilyen változás következik be pl., ha az injekciós fecskendőt úgy töltjük meg vízzel, hogy a fecskendő dugattyúja és a víz között nincs levegő, majd a tű nyílását befogva a dugattyút hirtelen elmozdítjuk. A víz elkezd párologni. Meghatározott idő után ez a változás „megszűnik" — legalábbis a külső megfigyelő számára —, a rendszer ismét egy makroszkopikusan változatlan állapotba kerül. Vagy egy, a szerves kémiából vett példa: Az 1,2-dibróm-etán konformációja kétféle lehet, nyújtott és ferde (a (−)-és (+)-ferde konformációkat most nem tekinthetjük két külön lehetőségnek). Alacsony hőmérsékleten csak nyújtott konformációjú molekulák vannak a rendszerben. A hőmérséklet növelése lehetővé teszi a nyújtott konformációjú molekulák átalakulását ferde konformációba. Adott hőmérsékleten az 1,2-dibróm-etán a kétféle konformációjú molekula meghatározott arányú keveréke.

Tudjuk azonban, hogy a makroszkopikus állandóság a rendszert alkotó részecskék állapotában szüntelen változást jelent, a rendszer mikroszkopikusan legrendezetlenebb állapotai „váltogatják" egymást. A rendszer állapota mikroszkopikusan ugyanolyan rendezetlen maradhat akkor is, ha a részecskéi állapotaikat szabadon szakadatlanul csereberélik, átalakulnak egymásba (pl. a gázállapotú részecskék folyadékállapotúak lesznek és fordítva, vagy a nyújtott konformációjú molekulák átfordulnak ferde konformációba és viszont). Egy rendszer adott körülmények között makroszkopikusan állandósult állapotát *egyensúlyi állapotnak* nevezzük. Fontos a körülmények hangsúlyozása, mert ezek változása mindig új egyensúlyi állapotba „kényszeríti" a rendszert.

A rendszer kiindulási állapotának mikroszkopikus jellemzése már nem jelent nehézséget. Kezdetben csak A „típusú" részecskék (a példákban csak folyadékállapotú vízmolekulák, illetve nyújtott konformációjú 1,2-dibrómetán-molekulák vannak a rendszerben). Ismerve a hőmérsékletét a rendszernek és a részecskék számára megengedett nívósorozatot, meghatározhatjuk a részecskéknek a nívósorozaton való legvalószínűbb eloszlását és a nívósorozat $\overline{F}$-szintjének értékét. B „típusú" részecskék (gázállapotú vízmolekulák, ferde konformációjú dibrómetán-molekulák) ugyan még nincsenek a rendszerben, de a nívósorozatuk $\overline{F}$-szintjének értékét adott hőmérsékleten kiszámíthatjuk.

Engedjük meg a részecskéknek a még üres nívósorozat szintjeinek az elfoglalását is (a fecskendőben elmozdítjuk a dugattyút, ezzel a folyadékállapotú vízmolekulák számára a gázállapotot is lehetővé tesszük, illetve a csak nyújtott konformációjú molekulákat tartalmazó rendszer hőmérsékletét valamilyen módon hirtelen megnöveljük, aminek következtében ferde konformációjú molekulák is keletkezhetnek), és várjuk meg, amíg végbemegy a vál-



8. ábra

tozás, vagyis a rendszer adott körülmények között makroszkopikusan ismét változatlan állapotba, egyensúlyba kerül. Ezt szemléletesen úgy képzelhetjük el, hogy a kétféle „típusú" részecskék nívósorozatát egyesítjük, „egymásba toljuk", ahogyan ez a 8. ábrán látható. Az így létrejövő új nívósorozaton is meghatározhatjuk a részecskék legvalószínűbb eloszlását és az $\bar{F}$-nívó értékét, amelyek már a rendszer új egyensúlyi állapotának felelnek meg.

Milyen változás következett be a legvalószínűbb eloszlásban? Természetesen az, hogy a kiindulási állapot nívóinak csökkent a relatív betöltöttsége, a kezdetben üres nívókra pedig kerültek részecskék. Az $\bar{F}_{A+B}$-nívó értéke mindkét eddigi nívósorozat $\bar{F}$-szintjének értékénél nagyobb negatív szám lett. Hogyan lehetne a változás, az átalakulás folymatát jellemezni és azt is, hogy a folyamat meddig megy végbe (adott körülmények között meddig keletkeznek B „típusú" molekulák)?

„Húzzuk szét" az előbb kapott nívósorozatot úgy, hogy az eredeti két nívósorozatot kapjuk vissza, de betöltöttségük most már ne változzon. Ha a két nívósorozat szintjeinek relatív betöltöttségét külön-külön összegezzük, számszerűen meg tudjuk határozni, hogy a rendszerben adott körülmények között hány A és hány B „típusú" részecske van. A két szám hányadosa (a keletkező új részecskék száma osztva a kiindulási állapotnak megfelelő részecskék számával) jellemző az átalakulásra is, és a vizsgált rendszer kialakuló új állapotára is. Meghatározott hőmérsékleten ez a szám állandó, hiszen a két nívósorozat szintjeinek relatív betöltöttsége csak a hőmérséklettől függ, független az összrészecskeszámtól, tehát az arányuk sem változik, ha a rendszert alkotó molekulák vagy atomok száma nő vagy csökken. Ezt az állandót, amely jellemző egy rendszerben meghatározott körülmények között bekövetkező változásra és az ennek következtében kialakuló új állapotra, *egyensúlyi állandónak* nevezzük.

Az egyensúlyi állandó és az $\bar{F}$-nívó

Nézzük meg, hogy az egyensúlyi állandó és az F-nívó között nincs-e valamilyen kapcsolat. Nem lehetne-e az $\bar{F}$-nívók ismeretében egyszerűbben kiszámítani az egyensúlyi állandót? Próbáljuk meg!

Ehhez először határozzuk meg a rendszer egyensúlyi állapotában az A, illetve a B „típusú" részecskék számát. Írjuk fel a rendszer részecskéinek az egyesített nívósorozaton lehetséges legvalószínűbb eloszlását megadó összefüggést:

$$N_i = \frac{N}{f_{AB}} \cdot 10^{-\frac{\varepsilon_i}{rT}} \tag{5}$$

Mivel egyenlő f_{AB}?

$$f_{AB} = \sum_k 10^{-\frac{\varepsilon_{kA}}{rT}} + \sum_j 10^{-\frac{\varepsilon_{jB}+\varepsilon_{OB}-\varepsilon_{OA}}{rT}} \tag{6}$$

A (6) összefüggés első tagja nem más, mint f_A, a második pedig:

$$f_B \cdot 10^{-\frac{\varepsilon_{OB}-\varepsilon_{OA}}{rT}} . \tag{7}$$

$f_B$esetében azért lép fel a szorzótényező, mert az egyesített rendszerben csak egy nulla energiájú nívó lehet, pl. az A nívósorozat ε_0 nívója.
f_{AB} tehát:

$$f_{AB} = f_A + f_B \cdot 10^{-\frac{\varepsilon_{OB}-\varepsilon_{OA}}{rT}} . \tag{8}$$

Számítsuk ki, hogy az egyensúlyi rendszerben levő összes (N) részecske közül hány A „típusú", hány B „típusú". Ezt úgy tehetjük meg, hogy először az (5) összefüggésbe csak az A rendszer nívóinak energiaértékeit helyettesítjük be, majd az így kapott részecskeszámokat összegezzük. Ugyanilyen módon határozhatjuk meg a B „típusú" részecskék számát is.

$$N_{kA} = \frac{N}{f_{AB}} \cdot 10^{-\frac{\varepsilon_{kA}}{rT}} \tag{9}$$

$$N_A = \sum_k N_{kA} = \frac{N}{f_{AB}} \sum_k 10^{-\frac{\varepsilon_{kA}}{Tr}} = \frac{N}{f_{AB}} \cdot f_A \tag{10}$$

$$N_{jB} = \frac{N}{f_{AB}} \cdot 10^{-\frac{\varepsilon_{jB}+\varepsilon_{OB}-\varepsilon_{OA}}{rT}} =$$

$$= \frac{N}{f_{AB}} \cdot 10^{-\frac{\varepsilon_{jB}}{rT}} \cdot 10^{-\frac{\varepsilon_{OB}-\varepsilon_{OA}}{rT}} \tag{11}$$

$$N_B = \sum_j N_{jB} = \frac{N}{f_{AB}} \cdot 10^{-\frac{\varepsilon_{OB}-\varepsilon_{OA}}{rT}} \cdot \sum_j 10^{-\frac{\varepsilon_{jB}}{rT}} =$$

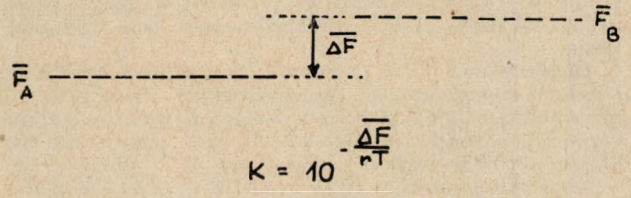
$$= \frac{N}{f_{AB}} \cdot f_B \cdot 10^{-\frac{\varepsilon_{OB}-\varepsilon_{OA}}{rT}} \tag{12}$$

Az egyensúlyi állandó a kétféle „típusú" részecske számának hányadosa:

$$K = \frac{N_B}{N_A} = \frac{f_B}{f_A} \cdot 10^{-\frac{\varepsilon_{OA}-\varepsilon_{OA}}{rT}} \tag{13}$$

$$K = 10^{-\frac{rT\lg f_A - rT\lg f_B + \varepsilon_{OB} - \varepsilon_{OA}}{rT}} = 10^{-\frac{\bar{F}_B - \bar{F}_A + \varepsilon_{OB} - \varepsilon_{OA}}{rT}}$$

$$K = 10^{-\frac{(\bar{F}_B + \varepsilon_{OB}) - (\bar{F}_A + \varepsilon_{OA})}{rT}} \tag{14}$$



9. ábra

Az egyensúlyi állandót tehát adott hőmérsékleten a *kiindulási és végállapot $\bar{F}$-nívójának különbsége határozza meg.*

Ellenőrizzük a számítás helyességét! Olvassuk le a 8. ábráról közvetlenül az $\bar{F}_B - \bar{F}_A$ különbséget. Ez kb. 1,7-nak adódik. Ha az ábra elég nagy lenne, akkor pontosan 1,711-nyi értéket olvasnánk le. 1ε-t a fenti példa kiszámításában $\frac{5}{6} rT$-nek választottunk. Így $K = 0{,}240$. Ha összehasonlítjuk az $\frac{N_B}{N_A}$-ból közvetlenül kapott értékkel (0,262), látjuk, hogy az elhanyagolásokból adódó hibán belül ugyanazt a K-t kaptuk.

Arra a végeredményre jutottunk tehát, hogy *a nívósorozatok teljes mellőzésével, kizárólag az $\bar{F}$-nívók összehasonlításával meghatározhatjuk az egyensúlyi állandót.* (9. ábra.)

$$K = 10^{-\frac{\Delta\bar{F}}{rT}}$$

Entrópia

Korábban már utaltunk arra, hogy az $\bar{F}$-nívó nemcsak egy fizikai-kémiai rendszer részecskéi számára adott körülmények között megengedett nívósorozatra jellemző, hanem a részecskéknek ezeken a nívókon való legrendezetlenebb eloszlására is. Így pl. azt is tükrözi, hogy a hőmérsékletnövekedés vagy csökkenés hatására bekövetkező $\bar{F}$-nívó-változás egyben a részecskeeloszlás módosulát is jelenti. Gondoljunk vissza arra, hogy a tízszeres hőmérsékletemelkedés mintegy „szétszórta" a részecskéket a lehetséges nívókra, ezzel párhuzamosan az F-szint a nullanívóhoz képest lejjebb került.

Nézzük meg, hogy van-e valamifée mennyiségi összefüggés az elsősorban a nívósorozatra jellemző $\bar{F}$-szint és a rendszer részecskéi lehetséges eloszlásainak termodinamikai valószínűsége között...

... A kombinatorika és a valószínűségszámítás módszerei segítségével egy rendszer összenergiájának az alkotórészek közti *minden* lehetséges eloszlására vonatkozó termodinamikai valószínűség meghatározható, mégpedig a következőképpen:

$$w_k = \frac{N!}{N_0! N_1! N_2! \ldots N_i! \ldots} \qquad (15)$$

Matematikailag igazolható, hogy nagy számok esetén faktoriálisokat tartalmazó képlet így írható át:

$$w_k = \frac{N^N}{N_0^{N_0} \cdot N_1^{N_1} \cdot \ldots \cdot N_i^{N_i} \cdot \ldots} \qquad (16)$$

A legnagyobb termodinamikai valószínűségű eloszlás esetén (és csakis ebben az esetben) pontosan ki tudjuk számítani, hogy adott nívósorozat, N és U esetén az egyes energiaszinteken hány részecske van, mennyi $N_0, N_1, \ldots, N_i, \ldots$ értéke. Írjuk be ezt a már megadott (16) képletbe:

$$w_{\max} = \frac{N^N}{\left(\frac{N}{f} 10^{-\frac{\varepsilon_0}{rT}}\right)^{N_0} \cdot \left(\frac{N}{f} 10^{-\frac{\varepsilon_1}{rT}}\right)^{N_1} \ldots \left(\frac{N}{f} 10^{-\frac{\varepsilon_i}{rT}}\right)^{N_i}} \qquad (17)$$

Alakítsuk még egy kicsit tovább:

$$w_{\max} = \frac{N^N}{\left(\frac{N}{f}\right)^{N_0} 10^{-\frac{N_0\varepsilon_0}{rT}} \cdot \left(\frac{N}{f}\right)^{N_1} 10^{-\frac{N_1\varepsilon_1}{rT}} \ldots \left(\frac{N}{f}\right)^{N_i} \cdot 10^{-\frac{N_i\varepsilon_i}{rT}}}$$

$$w_{\max} = \frac{N^N}{\left(\frac{N}{f}\right)^{N} \cdot 10^{-\frac{N_0\varepsilon_0 + N_1\varepsilon_1 + \ldots + N_i\varepsilon_i + \ldots}{rT}}} \qquad (19)$$

Az $N_0\varepsilon_0 + N_1\varepsilon_1 + \ldots + N_i\varepsilon_i + \ldots = \sum_i N_i\varepsilon_i = U$, tehát:

$$w_{\max} = f^N \cdot 10^{\frac{U}{rT}} \qquad (20)$$

Vegyük mindkét oldal tízes alapú logaritmusát:

$$\lg w_{\max} = N \lg f + \frac{U}{rT}$$

$$rT \lg w_{\max} = NrT \lg f + U$$

$$rT \lg w_{\max} = -N\bar{F} + U.$$

Mivel $\bar{F}$ egy részecskére jutó átlagmennyiséget jelöl, az $N\bar{F}$ ugyanebből a mennyiségből az N részecskéből álló teljes rendszerre jutó „adagot" jelenti *($N\bar{F} = F$).*

$$rT \lg w_{\max} = -F + U \qquad (21)$$

Mit jelent, milyen mennyiséget jelöl az $rT \lg w_{\max}$ és az F? Tulajdonképpen mindkettő egy kicsit ismerős is, meg nem is. A $w_{\max}$ a legrendezetlenebb eloszlás megvalósulási lehetőségeinek a száma és ennek logaritmusának rT-szerese áll a fenti egyenlet baloldalán. Ebből az $r \lg w_{\max}$ mennyiséget a vizsgált rendszer *entrópiájának* nevezzük és a továbbiakban S-sel jelöljük *($S = r \lg w_{\max}$)*. Az entrópia tehát — adott körülmények között — a *rendezetlenségre* jellemző, hiszen azok az eloszlások valósulnak meg a legtöbbször, amelyekben az összenergia eloszlása a rendszer részecskéi között a legrendezetlenebb. Ezt most már így is mondhatjuk: *meghatározott körülmények között egy rendszer makroszkopikus megjelenésének mikroszkopikusan a legnagyobb entrópiájú állapot felel meg. ...*

KÖNYVEK

A VÁLTOZÓ VILÁGEGYETEM

Szerkeszti: Egyed László. Közgazdasági és Jogi Kiadó, Budapest, 1976.

A TV Szabadegyeteme a Közművelődési Törvény szellemében útnak indított hatalmas vállalkozás, ennek az ismertetésnek a megírásakor már túl van ugyan az első előadásokon, de még nem jutott el odáig, hogy részletes elemző vélemény születhessen róla. Előttünk van azonban az első sorozatot szolgáló kiadvány, amelyet a nyomda ezúttal — szerencsére — idejében elkészített.

A kötet ügyesen összeválogatott, zömében már korábban megjelent cikkek gyűjteménye. Csak helyeselni lehet, hogy nem a TV-ben elhangzott előadások szövegét tartalmazza, hiszen nyilvánvaló, hogy a nyomtatott könyv más típusú közeg, más szöveget kíván meg. A kiadvány jórészt tartalmilag sem ismétel, hanem kiegészít; ezzel az önképzés igényesebb, intelligensebb formájára kényszeríti az olvasó—nézőt.

Négy tanulmány Marx György: „Jövőnk az Univerzum" című jól ismert esszékötetéből származik, két — egymást részben átfedő tárgyú — cikk más forrásból. Az utolsó két, csillagászati jellegű, cikk nyilván jelen kiadvány számára íródott. Új a bevezető tanulmány is, amely a tudomány módszereit és összefonódott részterületeit mutatja be.

Az ilyen típusú könyvnél az az első kérdés, hogy szemlélete mennyire egységes. Itt nincs okunk panaszra, a korszerű dialektikus felfogás az egész kötetben uralkodik, a világot nem állapot, hanem folyamat gyanánt írja le. Más szempontból már nem ilyen homogén a könyv. Marx lendületes, a szépirodalom eszközeit is alkalmazó stílusa mellett az utolsó fejezet értekező hangja kissé száraznak tűnik.

Dícséretre méltó a szerkesztő munkája: a korábban készült anyagrészeket lábjegyzetekkel frissítette, a nehezebben érthető kifejezéseket megmagyarázta, a kötet végére kis életrajzi lexikont csatolt. Kár, hogy a kötetbe kétszer került be ugyanaz az ábra (28. és 37. oldal) eltérő — bár mindkét esetben egység nélküli — ordináta skálával, és a 44. oldal ábrájának időtengelyén „év" helyett „a" maradt.

VIP

Damjanovich Sándor:

MOLEKULAÓRIÁSOK BIOFIZIKÁJA

Akadémiai Kiadó, Budapest, 1976. 131 l.

A Korunk Tudománya sorozatban megjelent könyvecske első a sorozatban, amelyik a biofizika problémáival foglalkozik az ismeretterjesztés ezen a magas szintjén. Nemcsak ebben a sorozatban, de általában is kevés olyan munka jelent meg eddig, amelyik az érdeklődőknek megmutatja a biofizikai módszerekkel vizsgált jelenségek gazdagságát és érdekességét. Pedig mint ismeretes a tudományfejlődés mai stádiumában a határterületi, inter- és multidiszciplináris kutatásoknak egyre nagyobb a jelentőségük a természeti jelenségek megismerése szempontjából. „A 'határterületi tudomány' elnevezés arra utal, hogy a természettudományoknak a XIX. század végéig kialakult, ma már klasszikusnak nevezhető felosztásába egyértelműen be nem sorolható problémakörök csak úgy vizsgálhatók, ha két vagy több klasszikus értelemben vett tudomány törvényszerűségeinek, módszertanának segítségével próbáljuk megközelíteni azokat. A klasszikus tudományok, mint pl. kémia, fizika, biológia területén számos ilyen határokat nem tisztelő, napjainkban egyre önállóbb módszertannal és problémakörrel rendelkező új tudomány alakult ki . . ." „A kémia és biológia határterületén kialakult biokémia, a fizika, biológia és fizikai kémia eredményeit egyaránt felhasználó biofizika az élet kutatásában igen magas szintet értek el." Már csak ezen szempontok miatt is örömmel kell üdvözölnünk Damjanovich kollégánk vállalkozását.

Egy kis könyvben természetesen lehetetlen a biofizika egészét vagy akárcsak legaktuálisabb kérdéseit is hiánytalanul bemutatni. A tanulmány igen célszerűen a központba a makromolekulákat (néhányszor tízezertől néhányszor százezerig terjedő molekulasúllyal) helyezi — amelyeknek a biológiai objektumokban valóban mindíg alapvető a szerepe — és e köré csoportosítja különben eléggé szerteágazó mondanivalóját.

A legnagyobb helyet a módszerek bemutatása foglalja el (2. fejezet) a könyvben. Már az előző idézet is hangsúlyozta, hogy a határterületi tudományoknak kialakul a saját módszertanuk. A szóban forgó módszertani fejezetben a biofizika, helyesebben a bio-rendszerek kutatásának sajátos szempontjai szerint mutatja be a különböző spektroszkópiai módszereket az abszorpciós és emissziós optikai spektroszkópiától a magmágneses rezonancia spektroszkópiáig és a koincidencia technika alkalmazásáig. „Az abszorpció és emisszió elektronhéj szinten lejátszódó fizikai folyamat. A fenti elrendezést felhasználó abszorpciós fotométerek mégis a kémia, a biológia és az orvostudomány számára adtak igen fontos, gyakran nélkülözhetetlen segítséget" — írja például a szerző. Ugyanakkor helyet kap a fejezetben a lézersugár és a holográfia alkalmazásainak, ill. inkább alkalmazási lehetőségeinek bemutatása is.

Ezt a fejezetet előzi meg a bevezetés és egy rövid fejezet a szerves makromolekulák létrejöttéről, a Föld ősatmoszférájában lezajlott prebiológiai fejlődésről és az ezt szimuláló legújabb laboratóriumi kísérletekről.

A könyvnek még két további fejezete van. Egyik a sugárzások biofizikájáról szól, elsősorban a radioaktív sugárzások biológiai hatását és azok alkalmazásait tárgyalja. Az utolsó fejezetben az elektroforézist, az izoelektromos fokuszálást és hasonló bioelektromos jelenségeket ismerünk meg közelebbről, a biofizikus speciális szempontjaival bemutatva.

Befejezésül csak azt jegyezhetjük meg, hogy örömmel vennénk kézbe hasonló tanulmányokat a fizika más határterületi alkalmazásairól is.

Berényi Dénes

VÉLEMÉNYEK

A ZSEBSZÁMOLÓGÉPEK VÁRHATÓ HATÁSA AZ ISKOLÁRA

Varga Tamás
O.P.I.

A zsebszámológépek 1972-ben jelentek meg a tőkés országok piacán. Akkor egy négyműveletes gép 200—300 dollárba került. Ma az ugyanilyen gépek ára 95—97%-kal kevesebb, 5—10 dollár. Kereskedelmi okokból a tőkés országokban már aligha lesznek lényegesen olcsóbbak, de — tekintve, hogy a legdrágább alkatrészük a kijelző — a világpiaci konkurencia minden bizonnyal e körüli árszintre szorítja le majd az okosabb (sokféle matematikai függvényre programozott) gépeket is. Ma is lehet már kapni 15—20 függvényes gépeket kb. 30 dollárért. Egy olyan japán gépnek (Casio AL-8), amely közönséges törtekkel és vegyes számokkal is tud négy alapműveletet végezni, egyszerűsíteni, bővíteni, tizedestörtté és visszaalakítani, ezen kívül négyzetgyököt vonni, memóriával operálni, osztásnál külön a maradékot megadni, szórást számolni stb., amerikai áruházakban 29 dollár az ára. Viszonylag drágák még az olyan gépek, amelyeknek a gombjai nemcsak gyárilag programozott számításokat indítanak el, hanem új programokat is be lehet vinni velük a gépbe. De az áresés már itt is elindult. Az 1973-ban forgalomba került HP65 800 dollárba került, és ezt az árat — ritka kivétel! — több mint két éven át

tartani tudta. De 1975 novemberében piacra került egy sok tekintetben — ha nem is mindenben — tökéletesebb gép, az SR 52, feleárnál olcsóbban. Ezek a gépek a beütött programot mágneskártyán rögzíteni tudják, készen programozott kártyacsomagok is kaphatók hozzájuk, matematikai statisztikai, elektrotechnikai stb. programokkal. Az SR 52-höz azonkívül asztali kiírószerkezet is kapcsolható. Egyszerűbb (rögzítésre nem képes) programozható gépek 1975 óta 100 dollárnál olcsóbban is kaphatók.

Annak érzékelésére írtam le részletesen a jelenlegi helyzetet és a várható fejleményeket, hogy zsebszámológép és komputer közt nincs éles határ, de míg a komputerek fontosságát ma már senki sem tagadja, addig fiatalabb testvéreik várható szerepéről társadalmunk még nem alkotott képet, nem vontuk le az ebből adódó tanulságokat.

Néhány tanulságot megpróbálok itt összefoglalni, összegezve számos országban szerzett tapasztalataimat és szakemberekkel folytatott beszélgetések eredményeit is.

1. *Hasonló technikai fejlettségű tőkés országokhoz képest viszonylag kevéssé vagyunk ellátva komputerekkel, de még mindig sokkal inkább, mint ehhez szükséges* műveltségű *és* képzettségű *szakemberekkel.*

2. *A* műveltséget *— a számítástechnikai kultúrát —* a képzettség *elé kell helyeznünk. Maga az is, hogy tanfolyamokon milyen hatásfokkal tudjuk képezni a számítógépeket kiszolgáló személyzetet, az „input" kulturáltsági fokától függ. Amellett nem elég csak azokra gondolnunk, akik közvetlenül kapcsolatban lesznek a számítógépekkel — bár ezek száma is a mainak sokszorosa lesz a mostani általános iskolások életpályájának vége felé —, hanem mindenkire, mert a számítástechnikai műveltség elemeinek az írni-olvasni-beszélni-érteni tudáshoz hasonlóan az alapműveltséghez kell tartozniuk.* A számítástechnikai műveltséget az általános iskolának kell megalapoznia. Később ez sokkal nehezebb is.

3. A pedagógusok társadalmi rangja miatt is fontos a számítástechnikai kultúra széleskörű megalapozása és elterjesztése. Ma az ehhez értők (még a kevéssé értők is!) olyan privilégiumhelyzetben vannak, mint a régi kultúrákban a papok és egyéb írástudók. A pedagógusok munkája is a programozás egy fajtájának tekinthető, de sokkal bonyolultabb szerkezeteket (személyeket) programoznak, nagyobb intenzitással, fele akkora fizetésért. A kereslet-kínálat törvényei ebben a tekintetben többé-kevésbé érvényesülnek, és ignorálásuk vissza is ütne (ezt az ötvenes évek gazdaságpolitikája megmutatta). A helyes arányok e törvények figyelembe vételével is kialakíthatók, többek között éppen a számítástechnikai kultúra széleskörű elterjesztése segítségével. Ez megszünteti az említett privilégiumhelyzetet, és a pedagóguspálya fontosságát is kiemeli.

4. A zsebszámológépekkel — a négy alapműveletesektől a zsebkomputerekig — együtt kell élnünk, akár akarjuk, akár nem. *Ha elterjedésüket segítjük, a számítástechnikai kultúra elterjedését segítjük, ha akadályozzuk — akár gazdasági, akár adminisztratív úton — azt akadályozzuk. Nagyjelentőségű ebből a szempontból az a már említett körülmény, hogy folyamatos az átmenet a négyműveletes gépektől a komputerekig. A különbségek óriásiak, de a válaszfalak eltűnőben vannak.*

5. Már a négyműveletes gépek is a számítástechnikai műveltség páratlanul értékes elemeivel képesek megismertetni a kisgyerekeket — az iskoláskor elején, sőt már előbb is — ha megfelelő pedagógiai irányítással használják őket. *Ez az irányítás nagyon hasonló ahhoz, ahogy a gyermeknek az anyanyelvét tanítják, bizonyos tekintetben egyszerűbb is. A csecsemőnél a pusztán funkcionális hangképzésnek is szerepe van. (Ez a gombok véletlenszerű nyomogatásának felel meg, a fül kontrollja a vizuális kontrollnak.) A szülő és a pedagógus szerepe akkor nő meg, amikor a jelek már nem öncélúak, hanem* jelentés *kapcsolódik hozzájuk. Megfelelő típusú gép megfelelő beállításával egy gomb egyszeri, kétszeri stb. megnyomása után az 1, 2 stb. szám jelenik meg. A gyerek tehát — megfelelő irányítás mellett — a számjegyekkel és a 9-nél nagyobb számok írásával is önállóan ismerkedhet meg. (A nevelői irányításhoz hozzátartozik, hogy a számjegyek szögletes alakjait a gyerek a kerek vagy egyéb tekintetben eltérő nyomtatott és írott formákkal azonosítani tudja; ugyanígy a vizuális alakot az akusztikussal, a négyszeri lenyomás mozdulatát a négy lépéssel, kézmozdulattal, tárgyszámlálással, négyelemű halmaz vizuális képével stb.) „Beszélhet" a gyerek egy olyan géphez, amely nem unja meg, hogy válaszoljon neki, amely adott információközlésre (bevitt jelsorozatra) mindig egyformán válaszol, válaszát tehát előre lehet tudni. Ez előbb a számlálásnál, majd az egyszerű műveletek végzésénél is nagyon motiváló, sokféle játékot lehet alapozni rá. Például ilyeneket: hány jegyű lesz az eredmény? (Nagyságrend becslése!) Mi lesz az első jegye? Az utolsó jegye?*

6. Nevelői irányítás kérdése az is, hogy az alapvető matematikai készségek (pl. egyszeregytudás) kialakítását hátráltatják-e ezek a gépek vagy éppen segítik. Nem segítik pusztán az ottlétükkel, sőt az ottlétük gondot is okozhat a nevelőknek (szülőket is beleértve), de elérhetjük, hogy segítsék. Ennek a metodikája már kialakulóban van. Alapelvei: irányított felfedezés, valóságra vonatkoztatás, verseny a géppel. Az utóbbi azt jelenti: nem mondunk le arról, hogy bizonyos számításokat gyorsabban el tudunk és tudjunk végezni, mint a gép, és kipuhatoljuk ennek a határait. Ki mondja meg előbb, mennyi 20-szor 20 (vagy 98 + 3 vagy 7-szer 8 stb.), aki beüti a gépbe, vagy aki fejben számol? És ha előbb elő kell venni a gépet, akkor ki győz? Próbáljuk ki! Ki vállalja a versenyt? Így el lehet érni, hogy a gyerekek használják a gépet, amikor érdemes, de ne legyenek rászorulva *minden apró, fejben is kiszámítható feladatnál.* A gép legyen az ő szolgájuk, ne ők a gép szolgái.

7. Újabb lehetőségeket adnak majd a magasabb osztályokban a többfüggvényes gépek, a grafikus kijelzők (asztali grafikoníróhoz kapcsolt gép a kiíróhoz kapcsolt SR 52-höz hasonlóan). Lényegesen új gondolatok jelennek meg a programozható gépek

akcióba vételekor. Ezeknek a gondolatoknak egy részével (döntések, ciklusok, közvetett utasítások) számítógép nélkül is meg lehet ismertetni a gyerekeket, de ez csak olyasmi, mint kirándulás a térképen vagy úszómozdulatok tanulása egy padra hasalva. Az igazi motivációt az adja, ha látják a gyerekek, milyen végtelen sok új lehetőséget nyit meg a számítások terén a programozás, még az egészen egyszerű programok készítése is. Már az is motiválja őket, ha kész programok lépésenkénti, majd villámgyors lefuttatását látják. Még inkább, ha maguk tervezhetnek programokat.

8. A számológépek (kalkulátorok) és a számítógépek (komputerek) közti határt — ha ugyan van — nem a programozhatóságnál szokás megvonni (a programozható kalkulátorok még nem komputerek), hanem ott, hogy az utóbbiak fel tudnak dolgozni alfanumerikus információt is, nemcsak numerikusat. (Vagyis betűkkel is dolgozni tudnak. Ezeknek a nyelvére azután le tudják fordítani az egyéb — fizikai, grafikus stb. — információt is. Maga a gép belül csak bináris számadatokkal dolgozik, de a programnyelvek alfanumerikusak.) A zsebszámológépek alfanumerikus irányba való továbbfejlesztése is megkezdődött már. *A jelenlegi kijelzők hét vonáskája is lehetővé teszi a maga 127 változatával (tizedesponttal együtt 255) bármely betű, írásjel, műveleti jel stb. kifejezését és a jelek megértését különösebb tanulás nélkül is (kis- és nagybetűk vegyesen).*

9. A zsebszámológépek hazai elterjedése szempontjából többszörösen is hibás körbe kerültünk.

Az egyik ez: idegenkedik tőlük sok szülő és pedagógus, mert nem ismerik a bennük rejlő lehetőségeket, és nem ismerik meg a bennük rejlő lehetőségeket, mert idegenkednek tőlük.

A másik: drágák, mert magas rajtuk a vám, és magas rajtuk a vám, mert drágák. A vám a belföldi fogyasztói ár 60%-a, a belföldi fogyasztói árat pedig ez a kalkuláció továbbra is magasan tartja.

Ha állandó volna a külföldi ár, akkor így is idővel stabilizálódna a belföldi fogyasztó ár valahol a turistaárfolyam két-három-négyszeresével számított áron (40—60—80-as dollárkulccsal). Az árlemorzsolódás azonban nem tud lépést tartani a külföldi gyors árcsökkenéssel, ezért évek óta a turistaárfolyam tízhuszszorosán tartjuk vámelőírásainkkal a számológépek árát. (Ha például egy 10 dolláros gépet 3000 Ft-ban számolnak a vámnál, ez 300-as kulcsot jelent, a turistaárfolyam 14-szeresét.)

Ha kivárjuk, amíg a külföldi árak stabilizálódnak és utána talán három-négy-öt év múlva a hazai árak is, akkor értékes éveket vagy évtizedet veszítünk el a számítástechnikai kultúra tömegessé tétele terén. (Az is lehet, hogy az igazán újszerű — például alfanumerikus — gépek szempontjából akkor megint elkezdődik egy hasonló elcsúszás.) Mindenképpen többet veszítünk ezen a réven, mint amit a vámon nyerünk.

A megoldás egyik lehetőségére a lengyelek adnak példát. Náluk — hosszú társadalmi vita után — olyan döntés született, hogy egy zsebszámológépet mindenki vámmenetesen vihet be.

Egy más lehetőség a tömeges import. Továbbiak: licencvásárlás, hazai fejlesztés és gyártás.

A közvetlen gazdasági haszon felmérése a gazdasági szakemberek dolga. Ami azonban a pedagógiai szempontokat illeti — hosszú távon ezek sem függetlenek a gazdaságiaktól —, célszerűnek látszik, hogy a négyműveletes, többműveletes, programozható, programot rögzítő, kiírós, grafikus kijelzős stb. számológépek megfelelő arányban részesedjenek egyrészt számoló- és számítógépbehozatalunkból, másrészt teljes tőkés importunkból.[1]

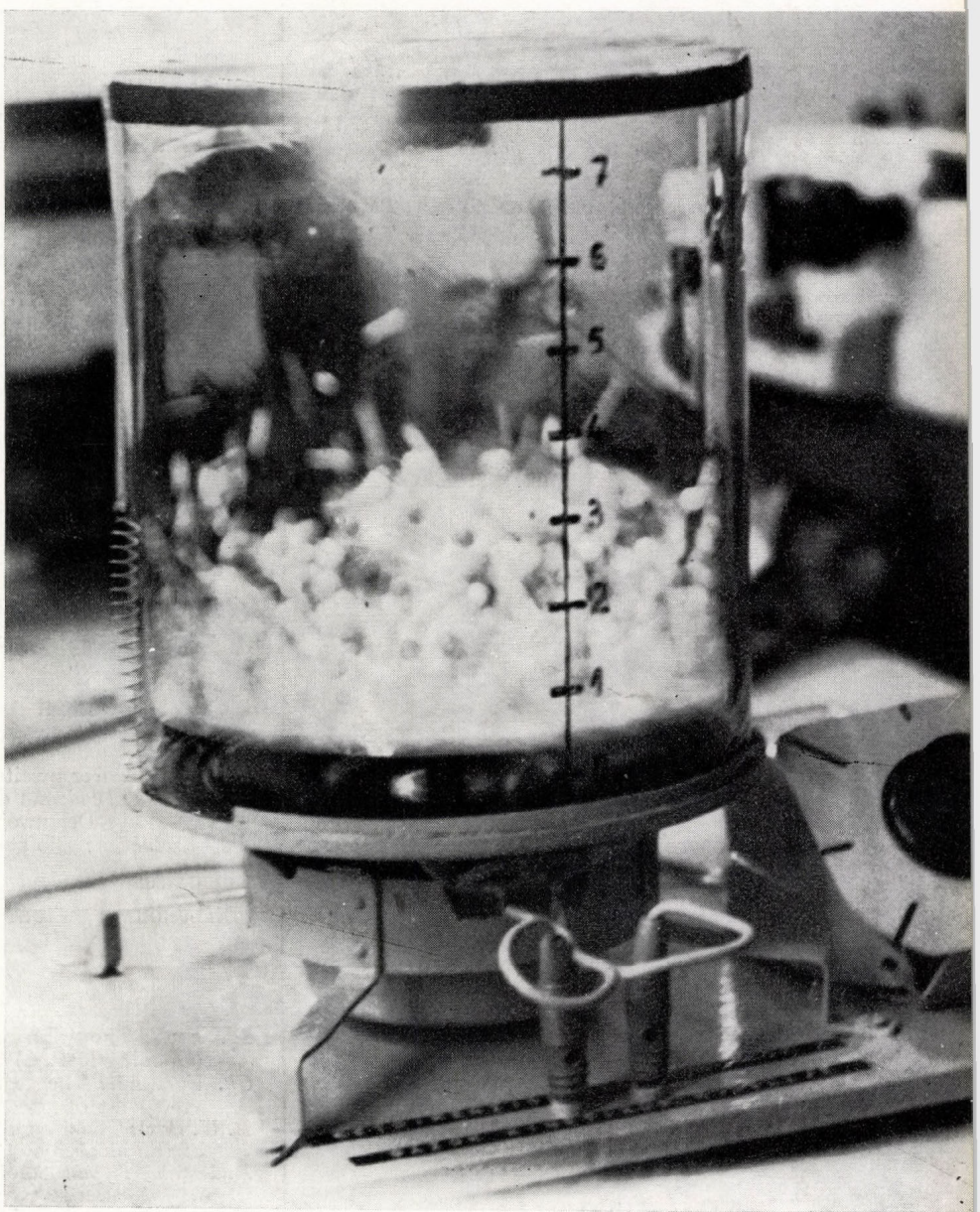
Diákjaink többségének van órája. Ma már tudjuk, hogy ez nem luxus. Segíti a jó időbeosztást, a munkafegyelem megszokását. A legegyszerűbb számológépek világpiaci ára már annyi, mint a karóráké, vagy annyi sincs. Nemsokára a sokfüggvényesek sem lesznek sokkal drágábbak. Pedagógiai jelentőségük pedig felbecsülhetetlen. Hogy káros mellékhatásaik lehetnek? A tűz is megégeti, az áram megüti azt, aki nem tanulja meg, hogy kell élni velük. Fel kell készülnünk az elektronikus információfeldolgozás hétköznapivá válására, háztartásainkba való bevonulására is.

[1] Jó hír érkezett lapzárta után: 1200 Ft-ért már kaphatók olyan gépek, amelyek négyzetgyököt is tudnak vonni, és szó van 5-600 Ft-os áron egyszerűbb gépek behozataláról is. Lemaradásunk ezzel máris jelentősen csökkent. Újabb jó hír, korrektúraolvasáskor: Kaphatók a Scientific és a Scientific Pr gépek. V.T.

A szerkesztésért felel: Turiné Frank Zsuzsa
Szerkesztőség: Budapest V., Anker köz 1, Eötvös Loránd Fizikai Társulat. Távbeszélő: 227-040
A kiadásért felelős: Siklósi Norbert igazgató
Kiadja a Lapkiadó Vállalat, Budapest VII., Lenin körút 9—11. Levélcím: 1906. postafiók 223 Távbeszélő: 221-293
Terjeszti a Magyar Posta. Előfizethető bármely postahivatalnál, a kézbesítőknél, a Posta hírlapüzleteiben és a Posta Központi Hírlap Irodánál (KHI, 1900 Budapest V., József nádor tér 1.) közvetlenül vagy postautalványon, valamint átutalással a KHI 215-96162 pénzforgalmi jelzőszámlára
Előfizetés egy évre 72,- Ft; egyes szám ára 6,- Ft. Megjelenik havonta
76.3606 Akadémiai Nyomda Budapest V., Gerlóczy utca 2. — Felelős vezető: Bernát György
Index: 25.289

fizikai szemle

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat lapja



A MÁSODIK FŐTÉTEL

1976/12

A szerkesztő bizottság elnöke:

Marx György

A szerkesztésért felelős:

Turiné Frank Zsuzsa

A szerkesztő bizottság titkára:

Berényi Dénes

Szerkesztő bizottság:

Balázs Béla, Barlai Katalin, Barta György, Bozóky László, Csekő Árpád, Dede Miklós, Fehér István, Flórián Endre, Gaal István, Groma Géza, Haiman Ottó, Hoffmann Tibor, Holics László, Károlyházy Frigyes, Keszthelyi Lajos, Kovács István, Mihály László, Schanda János, Soós Károly, Szigeti György, Tóth Eszter, Valkó I. Péter, Vermes Miklós

Címképünk:

A gázok kinetikus modelljének szemléltetése. A berendezést Ujj János tanár a budapesti József Attila Gimnáziumban építette, azzal az 1975. évi Fizikatanári Eszközkiállításon I díjat nyert

TARTALOMJEGYZÉK

Beck Mihály: Anyagfejlődés '76 441 oldal
Varsányi György: A második főtétel: A molekuláris szemlélet tükrében I. 442 oldal
R. U. Sexl: A második főtétel: Ideális gázmodell 447 oldal
Tasnádi Péter: A második főtétel: Gumi modell 454 oldal
Akadémiai Természettudományos Oktatási Munkaközösség: A második főtétel: Kristály modell 459 oldal
Károlyházy Frigyes: Az energia statisztikus eloszlása 471 oldal

ESEMÉNYEK

VÉLEMÉNYEK

Csákány Antal: Kalkulátor és mikrokomputer avagy Dávid és Góliát 478 oldal

СОДЕРЖАНИЕ

М. Бэк: Вступительное слово к конференции «Эволюция в природе '76»
Дь. Варшаньи: Второе начало термодинамики с точки зрения молекулярной теории I.
Р. У. Сексль: Второе начало: модель идеального газа
П. Ташнади: Второе начало: модель резины
Коммиссия по обучению АН ВНР.: Второе начало: модель кристалла
Ф. Каройхази: Статистическое распределение энергии

СОБЫТИЯ

ОТЗЫВЫ И ВЫРАЖЕНИЯ МНЕНИЙ

INHALT

M. Beck: Eröffnungsrede zur Konferenz „Evolution in der Natur '76"
Gy. Varsányi: Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik im Spiegel der Molekularhypothese I.
R. U. Sexl: Der zweite Hauptsatz: Modell des idealen Gases
P. Tasnádi: Der zweite Hauptsatz: Kautschukmodell
Ungarische Akademie der Wissenschaften Komission für Bildung: Der zweite Hauptsatz: Kristallmodell
F. Károlyházy: Die statistische Verteilung der Energie

EREIGNISSE

STELLUNGNAHMEN UND MEINUNGSÄUSSERUNGEN

CONTENTS

M. Beck: The "Evolution in Nature '76" Conference (Opening lecture)
Gy. Varsányi: The second law of thermodynamics: the viewpoint of molecular theory I.
R. U. Sexl: The second law of thermodynamics: a model of the ideal gas
P. Tasnádi: The second law of thermodynamics: a model of rubberlike behaviour
Hungarian Academy of Sciences Comittee for Teaching: The second law of thermodynamics: a crystal model
F. Károlyházy: The statistical distribution of energy

EVENTS

OPINIONS

fizikai szemle

AZ EÖTVÖS LORÁND FIZIKAI TÁRSULAT LAPJA
Alapította Eötvös Loránd 1891-ben Mathematikai és Physikai Lapok néven

XXVI. évfolyam 12. szám 1976. december

ANYAGFEJLŐDÉS '76

Beck Mihály
KLTE Fizikai Kémiai Tanszék

Az immár hagyományossá vált „Anyagszerkezet és Anyagfejlődés Konferenciák" rendkívüli jelentőségűek a középiskolai természettudományi oktatás modernizálása, színvonalának emelése szempontjából. A rohamosan növekedő ismeretanyag elsajátítása és tanítása reménytelen lenne, ha az ismeretek növekedésével párhuzamosan nem bukkannánk rendező elvekre. Az egyik legfontosabb mai rendező elv kétségkívül az anyagfejlődés. Az időbeli fejlődés elve csaknem egyidős a tudományos gondolkodással, jelentősége azonban csak Darwin munkásságával vált nyilvánvalóvá. Még újabb felismerés, hogy a kitüntetett időirány nem korlátozódik az élővilágra, hanem minden anyagi rendszerre alapvetően érvényes.

Különös öröm számomra, hogy a mostani Anyagfejlődés Konferencia műsorában helyet kapott a termodinamika, és ezen belül különösképpen a második főtétel problémakörének megvitatása. Ha a fejlődés az anyagi rendszerek bonyolultabbá válását jelenti, akkor az anyagfejlődés gondolata termodinamikai szempontból nem teljesen problémamentes. A kémiai evolúció, ami az ősi Föld egyszerű anyagaiból az élet keletkezéséhez szükséges nagyszámú és rendkívül bonyolult szerkezetű vegyület keletkezéséhez vezetett, pedig természetesen ilyen értelmű fejlődést jelent. A bonyolultabb anyagféleségek képződése szemléletünk szerint az entrópia csökkenését jelenti. A második főtétel pedig éppen annak a leszögezése, hogy a zárt rendszerekben végbemenő folyamatok során az entrópia nő. Az anyagfejlődés és ezen belül a kémiai fejlődés gondolata azonban mégsem ellentétes a második főtétellel, hiszen pl. egy élőlény — mely az anyagfejlődés különböző változatait megtestesíti — sohasem tekinthető zárt rendszernek. Földünk természetesen szintén nyílt rendszer, hiszen állandóan energia áramlik át rajta: a napsugárzás energiát hoz 6000 K hőmérsékleten, ezt a Föld visszasugározza a világűrbe 300 K hőmérsékleten. A Föld tömegéhez képest elenyésző, de abszolút mennyiségében mégis hatalmas mennyiségű kozmikus por hullik a Földre; a légkör gázai fokozatosan, molekulasúlyuknak megfelelően elszöknek az űrbe, stb.

A termodinamikai elemzés minden vizsgálódás alapja: ma úgy tartjuk, hogy a termodinamika főtételei általánosan érvényesek; nincs olyan folyamat, ami ellentétben állna velük. A tudomány története azt mutatja, hogy az ellentétek csak látszólagosak; a további kutatás minden esetben az érvényesség kiterjesztését jelentette. A termodinamika oktatásának az a legnagyobb buktatója, hogy megállapításai oly kézenfekvőnek, egyszerűnek tűnnek. A tanárnak fel kell ismernie, hogy e mögött az egyszerű a fenomenológiai törvények mögött mélyenfevő anyagi történések húzódnak meg. Ehhez nyújtanak segítséget a mostani konferencián elhangzó előadások. Az előadásokat közli a Fizikai Szemle jelen száma.

A nagykanizsai tanácskozás (1976 augusztus 16—24) megnyitója

A MÁSODIK FŐTÉTEL A MOLEKULÁRIS SZEMLÉLET TÜKRÉBEN I.

Varsányi György
BME Fizikai Kémia Tanszék

Bevezetés

A második főtétel, mint általában a termodinamika főtételei, tapasztalatokon alapul. A tapasztalatok földi viszonyok között annyira általános érvényűek, hogy szükségszerűen objektív okokra kell tudnunk azokat visszavezetni. A termodinamika második főtételét különbözőképpen fogalmazták meg, többen is, akik közül különösen Kelvin, Clausius és Planck érdemel említést. Az „energia szétszóródása", az önkéntes hőátmenet iránya, a másodfajta perpetuum mobile lehetetlensége látszólag egymástól eltérő tapasztalatokat rögzítenek, valójában azonban a különböző energiafajták közül a termikus energia egyedülálló szerepére mutatnak rá. Minden egyéb energiafajta megnyilvánulásához részecskék kitüntetett irányú haladása vagy anyagi terek erővonalainak irányítottsága tartozik. Egyedül a termikus energia nyilvánul meg részecskék *rendezetlen*, minden irányú mozgásában, az ún. termikus mozgásban (helytelen szóval „hőmozgásban").

„Egyirányú" folyamatok

Vizsgáljunk meg néhány triviális jelenséget, melyekhez hasonlóak vezettek el a második főtétel megfogalmazásához.

1. Mozdonnyal vagy kézierővel meglökünk egy vasúti sínen mozgó vagont. Ezzel bizonyos munkát fejtettünk ki, melynek eredményeképpen a vagon a sínen gurulni kezd. Ha a pálya vízszintes, bizonyos távolság megtétele után a vagon megáll. Közben súrlódás révén a kerékcsapágyak és — bár ezt méréssel nehéz ellenőrizni — a kerekek és a sínek fölmelegednek. A második főtétel egyik megfogalmazása szerint az „energia szétszóródott", mert a meglökéskor kifejtett munka elveszett, illetve termikus energiává alakult.

2. Kazánban vizet akarunk felmelegíteni. Ezért befűtünk a kazántól csupán egy hőáteresztő fallal elválasztott kemencébe, bízva abban, hogy a kemencében fejlődő hő átmegy a kazánban levő vízbe. Bizalmunknak az a tapasztalat az alapja, hogy termikus energia hő alakjában mindig melegebb helyről megy hidegebb helyre. Ezt is a második főtétel állapítja meg.

3. Ha 1 : 8 súlyarányú hidrogén-oxigén gázelegyet meggyújtunk, a gáz robbanásszerű hevességgel elreagál, és ha a reakcióban fejlődött termikus energia a rendszerből eltávozik, folyékony víz marad vissza. A hidrogén-oxigén elegynek ismerjük ezt a tulajdonságát, ezért durranógázelegynek nevezzük és óvatosan bánunk vele. Ugyanakkor a víztől egyáltalán nem félünk . . .

4. Ha szén-dioxiddal tüzet akarunk oltani, a tűzre irányítva megnyitjuk a szén-dioxidos palack csapját. Biztosan tudjuk, hogy a szén-dioxid ki fog áramlani a palackból, és ha jól irányítjuk, akkor, elzárva a tüzet az azt tápláló oxigéntől, az oltás sikeres lesz.

5. Friss tejbe bizonyos mennyiségű vizet önthetünk anélkül, hogy műszer hiányában észre lehessen venni működésünk eredményét. A víz és a tej ui. olyan gyorsan összekeveredik, hogy szabad szemmel nem lehet a kettőt megkülönböztetni.

Az öt triviális példában a folymatok „egyirányúak" voltak. Az első példában senki sem várja, hogy a leállt vagon a vízszintes pályán egyszercsak megindul, elvonva a környezet termikus energiájának egy részét, azaz lehűtve a környezetet. A második példában senki sem várja, hogy a kazánban melegedő víz, még mielőtt felforrna, ismét lehűl úgy, hogy termikus energiáját visszaadja a kemencének, melyet még folyvást fűtünk. A harmadik példában azért nem félünk a víztől, mert senki sem várja, hogy a víz hirtelen hidrogén- és oxigén-gázzá alakul, megdermesztve környezetét. A negyedik példában senki sem várja, hogy ahelyett, hogy a szén-dioxid kiáramolnék a palackból, a tűzben fejlődő szén-dioxid fog besüvíteni a nagynyomású palackba. Végül az ötödik példában senki sem várja, hogy a friss tejből a víz leülepszik az edény aljára és felül marad a friss vízezetlen tej.

A molekuláris rendezetlenség

Az öt példában a megatartásunkat irányító tapasztalat közös forrásra, a termikus energia különleges természetére vezethető vissza. A termikus energia rendezetlen mozgásban nyilvánul meg. Ha az anyag molekuláris szerkezetű, akkor a termikus energia molekuláris rendezetlenséget eredményez. Maga a molekuláris rendezetlenség azonban háromrétű: 1. a termikus energia rendezetlen eloszlása a molekulák között, 2. a molekulák térbeli rendezetlensége és 3. a molekuláris mozgások irányának a rendezetlensége. Molekulák közötti spontán kölcsönhatások molekuláris dimenziókban mindig véletlenszerűek. A véletlenek statisztikája pedig mindig rendezetlenséget eredményez. Rendezni csak úgy tudunk, ha valamely egyéb, nem termikus energiát közlünk a rendszerrel, olyan energiát tehát, melyhez — a Bevezetés megfogalmazása szerint — részecskék kitüntetett irányú haladása vagy anyagi terek erővonalainak irányítottsága tartozik. Ha azonban ezután a rendszert magára hagyjuk, állapotának további alakulását a molekulák közötti kölcsönhatások véletlenszerűségére bízva, a rendezettség lassan-lassan teljes rendezetlenségbe fog átmenni.

Ha a kvalitatív magyarázaton túlmenően, a rendezetlenség szerepét termodinamikai törvényekbe, matematikai összefüggésekbe akarjuk foglalni, közelebbről kell megvizsgálnunk a rendezetlenség lényegét és jellemzésének lehetőségét.

Makro- és mikroeloszlások. Megállapították, és e megállapításokat a kvantumelmélet törvényekbe foglalta, hogy molekulák energiát csak adagokban, kvantumokban vehetnek fel. Ha az energiát függőleges tengelyen ábrázoljuk, akkor ezeket a meghatározott nagyságú energiákat vízszintes vonalakkal (nívókkal) ábrázolhatjuk.

Az abszolút zérusponton minden anyagnak a molekulái alapállapotban, azaz a legmélyebb (legkisebb energiájú) kvantált energianívójukon vannak. Ha a testet melegítjük, ez azt jelenti, hogy energiát közlünk vele, vagyis a részecskék most már nem lehetnek mind az alapállapotban, hanem kisebb-nagyobb hányaduknak magasabb

energianívókat (gerjesztett állapotokat) kell elfoglalnia.

Kérdés, hogy a maximális rendezetlenségű állapotban adott hőmérsékleten, tehát a zéruspont-energiához mért adott energiatöbblet esetén, ez a többlet hogyan oszlik el a molekulákra, vagy másképp fogalmazva, adott összes energiatartalom mellett adott számú molekulahalmaz hogyan népesíti be a rendelkezésére álló energianívókat. Ezenfelül a molekulák, a köztük bekövetkező ütközések folytán, állandóan változtatják energiájukat. Egy kiragadott molekula energiája az ütközés után hol nagyobb, hol kisebb lesz, mint előtte volt. Így tehát a molekulák osztozkodása a makroszkópikusan adott termikus energián pillanatról pillanatra változik, ugyanaz az energiamennyiség az egyes molekulákra rengetegféle különböző módon oszolhatik és oszlik el.

A rendszer pillanatnyi állapota jellemezhető egy ún. *makroeloszlással*, mely azt adja meg, hogy milyen molekuláris energiák fordulnak elő a rendszerben, és hogy az egyes energiaértékek egyenként hány molekulához tartoznak. A makroeloszlás tehát azt adja meg, hogy — az összes szinteket végigtekintve — azokon egyenként *hány* molekula található.

Ha a részecskék úgy cserélnek egymás között energiát, hogy számuk egyik energianívón sem változik, akkor a makroeloszlás változatlan, de új *mikroeloszlás* valósult meg, mert az egyes nívókon *nem ugyanazok* a molekulák tartózkodnak. A mikroeloszlás azt adja meg, hogy az egyes nívókon *mely* molekulák találhatók. Világos, hogy a nívók közötti cserékkel változatlan makroeloszlás mellett sokféle mikroeloszlás valósulhat meg. Ugyanaz az összenergia sokféle mikroeloszlással oszolhatik szét a molekulák között, ezek *a mikroeloszlások egyforma valószínűségűek*, ami azt jelenti, hogy elég hosszú idő átlagában mindegyik egyforma gyakran fog előfordulni.

Föltételezésünk szerint tehát azonos makroeloszlásban minden mikroeloszlásnak azonos a valószínűsége, a makroeloszlásoké azonban nem, mert egy bizonyos makroeloszlást különböző számú mikroeloszlásokkal lehet megvalósítani. Egy makroeloszlás annál valószínűbb, minél többféle mikroeloszlással valósítható meg.

Ha egy rendszer állapotát egy adott makroeloszlásban gondolatban rögzítjük, és *ki akarjuk találni*, hogy abban a makroeloszlásban melyik mikroeloszlás érvényesül, azaz hogy az egyes nívókon pontosan mely részecskék tartózkodnak, a telitalálat valószínűsége ezt a makroeloszlást megvalósító lehetséges mikroeloszlások számától függ. Minél több mikroeloszlás lehetséges, annál kevésbé valószínű a telitalálat. Pontosan: a telitalálat valószínűsége, P, egyenlő a mikroeloszlások számának, ν-nek a reciprokával: $P = 1/\nu$. Vizsgáljuk most meg, hogyan függ a telitalálat valószínűsége az illető makroeloszlás jellemzőitől, az egyes nívókon levő részecskék számától, az N_i-któl (ha a nívókat i sorszámmal jelöljük).

Gondolatkísérletünkben vegyünk két urnát. Az egyikben helyezzük el az összes részecskéket, a másikban pedig „helyjegyeiket". Ezek a „helyjegyek" egy-egy energianívóra szólnak, és az adott makroeloszlásban egy-egy nívóra annyi helyjegy van kiadva, ahány részecskének kell lennie az illető nívón. Húzzunk vaktában egyszerre a két urnából egy részecskét és egy helyjegyet. Ha az eltalálandó mikroeloszlásban a kihúzott részecske valóban azon a nívón van, amelyre a vele együtt kihúzott helyjegy szól, akkor ennek a részecskének a helyét eltaláltuk.

Ha ezen a nívón N_l részecske van, és az összes részecskék száma N, akkor a találat valószínűsége N_l/N. Utána húzzuk ki a következő részecskét és egy helyjegyet. Ha az új helyjegy a j-edik nívóra szól, akkor a második húzásban a találat valószínűsége N_j/N. Az első két húzás együttes találati valószínűsége: $N_l N_j/N^2$.

Ha nagyon sok részecske van, és ennek megfelelően az egyazon nívókra szóló helyjegyek száma is igen nagy, akkor a sorozatos húzások nem változtatják meg az egyes N_i/N valószínűségeket, mert a már kihúzott és a még urnában maradt helyjegyek számaránya a többihez állandó maradt. Ez azt jelenti, hogy ha már elég sok, mondjuk K számú részecskét húztunk ki, akkor a nagy számokra vonatkozó valószínűségi törvények szerint a velük együtt kihúzott különböző helyjegyek közül nívónként is $(K/N) \cdot N_i$-t húztunk ki. Más szóval a helyjegyek száma arányosan fogy az összes részecskék számával. Ekkor az eddigi telitalálat valószínűsége:

$$P_K = \frac{\Pi N_i^{\frac{K}{N} N_i}}{N^K} = \frac{(\Pi N_i^{N_i})^{K/N}}{N^K}$$

Ha történetesen nem ezt a K számú részecskét húztuk volna ki, hanem ellenkezőleg, éppen azokat, melyek mostanáig az urnában maradtak, akkor ezekre az utóbbi, $N - K$ számú részecskehalmazra a telitalálat valószínűsége, analógia alapján a következő volna:

$$P_{N-K} = \frac{(\Pi N_i^{N_i})^{\frac{N-K}{N}}}{N^{N-K}}.$$

Valamennyi részecskére a telitalálat valószínűsége a két részvalószínűség szorzata:

$$P_N = \frac{\Pi N_i^{N_i}}{N^N} \qquad (1)$$

Az energiacsere „iránya". Az a makroeloszlás, melyben minden részecskének az energiája egyenlő a rendszer átlagenergiájával (kivéve az abszolút zéruspontot, melyen ez az egyetlen lehetséges makroeloszlás), éppen a legvalószínűtlenebb makroeloszlás, hiszen csupán egyetlen mikroeloszlás tartozik hozzá, másrészről ezesetben *tudjuk*, hogy mindegyik molekula melyik egyetlen nívón tartózkodik: a telitalálat bizonyos. Ilyenkor $P = 1$. De ha — változatlan összenergia mellett — csupán két részecskét emelünk el gondolatban erről a nívóról (az egyiket alacsonyabb, a másikat magasabb nívóra, hogy az összenergia változatlan maradjon), az új valószínűség:

$$P = \frac{(N-2)^{N-2} \cdot 1^1 \cdot 1^1}{N^N} \approx \frac{1}{N^2}$$

ami azt jelenti, hogy a találati valószínűség már egyetlen csere eredményeképpen rohamosan csökken, illetve az új makroeloszlás sokkal valószínűbb, mint az eredeti. Minden további pár elvitele eredeti nívójáról hasonló rohamossággal csökkenti az új makroeloszlásban a találati valószínűséget, illetve növeli az új makroeloszlás megvalósulásának valószínűségét. A telitalálat nyilván a legrendezetlenebb makroeloszlásban a legkevésbé valószínű, ami azt jelenti, hogy *a legrendezetlenebb makroeloszlás a legvalószínűbb.*

Az energianívók sűrűsége. Az előbb mondottak értelmében az állapot akkor a legrendezetlenebb, ha az (1)-gyel definiált találati valószínűség a legkisebb. Magától értetődik, hogy a részecskék számának növelése rohamosan csökkenti a P találа-

ti valószínűséget. Hasonlóképpen csökken a találati valószínűség akkor is, ha nő a rendszer összenergiája, mert ezzel a részecskék jobban szétoszolnak a rendelkezésükre álló nívókon, több nívó népesül be, tehát a számlálóban levő N_l^N tényezők csökkennek. Adott részecskeszám és összenergia mellett azonban még egy körülmény befolyásolja a találati valószínűséget, és ez a nívók sűrűsége. Ha ui. a részecskéknek változatlan energia mellett több benépesíthető nívó áll rendelkezésére, éppenúgy növekvő rendezetlenséggel oszolhatnak azokon szét, mintha az összenergia növekednék. Ezért az állapotok rendezetlenségének jellemzése szempontjából döntő jelentőségű a nívók sűrűségének kérdése.

A molekulák termikus energiája négy részből tevődik össze: 1. a haladómozgás kinetikus energiájából, 2. a molekulák forgásából származó kinetikus energiából, 3. a molekulában levő atomok rezgéseinek gerjesztési energiájából és 4. a molekulák elektronjainak gerjesztési energiájából. Ez a felosztás ilyen formában csak gázhalmazállapotú anyag esetén állja meg a helyét. Cseppfolyós és szilárd halmazállapotban a molekulák zavartalan haladásáról és forgásáról nem igen beszélhetünk, ehelyett azonban fellép a molekuláknak mint egészeknek a rezgése és lengése a szomszédaik által szabadon hagyott térfogatban.

Mint az előző pontban már volt róla szó, mindezek az energiafajták kvantáltak, amennyiben a részecskék kisebb-nagyobb térfogatokba vannak bezárva. A kvantáltság föltételét a részecskék hullámtermészete alapján találhatjuk meg: a részecske tartózkodását egy adott térfogatban a részecskéhez rendelt állóhullámmal jellemezhetjük. Ennek az elméletnek az alapján levezethetünk egy képletet gázmolekulák *haladó mozgásának* kinetikus energiájára. A kinetikus energia ezeknek az összegéből adódik. x irányban ez a kinetikus energia:

$$T_x = \frac{p_x^2}{2m} \tag{2}$$

ahol p_x a részecske impulzusának x irányú komponense. Az impulzus és a részecske viselkedését leíró hullám hossza közötti De Broglie-féle összefüggés:

$$p_x = \frac{h}{\lambda_x} \tag{3}$$

ahol h a Planck-féle hatáskvantum. Ha az edény x irányú hossza a, akkor a gázrészecske benntartózkodásának az a föltétele, hogy a-nak a félhullámhossz egészszámú többszörösének kell lennie:

$$a = \frac{n\lambda_x}{2} \tag{4}$$

(4)-ből kifejezve λ_x-et, behelyettesítve (3)-ba, majd innen p_x-et behelyettesítve (2)-be:

$$T_x = \frac{n^2h^2}{8\,ma^2} \tag{5}$$

Oxigénmolekula átlagos kinetikus energiája egyetlen térirányban szobahőmérsékleten $2 \cdot 10^{-21}$ J. Ha $a =$ $= 1$ dm, és ezekkel az adatokkal kiszámítjuk n-et, $4{,}4 \cdot 10^9$-t kapunk. Ez azt jelenti, hogy az *átlagos* kinetikus energiának a $4{,}4 \cdot 10^9$-edik nívó felel meg. Az x irányú haladómozgás azonban együttjár y és z irányú haladással is, tehát mindenféle x irányú kinetikus energia kombinálódhatik mindenféle y és z irányú kinetikus energiával, úgyhogy a nívók összes száma a fent kiszámított érték köbe lesz! $(4{,}4 \cdot 10^9)^3 \approx 10^{29}$. Ez az átlagenergiának megfelelő nívó sorszáma. Ennél legalább egy nagyságrenddel több azoknak a nívóknak a száma, melyeken oxigénmolekula számottevő valószínűséggel előfordulhat, tehát a *betölthető nívók* száma hozzávetőlegesen 10^{30}.

A képletből és a hozzávetőleges számításból két fontos tanulságot vonhatunk le: 1. A nívók sűrűsége adott energia mellett függ az edény méretétől, a-tól. Ha az edény hossza pl. tízszeres, az átlagenergiának megfelelő nívó sorszáma is tízszerese lesz az előző példában kiszámítottnak. Ha ismét mind a három térirányt figyelembe vesszük, az átlagenergiának megfelelő nívó sorszáma ezerszerese az előzőnek. Ez azonban csak akkor van így, ha az edény mindhárom irányba eső hossza is tízszeresére nő. Ekkor viszont az edény térfogata is ezerszerese lesz az előzőnek. Így azt mondhatjuk, hogy állandó energia mellett *a betölthető nívók száma arányos az edény térfogatával*. Ha a gáz kiterjed állandó energia mellett, a betölthető nívók száma nő, de azáltal, hogy *összesűrűsödnek*. A gáz kiterjedésével összesűrűsödnek, a gáz összenyomásával megritkulnak az energianívók.

2. Szobahőmérsékletű és 1 atm nyomású gáz 1 dm³-ben kb. $2{,}5 \cdot 10^{22}$ molekulát tartalmaz. Ha ugyanakkor a betölthető nívók száma 10^{30}, ez azt jelenti, hogy a nívók túlnyomó többsége üres, és átlagban csak minden százmilliomodik nívón található egyetlen molekula! Ez azonban csak a haladó-mozgás energianívóira vonatkozik.

A *forgómozgás* kinetikus energiájának kvantáltsága is kiszámítható a fenti képletből, ha arra gondolunk, hogy ilyenkor a molekula nem röpköd az edény egyik falától a másikig, hanem önmaga körül forog. Ebben az esetben a helyére a forgás kerületét helyettesíthetjük. Ez kb. $4 \cdot 10^{-10}$ m (4 Å). Szobahőmérsékleten egy kiválasztott forgástengely körüli forgás átlagos energiája ugyancsak $2 \cdot 10^{-21}$ J. Ezzel számolva, a 18. nívó felel meg az átlagenergiának. Mivel az O_2 molekula a kötés irányára merőleges két tengely körül foroghat, ezt a 18-as számot még önmagával meg kell szorozni, és ily módon az átlagenergiának kb. a 300. nívó felel meg. Ha a betölthető nívók számát jelen esetben is egy nagyságrenddel becsüljük nagyobbnak, akkor a betölthető nívók száma 3000. Ez a szám mindenesetre sokkal kisebb, mint a 10^{30}, tehát azt mondhatjuk, hogy a haladómozgás kinetikus energiája sokkal *finomabban kvantált*, mint a forgó mozgásé.

A *rezgési energia* esetén a képletben m helyébe az atomok tömegét (oxigén-molekula esetén ez éppen a molekula tömegének a fele), a helyébe pedig a rezgési amplitúdót helyettesíthetjük. Ez utóbbi nagyságrendje 10^{-11} m (0,1 Å). Kiderül ebből, hogy már az első gerjesztett nívó energiája is nagyobb, mint szobahőmérsékleten a rezgés átlagos energiája. Ezért, ellentétben a fentiekkel, az *első gerjesztett nívó* energiáját célszerű kiszámítani. A képlet alapján $T_1 = 2 \cdot 10^{-20}$ J. A rezgés kinetikus energiájához ugyanannyi potenciális energia is járul, tehát a gerjesztett rezgés energiája az első szinten $4 \cdot 10^{-20}$ J. Ezzel szemben szobahőmérsékleten az O_2 gáz átlagos rezgési energiája egy molekulára számítva $1{,}2 \cdot 10^{-22}$ J, azaz több mint 300-szor kevesebb, mint az első nívó energiája. Kiszámítható (l. később), hogy termikus egyensúlyban, melyet a molekulák egymás közötti ütközésekkel biztosítanak, 20 000 oxigénmolekula közül átlagban egy van egyetlen rezgési kvantummal gerjesztve. Ez így kevésnek tűnik, a valójában azonban, ha egy mól anyagot tekintünk, akkor $6 \cdot 10^{23}$ molekula közül $3 \cdot 10^{19}$ van az első rezgési nívón, amely még mindig rendkívül nagy szám. Konklúzió: Bár a rezgési energia a haladó és forgó mozgás kinetikus energiájához képest sokkal „durvábban" kvantált, mégis rengeteg molekula népesíti be a gerjesztett nívókat is.

Folyadékokban és szilárd testekben a molekulák egészükben is rezegnek, valamivel nagyobb amplitúdóval, ez azonban nagyságrendi különbséget nem jelent a nívók kvantáltságában a molekulán belüli rezgések nívósorozatához képest.

Hátra volna még az *elektrongerjesztési energia* tárgyalása. Itt az m helyébe egy elektron tömegét kell helyettesíteni, és anélkül, hogy részletes számítást végeznénk, beláthatjuk, hogy az első gerjesztett nívó energiája még sokkal nagyobb lesz, mint az első rezgési nívóé. Ez továbbá azt jelenti, hogy szobahőmérsékleten, termikus ütközések révén, a gerjesztett elektronnívók *egyáltalán nem népesülnek be.*

Fentiekből következik, hogy a makro- és mikroeloszlásokra vonatkozó egész gondolatmenet gázokra nem alkalmazható, legalábbis gázok haladómozgásának kinetikus energiájára nem, mert — mint már láttuk — ennek az energiának az esetében a legtöbb nívó üres, és egyetlen foglalt nívón sincs sok molekula (kettő is alig), másrészről a gázmolekulákat nem tudjuk egymástól megkülönböztetni, tehát a mikroeloszlás elveszíti értelmét. Ezzel szemben a szilárd kristályos test részecskéi megkülönböztethetők, mert mindegyik, térkoordinátákkal jellemezhető, adott rácspontban ül. Így van értelme a mikroeloszlásnak, és mivel haladó és szabad forgó mozgás kristályállapotban nem lehetséges, csak rezgés, az energianívók durván kvantáltak, úgyhogy minden betöltött nívón valóban sok részecske tartózkodik.

A rendezetlenség változása az időben. Az előzőekben tisztáztuk, hogy az (1)-gyel definiált P találati valószínűség annál kisebb, minél nagyobb a részecskeszám, minél nagyobb a test energiája és minél sűrűbbek az energianívók.

A molekulák közötti termikus kölcsönhatások következtében azonban a rendszer nem jellemezhető egyetlen makroeloszlással, mert azok is pillanatról pillanatra változnak. Ezért vizsgáljunk gondolatban egy rendszert huzamos időn keresztül. A mikroeloszlások a testben rendkívül gyorsan váltakoznak a részecskék állandó ütközései révén, és velük együtt a makroeloszlás is megváltozhatik. Rögzítsünk egy olyan igen rövid időtartamot, mely alatt csak egy mikroeloszlás tud megvalósulni. Legyen n_i azoknak a rövid időperiódusoknak a száma, ahányszor a vizsgálat ideje alatt az i-edik mikroeloszlás megvalósul. Hasonlóképpen definiáljuk n_j-t a j-edik mikroeloszlás megvalósulási számaként. Engedjük meg egyelőre, hogy a test környezetével tetszésszerinti energiacserében legyen. Próbáljuk meg eltalálni, hogy a vizsgálat ideje alatt a mikroeloszlások milyen sorrendben követik egymást, hiszen ezzel jellemezhető a rendszer tökéletesen, véges időn keresztül, és *számítsuk ki ennek az újabb tökéletes telitalálatnak a valószínűségét.*

Hogy az első mikroeloszlást eltaláljuk, annak a valószínűsége P_i, ez viszont az egyes energianívókon levő részecskék számával a korábbi képlet szerint számítható. Hogy a másik pillanatban megvalósuló, mondjuk j-edik mikroeloszlást találjuk el, annak P_j a valószínűsége. Hogy mind a kettőt az adott sorrendben eltaláljuk, annak a valószínűsége P_iP_j. Ha a harmadik pillanatban véletlenül visszaáll az i-edik mikroeloszlás, és azt ki is találjuk, annak ismét P_i a valószínűsége. A három találat együttes valószínűsége $P^2_iP_j$. Folytatva a gondolatmenetet, felírhatjuk, hogy a vizsgálat ideje alatt a mikroeloszlások tökéletes sorrendjének találati valószínűsége:

$$P' = \Pi P_i^{n_i}$$

Könnyebben kezelhető formulát kapunk, ha P' logaritmusát képezzük:

$$\ln P' = \Sigma n_i \ln P_i$$

Az így definiált P' azonban nem lehet a rendszer sajátsága, mert értéke attól is függ, hogy milyen hosszú a vizsgálat ideje, illetve hány rövid időperiódust veszünk figyelembe. P'-t akkor függetleníthetjük a megfigyelési időtől, ha a szumma valamennyi tagját elosztjuk Σn_i-vel, azaz az összes időperiódusok számával. Ez a Σn_i éppúgy arányos a vizsgálati idővel, mint az egyes n_i-k. Megállapíthatjuk ugyanakkor, hogy ha az n_i-k elég nagy számok, akkor a Σn_i annyiszorosa az egyes n_i-knek, ahány mikroeloszlás megvalósul a megfigyelés ideje alatt. A korábbiak értelmében:

$$\frac{n_i}{\Sigma n_i} = \frac{1}{\nu} = P_i$$

Ezzel:

$$\frac{\ln P'}{\Sigma n_i} \equiv \ln P = \Sigma P_i \ln P_i$$

Figyeljünk meg most egyszerre két, egymástól elválasztott rendszert, és állapítsuk meg, mi annak a valószínűsége, hogy a mikroeloszlások sorrendjét mind a két rendszerben eltaláljuk. Ha a találati valószínűség az A rendszerben P_A, a B rendszerben P_B, akkor az együttes találat valószínűsége P_AP_B. Logaritmusban:

$$\ln P = \ln P_A + \ln P_B = \Sigma(P_{Ai} \ln P_{Ai} + P_{Bi} \ln P_{Bi})$$

azaz a valószínűségek logaritmusai összeadhatók. Az összeadhatóság azonban csak addig érvényes, amíg a két rendszer valóban nincs egymással kölcsönhatásban. Ha az A rendszerben adott idő alatt q féle mikroeloszlás, a B rendszerben r féle mikroeloszlás valósul meg, akkor a fenti szumma qr tagból áll, mert az A rendszer valamennyi mikroeloszlása kombinálódhatik a B rendszer valamennyi mikroeloszlásával.

A két rendszer egyesítésével a részecskeszám hirtelen megnövekedése következtében új makro- és mikroeloszlások válnak lehetségessé, sőt a mikroeloszlások száma *aránytalanul jobban nő, mint maga a részecskeszám.* Ez tehát azt jelenti, hogy az egyesített és egyensúlyba jutott rendszer mikroeloszlásainak száma, s sokkal nagyobb mint qr. A szumma tehát sokkal több tagot tartalmaz, mint az előző képletben. Minthogy a szumma anyagi tagot tartalmaz, ahány mikroeloszlás van, és P_i a mikroeloszlások számának reciproka, a tagok számának növekedésével a P_i-k arányosan csökkennek. Minthogy azonban minden tagban a P_i-k kétszer fordulnak elő, maga a szumma is nagymértékben csökken. Ez a csökkenés nem következik be pillanatszerűen a két rendszer egyesítésekor, hiszen a végső egyensúly, azaz a legvalószínűbb állapot csak a részecskék közötti rengeteg energiacsere útján valósulhat meg. A $\ln P$ tehát fokozatosan csökken addig, míg az egyesített rendszer legvalószínűbb állapotába, azaz egyensúlyba nem jut. Ez a folyamat önként következik be, mint általában minden olyan folyamat a természetben, melynek folyamán a rendszerek kevésbé valószínű állapotokból valószínűbb állapotokba kerülnek.

Ezek után foglaljuk össze $\ln P$ minden fontosabb sajátságát: 1. Csökken, ha nő a rendszer energiája, mert ezáltal több mikroeloszlás valósulhat meg. 2. Csökken, ha sűrűsödnek az energianívók, mert ez is növeli a gerjesztett nívók nagyobb benépesíthetőségét, tehát a mikroeloszlások számát. 3. Csökken, ha nő a részecskék száma, mert ez is rohamosan növeli a mikroeloszlások számát. 4. Csökken, ha a rendszer nem egyensúlyi állapotból egyensúlyi felé halad, mert az eközben megvalósuló egyre valószínűbb állapotokat a mikroeloszlások számának növekedése jellemzi. 5. Additív, azaz egymással termikus kölcsönhatásban nem levő rendszerek $\ln P$ mennyiségei összeadhatók.

Az entrópia. A termodinamikában mindezeknek a sajátságoknak a jellemzésére egy függvényt alkalmaznak, mely arányos $\ln P$ abszolút értékével, de nő, amikor $\ln P$ csökken. Ez a függvény az S-sel jelölt *entrópia:*

$$S \equiv -k \Sigma P_i \ln P_i$$

Minthogy a fentiek szerint egy rendszer entrópiája állandó energia, nívósűrűség és részecske-

szám esetén is változik, ha a rendszer egy nemegyensúlyi állapotból önként az egyensúly felé halad, megkülönböztethetünk egy *egyensúlyi* entrópiát, mely adott energia, nívósűrűség és részecskeszám mellett a legvalószínűbb állapotot jellemzi. Minthogy ebben az állapotban a P_i-k minimálisak:

$$S_{es} = -k \Sigma P_{min} \ln P_{min}$$

Azt az entrópia különbséget, mely a pillanatnyi, nemegyensúlyi entrópia és az egyensúlyi entrópia között van, az önként végbemenő, megfordíthatatlan, *irreverzibilis folyamat* entrópiaváltozásaként értelmezzük:

$$\Delta S_{irr} \equiv S_{es} - S > 0$$

Ha egyensúlyi állapotban megszüntetjük az állandó energiacserét a környezettel, akkor a legvalószínűbb makroeloszlások váltogatják egymást, melyeket megvalósító mikroeloszlások száma és találati valószínűsége egyenlő. Ebben az esetben ln P_{min} kiemelhető a szumma elé, a szummában maradó P_{min}-ek összege pedig 1-gyel egyenlő:

$$S_{es} = -k \ln P_{min}$$

Állandó nívósűrűség (állandó térfogat) és részecskeszám mellett ez az egyensúlyi entrópia csak a rendszer energiájától függ. Ha állandó nívósűrűség, azaz állandó térfogat és állandó részecskeszám mellett egy rendszerrel energiát közlünk, akkor a molekulák egy részének nő az energiája, azaz a molekulák egy része magasabb nívókra kerül. Ez növeli a mikroeloszlások számát, tehát csökkenti P_{min}-t, illetve növeli az entrópiát. *Azt az energiát, mely a részecskéket magasabb nívókra emeli, a termodinamikában hőnek nevezzük és Q-val jelöljük.* A közölt hő tehát növeli az entrópiát, mert növeli az energiaeloszlás rendezetlenségét, de hogy milyen mértékben, az attól is függ, mennyire volt rendezetlen már a hőközlés előtt az energiaeloszlás a rendszerben. Belátható, hogy minél rendezetlenebb volt ez az energiaeloszlás, a hő annál kevésbé növeli még tovább a rendezetlenséget. Vizsgáljunk meg egy egyszerű példát: Az abszolút zérusponton valamennyi részecske a zérusnívón tartózkodik, tehát a P találati valószínűség egyenlő 1-gyel. Közöljük az abszolút zérusponton levő rendszerrel a lehető legkisebb hőt, aminek az lesz az eredménye, hogy *egyetlen részecske* az első gerjesztett nívóra kerül. Ekkor a találati valószínűség:

$$P_1 = \frac{(N-1)^{N-1} \cdot 1^1}{N^N} \approx \frac{1}{N-1}$$

(N olyan nagy szám, hogy a nevezőben N^N helyett $(N-1)^N$-et írhattunk.) Második lépésként közöljünk újra ilyen minimális hőt a rendszerrel. Ennek kétféle eredménye lehet: Vagy a gerjesztett nívón levő részecske gerjesztődik még egy kvantummal, vagy a zérusnívóról kerül még egy részecske az előző hőközléskor gerjesztett részecske mellé. Első esetben egy mikroeloszlás találati valószínűsége megegyezik a fentivel. Második esetben:

$$P_2 = \frac{(N-2)^{N-2} \cdot 2^2}{N^N}$$

Ez utóbbi találati valószínűsége sokkal kisebb az előző nél, tehát ez a makroeloszlás fog megvalósulni. Ha ellenben viszonyítjuk a találati valószínűség csökkenését az első lépésben bekövetkező csökkenéshez, akkor:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{(N-2)^{N-2} \cdot 4}{(N-1)^{N-1}} \approx \frac{4}{N-1}$$

(Itt viszont a számlálóban vettünk $N-2$ helyett $N-1$-et.) A találati valószínűség csökkenése tehát a második lépésben már mérsékeltebb, mint az első lépésben, mert a második lépés előtt a rendszer már rendezetlenebb volt.

A rendszer hőközlés előtti rendezetlensége az energiatartalomtól függ (adott nívósűrűség és adott számú részecske esetén), ami a rendszer „melegségében" is érzéklődik. *Minél melegebb rendszerrel közöljük tehát ugyanazt a hőmennyiséget, az entrópia annál kevésbé nő.* Ha a melegséget egy τ függvénnyel jellemezzük, mely annál nagyobb, minél melegebb a rendszer, akkor hőközlésre az egyensúlyi entrópia megváltozása:

$$\Delta S_{es} = \frac{Q}{\tau}$$

Ha a rendszer hőtartók sorozatától venné fel a hőt úgy, hogy mindegyik hőtartó éppen olyan meleg volna, mint a hőátadás pillanatában a rendszer, akkor csak minimális átrendeződések mennének végbe egy-egy hőtartó hőátadásának hatására. A minimális átrendeződés azt jelenti, hogy az új makroeloszlás is rögtön a legvalószínűbb az összes közül, éppúgy, mint az előző, nemcsak a rendszerben, hanem a hőtartóban is. Ilyenkor:

$$dS = -k \, d\ln P_{min}$$

A rendszerben egy vagy néhány kevés részecske magasabb nívóra kerül, a hőtartóban alacsonyabbra, de a ln P_{min} ugyanannyival csökken a rendszerben, mint amennyivel nő a hőtartóban, tekintettel arra, hogy azonosan melegek. Más szóval az ilyen minimális hőátadások alkalmával a rendszer entrópiája ugyanannyival nő, mint amennyivel a hőtartóé csökken. Ez valamennyi hőtartóra, tehát az így végrehajtott egész folyamatra érvényes.

Ha azonban a rendszer egyetlen lépésben veszi fel a hőt egy nála melegebb hőtartóból, akkor a hőtartóban — bár benne a részecskék szintén alacsonyabb nívókra kerülnek — az entrópia kevésbé csökken, mint az előbbi példában, a rendszerrel azonosan meleg hőtartók esetében, mert a hővesztéssel járó rendeződés az előző példákban levőknél rendezetlenebb állapotot változtat meg. Mint a fent tárgyalt számszerű példában is láttuk, részecskék átrendeződése annál kevésbé változtatja meg a rendszer rendezetlenségét, minél melegebb az. Az az entrópiakülönbség, mely a hőtartók sorozatának entrópiacsökkenése és az egyetlen melegebb hőtartó entrópiacsökkenése között fennáll, a ΔS_{irr}, azaz az irreverzibilis folyamat entrópianövekedése. Ennek figyelembevételével egy tetszőleges folyamat entrópiaváltozása:

$$\Delta S = \Delta S_{es} + \Delta S_{irr} = \frac{Q}{\tau} + \Delta S_{irr}$$

(Folytatása következik)

A MÁSODIK FŐTÉTEL: IDEÁLIS GÁZMODELL

Román U. Sexl
Bécsi Egyetem

Der Korfsche Uhr

Korf erfindet eine Uhr,
die mit zwei Paar Zeigern kreist
und damit nach vorn nicht nur,
sondern auch nach rückwärts weist.

Zeigt sie zwei, — somit auch zehn;
zeigt sie drei, — somit auch neun;
und man braucht nur hinzusehn,
um die Zeit nicht mehr zu scheun.

Denn auf dieser Uhr von Korfen
mit dem janushaften Lauf
(dazu ward sie so entworfen):
hebt die Zeit sich selber auf.

Christian Morgenstern

1. *A probléma*

A mechanika alapegyenletei

$$m\,\ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{K}$$

invariánsak a t ——$-t$ transzformációra, ami azt jelenti, hogy az egyik irányba lezajló folyamatok éppúgy az ellenkező irányba is végbemehetnek (a mozgás megfordítása).

Van mégis számos egyértelműen irreverzibilisen viselkedő rendszer. Felsorolunk olyan példákat, amelyeket a fenti egyenlet kielégítő közelítéssel leír, mégis irreverzibilis módon viselkednek (a mozgásirány megfordítására nem irreverzibilisek):

(1) vakuumban expandáló ideális gáz,

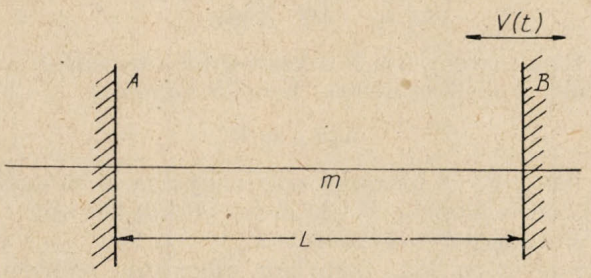
(2) a $\dfrac{\partial n}{\partial t} = D\Delta n$ egyenlettel leírt diffúzió.

Hogyan jönnek már most létre reverzibilis elemi folyamatokból irreverzibilis folyamatok?

Kérdés: Az elektrodinamika alapegyenleteinek

$$m\,\ddot{\mathbf{x}} = e\left(\mathbf{E} + \frac{\mathbf{v}}{c} \times \mathbf{B}\right)$$

jobb oldalán szerepel a sebesség. Nem invariánsok ezek az egyenletek a mozgásirány megfordításával szemben?



1. ábra. Tömegpont két fal között

2. *Egy egyszerű modell*

Tekintsünk egy egyszerű modellt, melynek segítségével az átmenetet a reverzibilis folyamatokból az irreverzibilis folyamatokba tanulmányozni tudjuk. Ezt a modellt sok évvel ezelőtt a kozmikus sugárzás elméletével kapcsolatban Fermi javasolta. m tömegpont A álló és a B elmozdítható fal között ide-oda mozog.

A jobb oldali fal periodikus mozgást végez, sebességét a 2. ábra mutatja.

a) A fal sebessége v_n *b)* A fal kitérése u_n

Könnyebbség kedvéért legyen a fal periódusa 1, akkor a kitérés 0 és a $= v/4$ között ingadozik.

Ha a fal mozgásának fázisát $\varphi = t \pmod 1$-gyel jelöljük és a fázist a fal és a m tömegpont közti n-edik ütközésnél φ_n-nel, akkor a sebesség v_n az n-edik ütközésnél.

$$v_{n+1} = v_n + 4\,V\left(\varphi_n - \frac{1}{2}\right).$$

A fázist az $(n+1)$-edik ütközésnél a

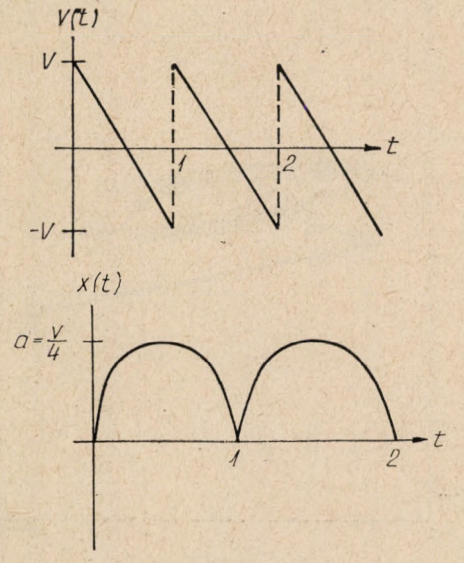
$$\varphi_{n+1} = \left(\varphi_n + \frac{2\,L}{v_{n+1}}\right) \pmod 1$$

képlet adja, amennyiben $a \ll 2\,L$, vagyis a fal mozgásának amplitúdója a falak középtávolságához képest elhanyagolható.

$u = v/4\,V$ összefüggést bevezetve

$$u_{n+1} = u_n + \varphi_n - \frac{1}{2}$$

$$\varphi_{n+1} = (\varphi_n + M^2/u_{n+1}) \pmod 1,$$



2. ábra. A fal mozgása

Előadás a II. Dunai Fizikatanítási Szemináriumon, Visegrád 1975. Fordította Kunfalvi Rezső.

(A mottóul választott vers elmondja, hogy Korf egy olyan órát talált fel, amelynek kétszer két mutatója van, az egyik pár előre, a másik visszafelé forog. Amikor az egyik két, ill. három órát mutat, akkor a másik 10, ill. 9 órán áll. Így az idő múlásától nem kell félni, mert az óra azt teljesen kiküszöböli.)

ahol

$$M^2 = 2\,L/2\;V = L/8a \gg 1.$$

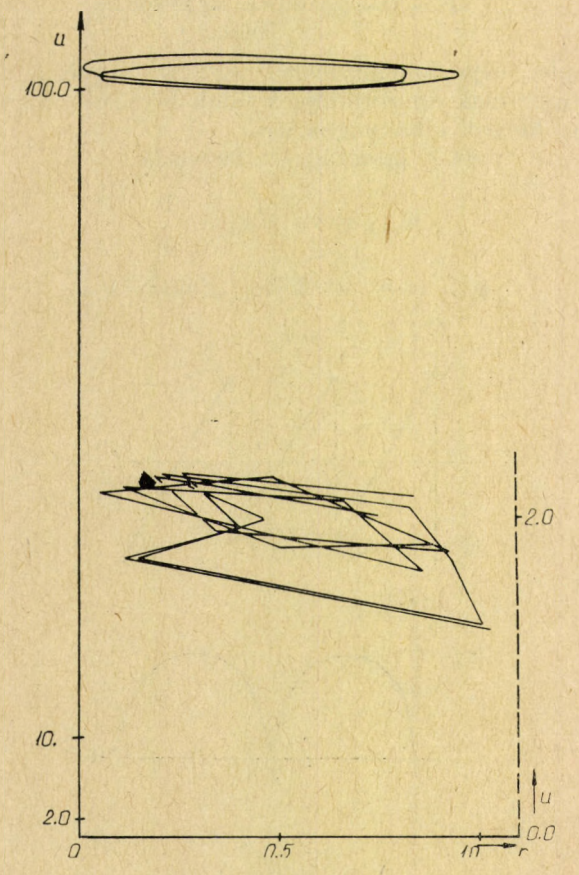
A dimenzió nélküli M^2 állandó nagyságrendje egyezik a faltávolság és az amplitúdó arányával.

Egyenleteinket kézi számítógép vagy komputer segítségével interációval lehet könnyen megoldani. Kezdeti adatként azt az u_0 sebességet és ψ_0 fázist választva, melynél a részecske a faltól elindul és ebből számoljuk u_1, u_2 stb.-t. Ha a számítást elvégezzük, látjuk, hogy $u_0 = 2$ és $\psi_0 = 0{,}75$ esetében a mozgásnál szabályszerűséget nem tudunk felismerni. $u_0 = 2{,}01$ és $\psi_0 = 0{,}76$-ra, tehát a kezdeti feltételek egészen kis változtatására a részecske viselkedése teljesen megváltozik.

Minthogy a kezdeti értékek mindig csak véges pontossággal mérhetők, a mozgást ebben a tartományban mind kevésbé lehet megjósolni. A pontatlanság a kezdő feltételekben kicsi, néhány ütközés után azonban már teljesen ellenőrizhetetlen mértékben megnő.

$u_0 = 100$ és $\psi_0 = 0{,}75$ esetében a helyzet teljesen más. u értéke az egyes ütközéseknél csak kis mértékben és szabályszerűen változik, ami egy (u, ψ) diagramon világosan szemléltethető:

$u_0 = 100$ esetén a mozgás a kezdeti feltételek kismértékű változtatására csak kevéssé tér el az eredeti alakjától. A kezdeti feltételekből nem származnak olyan katasztrofális következmények a rendszer további számolhatóságára, mint azt az előbbi esetben láttuk. Hogyan érthetjük meg a rendszer ilyen különleges viselkedését?



3. ábra

Ha kis du_n, $d\psi_n$ pontatlanságot nézünk, formuláink alapján u_{n+1} és ψ_{n+1} ugyancsak pontatlan lesz

$$du_{n+1} = du_n + d\psi_n,$$

$$d\psi_{n+1} = d\psi_n - \frac{M^2}{d^2_{n+1}}\,du_{n+1} =$$

$$= d\psi_n\left(1 - \frac{M^2}{u^2_{n+1}}\right) - \frac{M^2}{u^2_{n+1}}\,du_n.$$

Ezt az egyenletrendszert írhatjuk matrix alakban

$$\begin{pmatrix} du \\ d\psi \end{pmatrix}_{n+1} = M \begin{pmatrix} du \\ d\psi \end{pmatrix}_n,$$

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -b & 1-b \end{pmatrix}; \qquad b = \frac{M^2}{u^2_{n+1}}.$$

b értékét egy állandóval közelítve megkapjuk a „hibaterjedés törvényét"

$$\begin{pmatrix} du \\ d\psi \end{pmatrix}_{n+1} = M^n \begin{pmatrix} du \\ d\psi \end{pmatrix}_0.$$

Új alapot választva

$$da_\pm = d\psi + K_\pm\,du; \quad K_\pm = \frac{b}{2} \pm \sqrt{\frac{b^2}{4} - b},$$

M diagonizálásával

$$\begin{pmatrix} da_+ \\ da_- \end{pmatrix}_{n+1} = \begin{pmatrix} \lambda_+ & \Theta \\ \Theta & \lambda \end{pmatrix} \begin{pmatrix} da_+ \\ da_- \end{pmatrix}_n = M' \begin{pmatrix} da_+ \\ da_- \end{pmatrix}_n,$$

ahol

$$\lambda\pm = 1 - \frac{b}{2} \pm \sqrt{\frac{b^2}{4} - b}.$$

Így

$$\begin{pmatrix} da_+ \\ da_- \end{pmatrix}_n = \begin{pmatrix} \lambda_+ & \Theta \\ \Theta & \lambda \end{pmatrix} \begin{pmatrix} da_+ \\ da_- \end{pmatrix}_0.$$

Ez a törvény írja le a kezdeti hiba terjedését az adott modell esetében. Fennáll továbbá

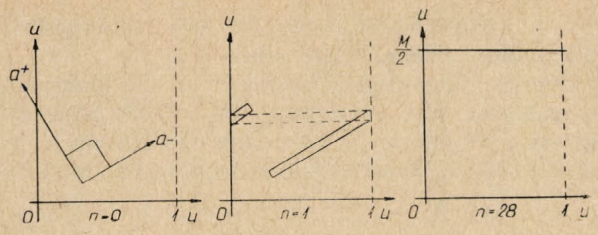
$$\lambda_+\lambda_- = 1$$

a (da_+, da_-) hibanégyszög nagysága a mozgás folyamán állandó. Megkülönböztetünk két esetet:

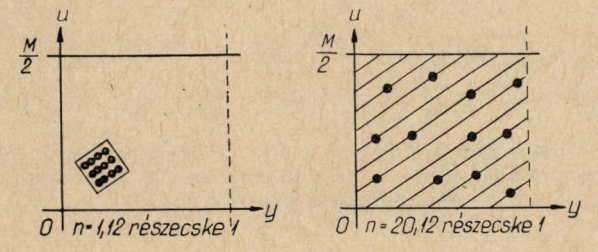
Minthogy $b > 4$ esetén $|\lambda_+| < 1$, $|\lambda_-| > 1$ a pontatlanság da_+ irányban állandóan csökken, da_- irányban állandóan növekszik, így ebben az esetben a 4. ábrán látható szituáció következik be:

A hibanégyszög (állandó felület mellett) mint elkeskenyedő csík a teljes $u^2 < \frac{M^2}{4}$ felszínre terjed át.

Ha egy egész részecskefelhőt indítunk el együtt kismértékben eltérő kezdeti feltételekkel — amint azt az 5. ábra mutatja —, akkor rövidesen a ré-



4. ábra. Hibaterjedés $b > 4$ vagy $u^2 < \frac{M^2}{4}$ esetén



5. ábra. A részecskék szétterjedése a fázistéren

szecskék az egész fázisteret egyenletesen beborítják.

A Fermi-rendszer $u < M/2$ esetén *sztochasztikusan viselkedik*, ergodikus, vagyis a részecskék rövid idő alatt az egész fázisteret egyenletesen betöltik.

$u = v/4V$-nek megfelelően ez azt jelenti, hogy a részecskék sebessége idővel $v = O$ és $v = 2VM = V\,L/2a \gg V$ között minden értéket felvesz.

A részecske ilyen módon a mozgó fal sebességének többszörösére gyorsul fel.

Ez a Fermi által a kozmikus sugárzás esetében posztulált gyorsító mechanizmus. Fermi töltéssel bíró részecskékre gondolt, melyek mozgó plazmafelhők között ide-oda oszcillálnak, miközben mágneses tereken visszaverődnek. Fermi úgy gondolta, hogy közben óriási részecskeenergiák keletkeznek, mert a részecskék és a plazmafelhő között energiaekvipartició áll elő. Mindjárt kiderül, hogy ez miért nincs így.

$b < 4$, tehát $v > V\sqrt{L/2a}$ esetén a fentiek alapján $\lambda \pm$ komplex éspedig $\lambda\pm = \exp(\pm\, i\alpha)$, ahol $\cos\alpha = 1 - b/2$. Ebben az esetben a hibanégyszög idők folyamán elfordul, amint azt a 6. ábra mutatja.

Itt tehát egy részecskefelhő mindig együtt marad, kis kezdeti helyzet- és sebességhibák a kis sebességtartományokban $(v < V\sqrt{L/2a})$ nem növekednek. A rendszer mozgása ebben az esetben értelemszerűen jobban írható le az *analitikai mechanika* módszereivel.

Egyugyanaz a rendszer viselkedhet a fázistér egyes résztartományaiban sztochasztikusan és ott a statisztikus mechanika módszereivel kell leírni, a fázistér más résztartományaiban viszont analitikus tulajdonságok érvényesek.

Kérdés: Ismerünk más ilyen rendszereket?

3. Irreverzibilitás

Az előbbiekben tárgyalt részecskemozgás két fal között példa olyan rendszerre, amelynél teljesen reverzibilis alapegyenletek érvényesek: ha egy adott időpillanatban a fal és a részecske mozgását megfordítjuk, $v_n \to -v_n$ és $\psi_n \to 1 - \psi_n$, akkor a rendszer az alapállapotába tér vissza.

A fázistéren eloszló sok pontnak tehát a kezdeti pontatlansági négyszögbe kell ismét összegyűlnie. Ha azonban ezt a mozgásmegfordítást egy számítógépen próbáljuk megvalósítani, akkor a kezdeti állapotba sohasem érkezünk vissza. Az okot a 7. ábra mutatja:

Kis pontatlanságok (u, ψ) számadataiban — lévén véges számjegy a komputeren — a rendszert a gyakorlatban irreverzibilissé teszik.

Minden pontatlanság — főként kvantumpontatlanság — a kezdeti feltételekben, ill. az elkerülhetetlen kismértékű zavarások (hőmozgás, sugárzás stb.) a sok részecskéből álló rendszerek — pl. gázok — mozgását irreverzibilissé teszik, mert a rendszer kiterjedését az egész fázistérre nem lehet visszacsinálni. A fázistérnek ezt az időben történő kiterjedését az *S entrópia* írja le:

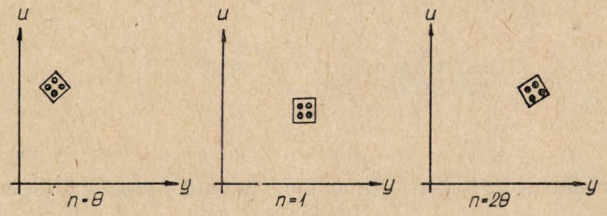
Ha egyensúlyi állapotban az entrópia maximum — akkor a rendszer egyenlő valószínűséggel oszlik el a rendelkezésre álló fázistér (hely- és impulzustér szorzata) összes pontjai között.

Mint további példát vizsgáljuk gáz kiömlését vákuumba (8. ábra).

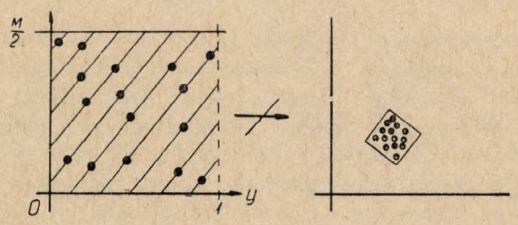
Az ábra kompjuteres számítás eredményét mutatja, kis számú részecske kiömlése esetében (gondoljunk a valóságos részecskeszámra). Az ábra az entrópia viselkedését is megmutatja, amit a szaggatott vonal jelképez. Látjuk a bal oldali részben maradó részecskék számát az idő függvényében.

Ha néhány (kb. 10) ütközés után megfordítjuk a mozgást, akkor a részecskék a 8/a ábrának megfelelően valóban visszatérnek a bal oldali térfogatrészbe.

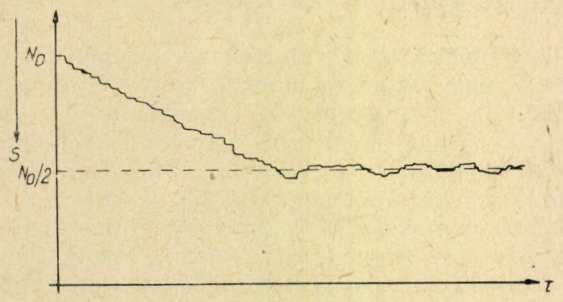
Ha a kompjuterrel a mozgás megfordítását kb. 100 ütközés után hajtjuk végre, akkor (minden



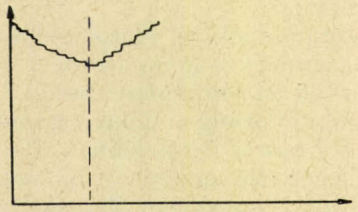
6. ábra. A részecskék viselkedése nagy sebesség esetén



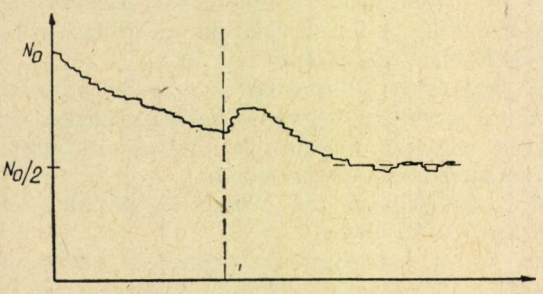
7. ábra. A mozgás megfordítása és az irreverzibilitás



8. ábra



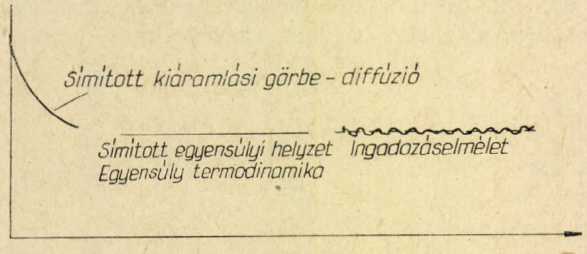
8/a ábra. A mozgás megfordulása 10 ütközés után



8/b ábra. Mozgásmegfordítás 100 ütközés után

részecske kb. egyszer ütközött), a mozgás megfordíthatatlannak bizonyul, mert a kompjuteren rendelkezésre álló véges számú számjegy megakadályozza a mozgás egzakt megfordítását (8/b ábra.

A rendszer fizikai viselkedését három különböző modellel lehet leírni (9. ábra).

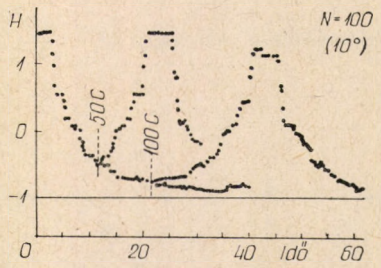


9. ábra. Egy termodinamikai rendszer háromféle leírás módja

4. A visszatérésre vonatkozó ellenvetés

Lehetséges-e az, hogy a kiömlő gáz rendszere valamelyik ingadozás után véletlenül a kezdeti állapotba visszatérjen, más szóval az összes részecskék ismét a baloldali térben gyűljenek össze? Elég hosszú ideig várva, fel kellene lépnie egy olyan ingadozásnak, amely az összes részecskét visszaviszi az eredeti állapotba. Ha most a tartályt gyorsan két részre osztjuk, akkor sikerült munkabefektetés nélkül egy irreverzibilis folyamatot visszafordítanunk.

Erre az ellenvetésre első feleletet ad a klasszikus visszatérési idő számítása. $N = 10^{23}$ részecske esetén $2^{10^{23}}$ lehetőség van azok eloszlására a két tartályrészben (ennél a számításnál figyelmen kívül



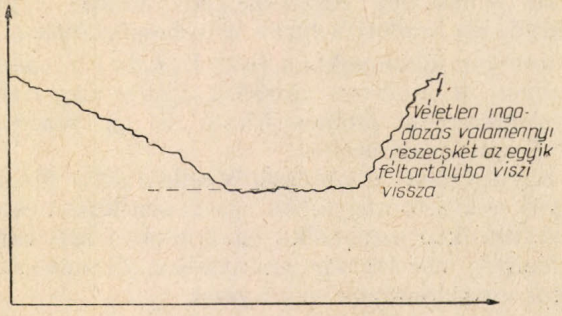
10. ábra. Egy 100 golyóból álló rendszer entrópiája elvégzett kompjuterszámítás alapján 50 vagy 100 ütközés utáni mozgásmegfordítás esetén

hagytuk a kvantumhatásokat és a részecskéket nem jelöltük meg külön). Számunkra ezek közül csak egyetlen egy kedvező, amikor az összes részecskék a tartály egyik felében vannak. Ha másodpercenként 10^5 lehetőséget tételezünk fel a molekulák közti ütközésre, akkor az egyik oldalon való visszatéréshez átlag

$$2^{10^{23}}/10^5 \approx 2^{10^{23}} \text{ mp szükséges.}$$

Így a visszatérés az eredeti állapotba gyakorlatilag jelentéktelen, a valóságban csak kis ingadozások lépnek fel. Még hozzátehetjük, hogy a visszatérés időpontját nem lehet megjósolni és a kezdeti helyzet ill. sebességek alkalmas megválasztásával előkészíteni, mert ehhez elérhetetlen mértékű pontosságra volna szükség (3. fejezet).

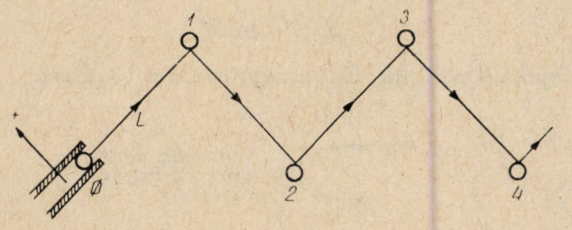
A rendszer visszatérése a kezdeti állapotba tehát a fizika álláspontja szerint egy előre nem látható, rendkívül ritka, reprodukálhatatlan esemény. Nem mond ellent a természeti törvényeknek, de belőlük előre nem jelezhető. A visszatérési problémával kapcsolatban további gondolatokat találunk majd a Maxwell-féle démonról szóló részben.



11. ábra. Reverzibilitás ingadozás útján

5. A határozatlansági reláció és a makrofizika

Ebben a fejezetben azt fogjuk megmutatni, hogy a határozatlansági reláció még sok klasszikus rendszer mozgásának megjósolását is lehetetlenné teszi. Nézzük a billiárdjáték egy egyszerű elméletét (12. ábra): Találja el a 0 golyó egymás után az álló 1, 2, ..., n golyókat.



12. ábra. A billiárdjáték

Hány golyóval kell ütköznie míg a következő ütközés előrejelzését a kvantumhatározatlanság lehetetlenné teszi? Mennyi ez a szám? 10? 10^5? 10^{20}?

Legyen a golyók távolsága $L = 1$ m, sugara $R = 2$ cm, tömege 10 g. A 0 golyót egy ágyú löki ki, a határozatlansági reláció

$$\Delta p \cdot \Delta x \approx \hbar; \qquad \Delta p = M \Delta v$$

az idő határozatlanságát beszűkíti. (Az x irány a lövés irányára merőlegesen értendő.) Az első célnál (1. golyó) a határozatlanság

$$\Delta x_1^2 = (\Delta x)^2 + \left(\frac{L}{v}\right)^2 \Delta v^2 = \Delta x^2 + L^2\hbar^2 / M^2 \, \Delta x^2 v^2$$

lesz, ennek minimumát

$$(\Delta x_1)^2 = 2\frac{\hbar L}{Mv}$$

adja, ahol $v = 10^2$ cm/s értékét választottunk. A golyókon való ütközésnél a határozatlanság nagyobb lesz (13. ábra).

Ha a golyó helyzete az 1. golyóval való ütközésnél Δx_1-gyel bizonytalan, akkor ez

$$\Delta\alpha \approx 2\alpha \approx 2\frac{x_1}{R}$$

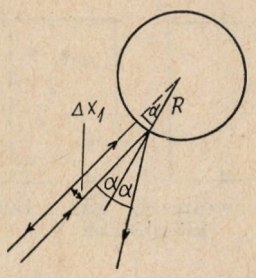
határozatlanságot idéz elő a visszaverődés szögében. Így a 0 golyó a 2. golyóhoz

$$\Delta x_2 \approx L\,\Delta\alpha \approx \frac{2L}{R}\Delta x_1$$

pontatlansággal érkezik, az n. golyónál hasonló módon a pontatlanság

$$\Delta x_n \approx \left(\frac{2L}{R}\right)^{n-1} \Delta x_1 = \left(\frac{2L}{R}\right)^{n-1} \sqrt{\frac{2\hbar L}{Mv}}.$$

$\Delta x_n = R$ esetén az n. golyót már nem lehet elegendő biztonsággal eltalálni. Ez bekövetkezik, ha



13. ábra. A pontatlanság növekedése ütközésnél

$$R = \left(\frac{2L}{R}\right)^{n-1} \sqrt{\frac{2L\hbar}{Mv}},$$

$$\left(\frac{2L}{R}\right)^n = 10^{2n} = \frac{M v L}{2\hbar} \approx 10^{16}.$$

Csak 8 golyót lehet eltalálni, a továbbit a kvantummechanika már lehetetlenné teszi.

Kérdések: Mekkora a Δx_0 határozatlanság?

A H atomnak hány ütközését lehet előre kiszámítani, ha a közepes szabad úthossz $L = 10^{-5}$ cm, $R = 10^{-8}$ cm, $M = 2 \cdot 10^{-24}$ g, $v = 10^5$ cm/s?

6. Entrópia és információ

Termodinamikai rendszereket szokásos módon az entrópiájukkal jellemzik, az irreverzibilis folyamatokat az entrópianövekedéssel.

Mi az entrópia? Emlékeztetek az olyan formulára, mint pl.

$$\Delta S = \frac{Q}{T}.$$

Hogyan lehet azonban az S mennyiséget szemléltetni? Hogyan lehet annyi tartalmat kapcsolni hozzá, mint az energia fogalmához?

A csak termodinamikailag leírható rendszereket az jellemzi, hogy hiányos a rendszerre vonatkozó információ!

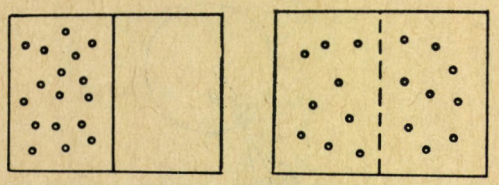
Az entrópia ennek a hiányzó információnak a mértéke. Az információt „bit"-ekben mérik. Egy bit egy-egy igen—nem vagy ± döntést jelent. A kompjuterek tároló képességét „bit"-ekben adják meg ($16k = 16\,000$ bit, szavak bizonyos számú bit-ből állnak). Az entrópára már most érvényes, hogy

$$S = (K \ln 2)\,\bar{I},$$

ahol $\bar{I}$ a rendszerre vonatkozó információ bit-ben megadva. A $k = 1{,}38 \cdot 10^{-16}$ erg/K Boltzmann állandó megadja a kapcsolatot az entrópia és az információ között. A fenti összefüggést általános levezetés helyett illusztráljuk példákkal.

Mekkora az információveszteség, ha egy ideális gáz a vákuumba kiömlik és ott térfogatát megkétszerezi?

A 14/b ábrán látjuk, hogy a 14/a-val szemben részecskénként a jobb—bal, vagyis egy bit információt vesztettünk. Ha egy Mol gázzal van dol-



14. ábra. Információveszteség gáz vákuumba történő kiömlésénél

gunk, akkor a teljes információveszteség $\bar{I} = N$ bit, tehát

$$\Delta S = N k \ln 2 = R \ln 2.$$

Ezt láthatjuk az entrópiának az ideális gázokra vonatkozó standard formulájából is (1. a függeléket a jelen fejezetben):

$$S = \frac{3}{2} R \ln T = R \ln V = S_0$$

(S_0 egy állandó). Minthogy a vákuumba való kiömléskor a belső energia

$$U = \frac{3}{2} RT$$

és ezzel T is állandó marad, kapjuk

$$\Delta S = S_2 - S_1 = R \ln V_2 - R \ln V_1 = R \ln 2.$$

Az ideális gáz entrópiájának kifejezésében tehát a második tagot a molekulák helyére vonatkozó információként értelmezzük.

Hasonló módon a $\frac{3}{2} R \ln T$ a molekulák sebességére vonatkozó hiányzó információt jelenti:

$$(\Delta v)^2 \sim \overline{v^2} \approx kT.$$

(A Maxwell eloszlás szélessége és ezzel a közepes sebességdiszperzió a közepes molekulasebesség nagyságrendjébe esik.) Ebből

$$\frac{3}{2} R \ln T = 3R \ln \sqrt{T} = 3R \ln v + \text{const} =$$
$$= R \ln (\Delta v)^3 + \text{const} = R \ln (\Delta v_x \, \Delta v_y \, \Delta v_z)$$

(a konstanst S_0 tartalmazza).

Hasonló módon írható

$$R \ln V = R \ln (\Delta x \, \Delta y \, \Delta z).$$

$\Delta p_x = m \Delta v_x$ bevezetésével

$$S = R \ln [(\Delta p_x \, \Delta x)(\Delta p_y \, \Delta y)(\Delta p_z \, \Delta z)].$$

x, p_x egy részecske fázistér eleme. Erre a klasszikus fizikában nincs természetes egység, a kvantummechanikában viszont van, éspedig h. Így írható

$$S = R \ln \left[\left(\frac{\Delta p_x \, \Delta x}{h} \right) \left(\frac{\Delta p_y \, \Delta y}{h} \right) \left(\frac{\Delta p_z \, \Delta z}{h} \right) \right].$$

Ha a határozatlanságot a kvantummechanikailag lehetséges legkisebbre redukáljuk, akkor $S = 0$ (nincs hiányzó információ); különben $S > 0$.

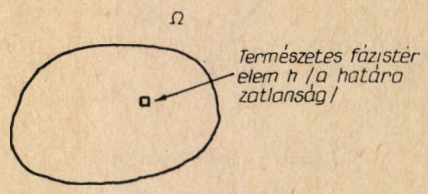
Az $S = k \ln \left[\left(\frac{\Delta p_x \, \Delta x}{h} \right)^N \ldots \right]$ átalakítás lehetővé teszi, hogy az entrópiát a fázistér Ω térfogatával fejezzük ki, ami h természetes egységekben mérhető

$$S = k \ln \Omega.$$

Helyette gyakran az

$$S = k \ln W$$

kifejezést találjuk. Ezt magyarázza a 15. ábra.



15. ábra. A fázistér méretéhez

$W = \Omega$ megadja azt, hogy hány fázistérelem áll a rendszer rendelkezésére. Abban az esetben, ha a rendszer ugyanazzal a valószínűséggel található a fázistér valamely részében, akkor $1/W$ adja meg az állapot valószínűségét (egy meghatározott fázistérelemet). A kvantummechanikában W éppen a rendszer számára rendelkezésre álló kvantumállapotok száma.

Feladatok: Számítsuk ki az információveszteséget két egyenlő gázmennyiség keverésekor!

Értelmezzük a párolgási hőt az információelmélet szempontjából, felhasználva a $T \Delta S = \Delta Q$ összefüggést!

Függelék: Az entrópia kiszámítása ideális gáz esetében. Az I. főtétel szerint

$$dU = d'Q - pdV.$$

Ideális gáz esetében U független a térfogattól (kísérlet?) és $C_v = \frac{3}{2} R$ alapján (egy molra) érvényes

$$U = \frac{3}{2} RT; \qquad dU = \frac{3}{2} RdT,$$

$$d'Q = \frac{3}{2} RdT + pdV = \frac{3}{2} RdT + \frac{RT}{V} dV,$$

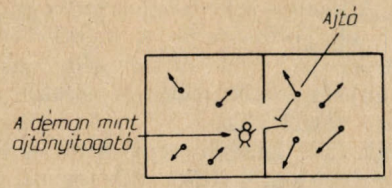
$$dS = \frac{dQ}{T} = \frac{3}{2} R \frac{dT}{V} + R \frac{dV}{V}.$$

dS-től eltérően $d'Q$ nem egzakt differenciál (a hő nem anyag!). Következik

$$S = \frac{3}{2} R \ln T + R \ln V + S_0.$$

7. *A Maxwell-féle démon*

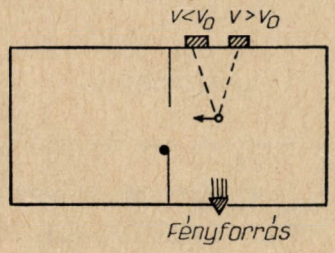
Képzeljünk el egy kis manót, amelyik egy izotermális gázt egy kettős tartályban sebesség szerint szétválaszt, a lassú molekulákat balra, a gyors molekulákat jobbra rendezi (16. ábra):



16. ábra. A Maxwell-féle démon munkában

Tudná-e az ilyen démon a második főtételt érvénytelenné tenni?

Az entrópia és az információ közti összefüggés ismeretében ezt a lehetőséget kizárhatjuk. Ahhoz, hogy a molekulákat pl. $v > v_0$, $v < v_0$ alapján két osztályba sorolja, a manónak információra volna szüksége a sebességekről. Meg kellene figyelnie a molekulákat. Ehhez viszont fény szükséges, ideális esetben a molekulánként egy-egy kvantum, amint a 17. ábrán látható.



17. ábra. A démon megfigyel

A fénykvantum a molekulán szóródva pl. a bal oldali detektorra jut $v < v_0$ és a jobb oldali detektorra $v > v_0$ esetén. Így molekulánként 1 bit információt nyerünk és ezáltal az entrópia értékét csökkenthetjük (szétválasztva hideg és meleg gázt). Ugyanakkor azonban fotononként 1 bit információt vesztünk (a bal ill. jobb detektoron), vagyis a gáz + fény rendszer entrópiája nem változik, sőt ha reálisan nézzük, még meg is nő. A démonok sem tudják tehát a termodinamika II. főtételét érvénytelenné tenni.

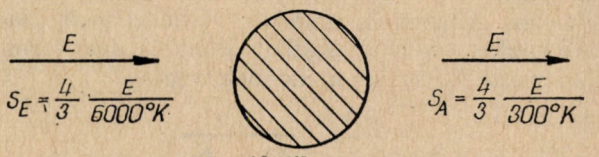
Kérdés: Hogyan ítélhetjük meg az információelméletre támaszkodva a 2. és 3. fejezetben leírt sebességmegfordítást?

8. Entrópia és élet

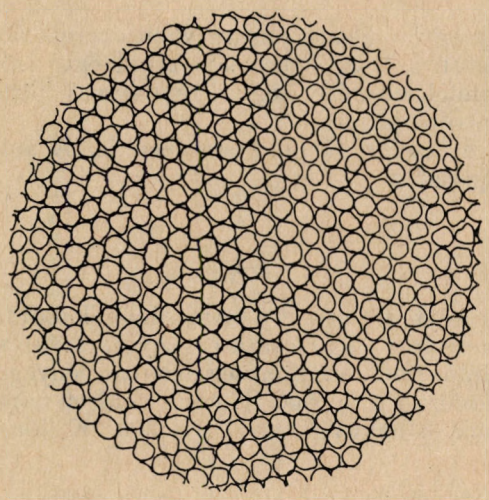
1944-ben jelent meg Erwin Schrödinger könyve: „What is life?", melynek befolyását a molekuláris biológia fejlődésére már másutt említettük. Ebben Schrödinger cáfolta azt a sokszor hallott és ma is hallható állítást, mely szerint az élet ellentmond a fizika törvényeinek, hiszen a termodinamika mindig struktúrák szétesését és sohasem létrejöttét tudja előre megmondani. A termodinamika egyensúlyhoz, tehát a halálhoz és nem az élethez vezet — röviden így foglalhatnánk össze ezt a véleményt.

Első rátekintésre valóban a helyzet ilyennek tűnik fel: a hőmérsékletkülönbségek kiegyenlítődnek, gázok egyenletesen oszlanak el, az áram az ohmikus ellenállás hatására elapad, ha feszültségforrások alkalmazásával mesterségesen nem tartjuk fenn.

Ez a termodinamika alapján alkotott általános kép. Itt azonban nem a termodinamika következményével állunk szemben, hanem a fizikusoknak azzal a törekvésével, hogy először mindig a legegyszerűbb jelenségeket (és testeket) tanulmányozzák. A termodinamikai kiegyenlítődési folyamatok pedig a legegyszerűbbek, mert a végén egységes rendszerhez (fázishoz) vezetnek.*



18. ábra



19. ábra

Gondoljunk más folyamatokra: kristály kiválása olvadékból, hópehely a vízgőz-felhőből. Nem lehet szó ezekben a példákban a szerkezet nélküliség felé tendálásról. Ezek a rendszerek mindenesetre bonyolultabbak a korábban vizsgáltaknál: nem homogének és többféle fázist tartalmaznak.

Fázisátmeneteknél keletkezhetnek struktúrák termodinamikai úton.

Grafikusan ezt így szemléltethetjük (S = entrópia):

$$\boxed{S} \longrightarrow \boxed{S_1} + \boxed{S_2}$$

$S_1 + S_2 > S$ (entrópianövekedés),

$S_1 \ll S$ (struktúrakeletkezés).

* Ugyanezt láthatjuk pl. a természetes testek osztályozásában is — kristályos szilárd testek, folyadékok és gázok. Még azt is állítják, hogy ez a beosztás ontológiai természetű: a testeknek egyik vagy másik típushoz kell tartozniuk a három közül. Teljes ostobaság: folyadékok és gázok pl. (amint azt már Van der Waals 1873 évből származó vizsgálataiból tudjuk) folytonosan egymásba átvihetők; kristályos szilárd testek egy igen speciális, ideális esetet képeznek, melyet egyszerűsége miatt már korán tanulmányoztak. Mi a papír, a gumi, a hús?

Ismerünk tehát egy egyszerű módszert struktúrák termodinamikai úton való előállítására.

Az élet létrejöttéhez és fenntartásához az utóbbi években egy másik folyamattípus bizonyult még lényegesnek. Először szemléltessük grafikusan:

$$\frac{E}{S_E} \rightarrow \boxed{S_i} \rightarrow \frac{E}{S_A}$$

E energia folyik át a rendszeren, miközben az energia S_E entrópiával folyik be és S_A entrópiával távozik. Közben a rendszer S_i belső entrópiája csökkenhet (vagy maradhat állandó), bár termodinamikai folyamatok mennek végbe:

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = \overbrace{\frac{\Delta S_i}{\Delta t}}^{\leq Q} + \overbrace{\frac{S_A - S_E}{\Delta t}}^{> Q} > Q$$

Így egy rendszernek, melyben energia áramlik keresztül, a belső entrópiája mindvégig csökkenhet, annak ellenére, hogy a rendszer + környezet összentrópiája növekszik.

Ez a helyzet a Föld esetében is. A sugárzás entrópiáját az

$$S = \frac{4}{3} E/T$$

képlet adja, amint azt a termodinamikából tudjuk (a fekete test sugárzására érvényes, a Nap sugárzása irányított, a különbség azonban lényegtelen).

A Földre $T_E \approx 6000$ °K hőmérsékletű napsugárzás esik, a hőkisugárzás $T_A \approx 300$ °K hőmérsékleten lehet. A kisugárzott energia entrópiája tehát kb. 20-szor nagyobb, mint a beesőé! (A Föld energiatárolása ill. energiaveszteségе jelentéktelen.) A különbség struktúrák felépítésére ill. azok fenntartására fordítódik.

Struktúrák keletkezésére egy energia által átáramlott rendszerben a fizika már régen ismer egy egyszerű példát: ilyenek a konvekciós cellák alulról melegített folyadékban.

Amikor a folyadékban a hőmérsékleti gradiens átlép egy bizonyos küszöbértéket, a hőszállítás felfelé nem rendezetlen molekulamozgás útján történik, hanem teljesen szabályos cellákkal.

Ha egy rendszeren átáramló energia egy bizonyos küszöbértéket meghalad, akkor spontán struktúrakeletkezés alakulhat ki (disszipatív struktúra), közben a rendszer entrópiája csökken, a rendszer és környezet entrópiája pedig növekszik.

IRODALOM

I. Prigogine: La Thermodynamique de la vie, La Recherche *3*, 547 (1972)

I. Prigogine et al: Thermodynamics of Evolution, Physics Today, Nov., Dec. 1972

E. Schrödinger: What is Life; Cambridge Univ. Press 1960.

M. Eigen, R. Winkler: Ludus Vitalis; in Mannheim Forum 1973/74 (Böhringer Mannheim GmbH., Mannheim)

M. Eigen, Selforganisation of Matter and the Evolution of Biological Macromolecules, Die Naturwissenschaften *58*, 465 (1971)

A MÁSODIK FŐTÉTEL: GUMI—MODELL

Tasnádi Péter

ELTE Általános Fizikai Tanszék

1. Bevezetés

Középiskolásokkal folytatott kötetlen beszélgetések, felvételik, érettségi vizsgák tapasztalatai bizonyítják, hogy a termodinamika a fizika egyik nehezen „emészthető" része. A legnagyobb probléma talán az, hogy a diákok nagy része nem érti, és nem is érzi a termodinamikai törvények rendkívüli általánosságát, átfogó erejét. A termodinamika igen sok diák számára örökre „hőtan" marad, amely a kalorimetrián kívül legfeljebb az ideális gáz tulajdonságainak magyarázatára alkalmas.

A törvények tartalmának ezt a „beszűkülését" több okkal magyarázhatjuk. Ezek közül talán a legfontosabb, hogy az általános termodinamikai törvények igen kevés anyag esetén alkalmazhatók egyszerű formában, pontosabban csak néhány anyag (ideális gáz, egyszerű paramágneses anyag, Einstein kristály, gumi stb.) állapotegyenlete írható fel a középiskolában is tanítható egyszerű alakban.

A középiskolás termodinamika megértését az is megnehezíti, hogy a tárgyalt anyag a termodinamikának csak egy szűk részét tartalmazza, így a II. főtétel, valamint olyan fontos fogalmak, mint az entrópia, entalpia, szabad energia stb. hiányában az alkalmazási lehetőségek is a minimálisra csökkennek.

Ugyancsak problémát okoz, hogy a középiskolás anyag a termodinamika statisztikus részéből szinte semmit sem tartalmaz, a fenomenologikus megalapozás megértése viszont rendkívül jó absztrakciós készséget igényel.

A fentiekben felsorolt nehézségek véleményünk szerint nagy mértékben csökkennének a tananyag statisztikus részének bővítésével, valamint az ideális gáz mellett néhány más modellanyag tárgyalásával.

A modellanyagok közül — a középiskolai tanításban — talán a gumi lehet a leghasznosabb, mert mikroszerkezeti modellje viszonylag egyszerű, ugyanakkor makroszkopikus viselkedése órai kísérletek és tanulói gyakorlatok során könnyen tanulmányozható. (Ez utóbbi pl. nem tehető meg az Einstein-kristállyal.)

Középiskolás szinten a tényleges fizikai kísérletekből történő kiindulás rendkívül fontos, mert a statisztikus leírás elvont gondolat vagy számítógépes kísérletei a fizikát valószínűtlenné, pusztán kombinatorikai játékká tehetik.

2. A gumi rugalmas tulajdonságai

A kísérletek szerint a gumi nyújtása során három lényegesen különböző tartományt kapunk. Ezek a következők:

1. Viszkózus folyás.
2. Nagyrugalmas megnyúlás.
3. A fémekhez hasonló rugalmas viselkedés.

A három tartomány megjelenése és hogy adott gumi esetén melyik válik dominánssá igen sok tényezőtől függhet. Ezek közül a legfontosabb a hőmérséklet és a gumi előállítási technológiája. Magasabb hőmérsékleten és gyengén vulkanizált gumik esetén a viszkózus folyás, erősen vulkanizált guminál (pl. ebonit) pedig a fémszerű rugalmas viselkedés a döntő.

Számunkra legérdekesebb az ún. nagyrugalmas tartomány, amelyben a gumi eredeti hosszának többszörösére nyújtható reverzibilis módon. Ebben a tartományban a megnyúlásra nem érvényes a Hooke törvény.

A tanítás során érdemes kísérletileg megvizsgálni adott hőmérsékleten a feszültség és megnyúlás közötti összefüggést, ($\sigma(\varepsilon)$ görbe 2.1 ábra) valamint állandó megnyúlás mellett a $\sigma(T)$ összefüggést (2.2 ábra).

A 2.2 ábrából megállapítható, hogy kis megnyúlás esetén a hőmérséklet emelkedése során a feszültség kissé csökken, nagyobb megnyúlás létrehozása után azonban a feszültség a hőmérséklet emelkedésével megnövekedik. (Az utóbbi viselkedés erősen eltér a szokásostól, váratlansága talán még jobban érzékelhető, ha egy állandó feszültséggel terhelt gumiszálat melegítünk, — ekkor a gumiszál összehúzódik.)

Végül a gumi rugalmas viselkedésének tanulmányozására talán a legegyszerűbb kísérlet a következő: Befőttes gumi darabot szorítsunk két ajkunk közé, majd hirtelen húzzuk meg a gumit. A gumiszál érezhetően felmelegszik. A hirtelen folyamat adiabatikusnak tekinthető, megállapítható tehát, hogy a gumi az adiabatikus nyújtás során felmelegszik.

A befőttes gumi megnyújtása során megállapítható az is, hogy 3—4 szeres megnyújtás után a gumiszál hirtelen keménnyé válik, további nyújtásához már lényegesen nagyobb erő szükséges. A keményedés a nagyrugalmas tartomány határát jelzi, s általában hirtelen következik be.

3. A gumi mikroszerkezete

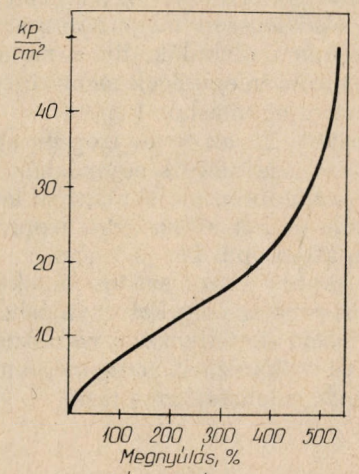
A továbbiakban csak a természetes gumival foglalkozunk. A természetes gumi makromolekulájú anyag, poliizoprén molekulákból áll. A poliizoprén molekula egy izoprén egységének szerkezetét a 3.1 ábra szemlélteti.

A gumiban található poliizoprén molekulák néhány száz iroprén egységből állnak. Az izoprén egységek térbeli elrendeződését a lehetséges kötésszögek szabják meg. Az izoprén molekulákban a szénatomok az sp^3 hibridizáció miatt négy egyenrangú kötést hoznak létre, így minden szénatomot egy olyan tetraéder középpontjában kell elképzelnünk, amelynek csúcsaiban a szomszédos szénatomok ill. hidrogénatomok helyezkednek el.

Az izoprén egységeket szigma kötés kapcsolja össze, amely lehetővé teszi, hogy a kötésszög megtartása mellett a szomszédos izoprén egységek egymáshoz képest elforduljanak. Ennek következtében a gumi molekulát egy izoprén egységből álló gombolyagként képzelhetjük el, amely gombolyag alakja és elrendeződése igen könnyen változhat.

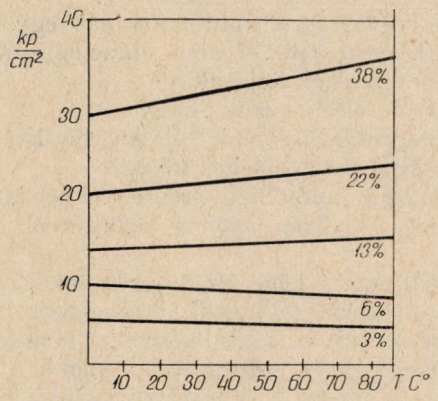
A mikroszerkezeti kép alapján könnyen megérthető a gumi rugalmas viselkedésének háromféle tartománya.

Amennyiben az egyes makromolekulák (a gombolyagok) könnyen elmozdulhatnak egymáshoz képest, a gumi erősen súrlódó folyadékhoz hasonlóan viselkedik. Ez a viszkozus folyás tartománya.



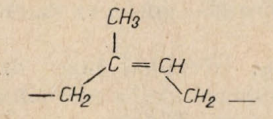
Vulkanizált természetes gumi tipikus feszültség megnyúlás görbéje

2.1 ábra

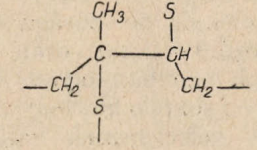


Állandó hosszúságú gumiszál feszültség hőmérséklet függése

2.2 ábra



3.1 ábra



3.2 ábra

A legnagyobb méretű hosszváltozás akkor következik be, ha a felgombolyodott molekulát kinyújtjuk. Ez magyarázza a nagyrugalmas viselkedést.

Végül a fémekhez hasonló viselkedéshez jutunk, ha a szénatomok közötti kötéstávolságokat változtatjuk meg. Ez többnyire csak akkor lehetséges, ha az egyes molekulákat előzőleg már kinyújtottuk. Megkaptuk tehát a gumiszál keményedésének magyarázatát is.

A modell alapján érthető, hogy a gumi rugalmas viselkedését elsődlegesen meghatározza, hogy az egyes poliizoprén molekulák, ill. a molekuláncon belül az egyes izoprén egységek mennyire szabadon mozdulhatnak el egymáshoz képest.

A molekulákat, ill. az egyes izoprén egységeket vulkanizációval rögzíthetjük egymáshoz. A vulkanizáció során az izoprén molekulákban levő kettős kötés felszakad és két szomszédos izoprén egység közé egy kén atom épül be. (3.2 ábra.)

Ez az ún. kénhíd a szomszédos molekulákat ill. szomszédos izoprén egységeket egymáshoz rögzíti, így a vulkanizáció akadályozza a viszkozus folyást, a nagymértékű vulkanizáció pedig még a molekulák legombolyítását is lehetetlenné teszi.

4. A gumi láncmodellje

A továbbiakban a gumi nagyrugalmas viselkedését leíró modellel foglalkozunk.

A gombolyagszerű gumimolekulát egy hosszú láncként képzelhetjük el, ahol a lánc egyes szemeit az izoprén egységek képezik.

A láncról feltételezzük, hogy:

a) Az egyes láncszemek teljesen véletlenszerűen helyezkednek el egymáshoz képest

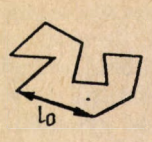
b) Egy lánc különböző elrendeződései konstans hőmérséklet mellett azonos energiával rendelkeznek.

A modellekben tehát az izoprénmolekulák tetszőleges szögben állhatnak egymáshoz képest. Ez az egyszerűsítés az eredményeket nem befolyásolja lényegesen, a számításokat azonban erősen lerövidíti. A második feltétel azt jelenti, hogy a gumi nyújtása állandó hőmérséklet mellett pusztán a molekula alakjának megváltoztatásával jár.

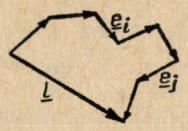
Elképzelhető ugyan, hogy két láncszem relatív helyzetének megváltoztatásakor energiát kell befektetni, azonban feltételezzük, hogy az új egyensúlyi állapot beállása során ez az energia felszabadul.

Feltételezzük továbbá, hogy az egyes gumimolekulák teljesen véletlenszerűen állandóan változtatják alakjukat. Egy gumiszál hosszát nyilván az egyes gumimolekulák két végének átlagos l_0 távolsága szabja meg. (4.1. ábra).

Egy adott molekula hosszúsága az egyes láncszemek különböző beállásai során természetesen változik. Vannak azonban olyan l_0 távolságok, amelyek rendkívül sokféle láncelhelyezkedéssel megvalósíthatók. A véletlenszerű változások során legtöbbször azt az l_0 távolságot (makroállapotot)



4.1 ábra



4.2 ábra

észleljük, amely a legtöbb féle láncszem-elrendeződéssel (mikroállapot) valósítható meg.

A vulkanizált gumi esetén a véletlenszerű mozgás természetesen csak az egyes láncok két kénhíd között elhelyezkedő részén lehetséges.

4.1. A gumimolekula átlagos hossza.

Határozzuk meg most egy N láncszemből álló molekula két végének átlagos l_0 távolságát a fenti feltételek mellett. Válasszuk távolságegységként egy láncszem hosszát. Ekkor a két láncvéget összekötő l vektort a 4.2 ábra alapján az

$$l = \sum_{i=1}^{N} e; \qquad 4.1-1$$

formula adja meg, ahol e_i az i-ik láncszemmel egybeeső egységvektort jelenti.

Az átlagos távolságot az

$$\overline{|l|} = \sqrt{\overline{(\sum_i e_i)^2}} = \sqrt{\overline{\sum_i^N e_i^2} + \overline{\sum_{\substack{i,j \\ i \neq j}} |e_i|\,|e_j| \cos(e_i, e_j \sphericalangle)}} \qquad 4.1-2$$

formulából határozhatjuk meg. 4.1—2-ben a gyökjel alatti második tag zérust ad, hiszen az i és j-ik egységvektor szöge azonos valószínűséggel lehet α és $\alpha + \pi$ és $\cos\alpha = -\cos(\alpha + \pi)$.

A gyökjel alatti első tag értéke viszont $e_i^2 = 1$ miatt éppen N. Az átlagos távolság tehát

$$\overline{|l|} = \sqrt{N} \qquad 4.1-3$$

A fenti egyszerű számítás igen könnyen ellenőrizhető egy gémkapocslánc segítségével.

Egy 16 egységből álló gémkapocslánc véletlenszerű leejtéseiből látható, hogy a két vég távolsága a legtöbb esetben 4 egységnyi. Az ejtést százszor elvégezve a következő eloszlást kaptuk: (4.3 ábra) (A tört hosszúságokat kerekítettük.)

A legvalószínűbb távolság számítása alsóbb osztályokban nem végezhető el, az eredmény azonban a gémkapocslánccal végzett kísérlet segítségével megkapható.

4.2 A szabad láncelemek számának meghatározása.

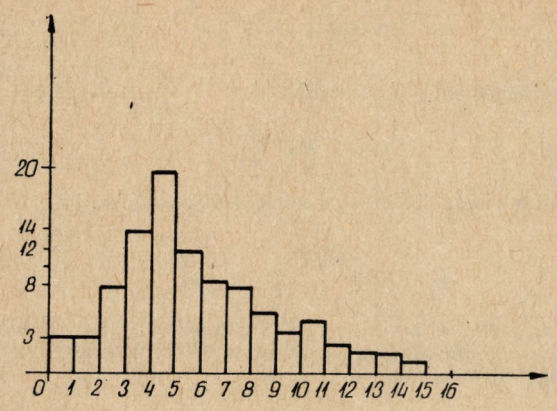
A lánc modell felhasználásával megbecsülhetjük, hogy a befőttes gumiban két kénhíd között átlagosan hány elemből álló lánc (szabad lánc) helyezkedik el.

Tegyük fel, hogy a gumiszál csupa $\sqrt{N}$ hosszúságú szabad láncból áll. Ekkor a gumiszál d_0 hosszára fennáll a

$$d_0 \sim \sqrt{N}$$

összefüggés. Nyújtsuk meg a gumiszálat egészen addig, míg megkeményedik. Modellünk szerint ekkor az összes molekulákat legombolyítottuk, tehát a megnyúlt hosszra (*d)* felírhatjuk a

$$d \sim N$$



4.3. ábra

arányosságot. Innen

$$\frac{d}{d_0} \sim \sqrt{N}$$

Befőttes gumival végzett kísérlet során 8 cm hosszú gumiszálat 36 cm hosszúságúra nyújtottunk. Modellünk szerint az átlagos szabad lánc 20 izoprén egységből áll. A 16 egység hosszúságú gémkapocslánc tehát viszonylag jól modellezi a befőttes gumi szabad láncát.

5. A gumi entrópiája

Megállapítottuk, hogy a gumi láncmolekulája a láncszemek véletlenszerű mozgása miatt azt a makroállapotot veszi fel, amelyet a legtöbb mikroállapot valósíthat meg. Ez azonban azt is jelenti, hogy a lánc ebben az állapotban a legrendezetlenebb. A rendezetlenséget ilymódon jellemezhetjük azzal, hogy az adott makroállapot (esetünkben adott láncvég-távolság) az elemek hányféle elrendeződése esetén valósul meg.

5.1 Egyenes mentén elhelyezkedő lánc entrópiája.

A mikroállapotok megszámlálása a lánc térbeli elhelyezkedése esetén nem egyszerű. Foglalkozzunk ezért először azzal az esettel, amikor a teljes lánc egy egyenes mentén helyezkedik el. Az egyes láncszemek ekkor véletlenszerűen vagy előre, vagy hátrafelé esnek, s így alakul ki a „felgombolyodott" lánc.

Határozzuk meg, hogy az egyes láncszemek hány féle elrendeződése esetén valósul meg, hogy az N egységből álló lánc egyik vége az origóban, a másik vége pedig az x pontban helyezkedik el. Jelöljük n_e-vel az előre, n_h-val pedig a hátra eső láncszemek számát.

Ekkor

$$n_e + n_h = N$$
$$n_e - n_h = X \qquad 5.1$$

5.1-ből

$$n_e = \frac{N+X}{2}, \qquad n_h = \frac{N-X}{2} \qquad 5.2$$

Az adott makroállapot ekkor

$$W(x) = \binom{N}{\frac{N+x}{2}} \qquad 5.3$$

esetben valósulhat meg. A $W(x)$ számot tekinthetnénk a lánc adott állapotában a rendezetlenség mértékének. Két lánc esetén azonban ezek a mértékek összeszorzódnak. Kényelmesebb számunkra, ha additív mértéket választunk.

A rendezetlenség mértékéül ezért a fenti $W(x)$ szám természetes logaritmusával arányos mennyiséget választunk. Ezt a mennyiséget entrópiának nevezzük.

$$S = k \ln W \qquad 5.4$$

5.3 és 5.4 segítségével meghatározzuk a lánc entrópiáját:

$$S = k \ln \frac{N!}{\left(\frac{N+x}{2}\right)! \left(\frac{N-x}{2}\right)!} = k\left[\ln N! - \ln \frac{N+x}{2}! - \ln \frac{N-x}{2}!\right] \qquad 5.5$$

A faktoriálisok természetes logaritmusai nagy N értékek esetén közelíthetők a Stirling formulával, mely szerint

$$\ln N! \sim N \ln N - N \qquad 5.6$$

Az 5.6 közelítést 5.5-be beírva és néhány azonos átalakítást elvégezve

$$S \sim N \ln N - N - \frac{N+x}{2} \ln \frac{N}{2}\left(1 + \frac{N}{x}\right) + \frac{N+x}{2} - \frac{N-x}{2} \ln \frac{N}{2}\left(1 - \frac{x}{N}\right) + \frac{N-x}{2}$$

Fbből

$$S \sim N \ln 2 - \frac{N+x}{2} \ln \left(1 + \frac{x}{N}\right) - \frac{N-x}{2} \ln \left(1 - \frac{x}{N}\right)$$

Végül ha $x \ll N$ alkalmazhatjuk az

$$\ln \left(1 \pm \frac{x}{N}\right) \sim \pm \frac{x}{N}$$

közelítést, amellyel

$$S \sim N \ln 2 - \frac{x^2}{N} \qquad 5.7$$

Az 5.7 formuláról érdemes visszatérni az eredeti $W(x)$ kifejezésre:

$$W(x) \sim 2^N e^{-\frac{x^2}{N}} \qquad 5.8$$

5.8-ból látható, hogy az összes lehetséges mikroállapot közül az x-szel jellemzett makroállapot az összes lehetőségek $e^{-\frac{x^2}{N}}$ szerese valósítja meg, azaz a mikroállapotok száma exponenciálisan csökken. Adott makroállapot $p(x)$ valószínűségére tehát fennáll a

$$p(x) \sim e^{-\frac{x^2}{N}} \qquad 5.9$$

összefüggés.

5.8-ból leolvasható az is, hogy a legvalószínűbb elrendeződés az amikor a lánc mindkét vége az origóban van.

5.2. Térben elhelyezkedő lánc entrópiája

Térbeli elrendeződés esetén a mikroállapotok nehezen definiálhatók. Az entrópiára kapott 5.7 formula azonban egyszerűen általánosítható. Legyen egy N egységből álló lánc egyik vége az origóban, másik pedig a $P(x,y,z)$ pontban. A számítások részletezése nélkül az 5.7. formulával analóg módon a lánc entrópiája

$$S = C - \beta^2(x^2 + y^2 + z^2) \qquad 5.10$$

ahol C egy additív állandó és $\beta^2 = \frac{2}{3N}$ (Az utóbbi összefüggés csak a részletes számításokból határozható meg.) 5.9-cel analóg módon felírható, hogy annak valószínűsége, hogy a láncvég a $P(x,y,z)$ pontba esik

$$p(x,y,z) \sim e^{-\beta^2(x^2+y^2+z^2)} \qquad 5.11$$

Az 5.10 és 5.11 formulák természetesen csak akkor érvényesek, ha

$$\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \ll N$$

(A láncszem-hosszúságot most is egységnyinek tekintjük.)

6. A gumiszál állapotegyenlete

Az előzőekben meghatároztuk egyetlen gumimolekula entrópiáját. Az M molekulából álló gumiszál entrópiája az additivitás miatt az egyes molekulák entrópiájának összege. Az összegezés során azonban figyelembe kell vennünk, hogy a molekulák végpontjai milyen valószínűséggel esnek a $P(x,y,z)$ pontba. Így az egyes molekulák antrópiáit súlyoznunk kell a $p(x,y,z)$ valószínűségekkel. Elegendő nagy N és M esetén az összegezés integrállal helyettesíthető így a gumiszál entrópiáját az

$$S = kM \int_{-\infty}^{\infty} [c - \beta^2(x^2 + y^2 + z^2)]\, c\, e^{-\beta^2(x^2+y^2+z^2)}\, dx\, dy\, dz \qquad 6.1$$

formula adja, ahol c és β állandó értékek, k pedig a Boltzmann állandó.

Nyújtsuk meg most a gumiszálat x irányban α szorosára. Amennyiben a szál térfogata változatlan marad, akkor az y és z irányú méret α szorosára változik. Ugyanígy változnak az egyes láncok végpontjainak koordinátái is, míg a valószínűségeloszlás az eredeti marad.

Nyújtott állapotban tehát a szál entrópiája az

$$S_{ny} = kM \int_{-\infty}^{\infty} \left[c - \beta^2\left(\alpha^2 x^2 + \frac{y^2}{\alpha} + \frac{z^2}{\alpha}\right)\right] c\, e^{-\beta^2(x^2+y^2+z^2)}\, dx\, dy\, dz \qquad 6.2$$

kifejezéssel határozhatjuk meg.

6.1 és 6.2 segítségével kiszámítható a gumiszál entrópiájának csökkenése a nyújtás során. A részletes számítások szerint [1]

$$\Delta S = -\frac{1}{2} kM \left(\alpha^2 + \frac{2}{\alpha} - 3\right) \qquad 6.3$$

Írjuk fel most a termodinamika I. és II. főtételének egyesített alakját a

$$TdS = dU - đ\alpha \qquad 6.4$$

formában.

Előző feltételezéseink szerint a nyújtás T = állandó és V = állandó feltételek között történt. A nyújtás során az atomtávolságok nem változtak, csak a láncmolekulák elrendeződése lett más, így $dU = 0$. A

$$đ\alpha = f\, dl \qquad 6.5$$

feszítési munka tehát mintegy a gumi entrópiájának csökkentésére fordítódik. 6.5 felhasználásával a főtételből a

$$T\,\Delta S = -\int_0^{\Delta l} f\, dl \qquad 6.6$$

összefüggés adódik ahonnan

$$f = -T\left(\frac{\partial(\Delta S)}{\partial l}\right)_{T,V} \qquad 6.7$$

Mivel $l = \alpha l_0$ 6.7 és 6.3 felhasználásával kapjuk, hogy

$$f = \frac{kMT}{l_0}\left(\alpha - \frac{1}{\alpha^2}\right) \qquad 6.8$$

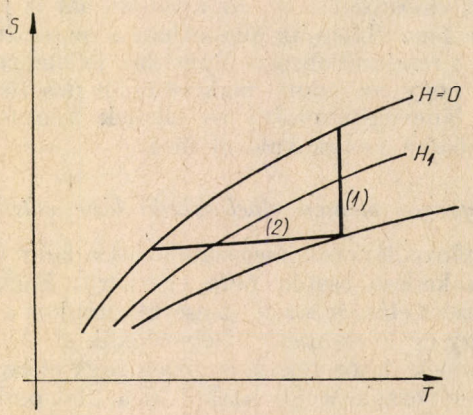
6.8 a gumi állapotegyenlete, amiből azonnal látható hogy az erőhatás nem arányos a megnyúlással, tehát a Hooke törvény nem érvényes.

7. A kísérleti tapasztalatok magyarázata

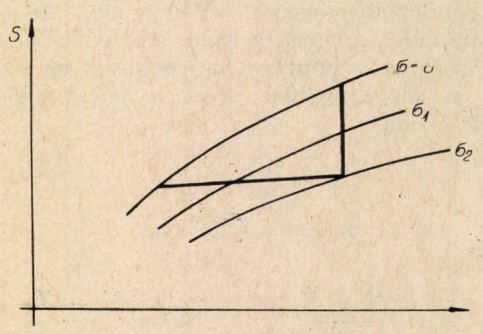
A számítások részletezése nélkül, pusztán a mikroállapotok megszámlálásából látható, hogy nyújtáskor a gumiszál entrópiája csökken. Mivel a belső energia nem változik, az entrópia csökkentéséhez munkavégzésre van szükség.

A láncmodell alapján az adiabatikus nyújtás során bekövetkező hőmérsékletemelkedés már nehezebben magyarázható. Az entrópia kifejezésekor feltételeztük, hogy a hőmérséklet állandó, így pusztán a térbeli rendezetlenséget határoztuk meg.

A gumiszál adiabatikus nyújtásakor a térbeli rendezetlenség csökken, így a befektetett munkán kívül még $T\Delta S_k$ hőmennyiség is felszabadul. ΔS_k-val a térbeli rendezetlenség csökkenése miatt bekövetkezett entrópiaváltozást jelöl-



8.1 ábra



8.2 ábra

tük. (Az entrópiának a térbeli rendezetlenségből adódó részét szokás konfigurációs entrópiának is nevezni.) Amennyiben a $T\Delta S_k$ hőmennyiséget nem vezetjük el, akkor a gumiszál belső energiája megnövekszik és a gumi felmelegszik. A melegedés során azonban megnő a gumi impulzusbeli rendezetlensége, s ezáltal az entrópia teljes megváltozása zérussá válik.

8. Egy érdekes analógia

Befejezésül az adiabatikus lemágnesezést és a gumi adiabatikus lehűlését hasonlítjuk össze.

Az 1 K° körüli hőmérsékleteket paramágneses anyagok adiabatikus hűtésével valósítják meg.

A mágneses anyagok esetén az elemi mágneses momentumok különböző beállásai miatt az anyag rendezetlensége egy adott állapotban igen nagy lehet, azaz a mágneses momentumok rendezetlensége miatt is megjelenik egy entrópia tag.

Ha mágneses tér segítségével a momentumokat rendezzük, az anyag entrópiája csökken. Ugyancsak csökken az entrópia a hőmérséklet csökkenésével is. (8.1 ábra) Amennyiben a mágneses teret izotermikus körülmények között kapcsoljuk be, akkor a 8.1 ábrán látható 1-es folyamat játszódik le, s a paramágneses só entrópiája csökken. A mágneses tér adiabatikus megszüntetésekor a mágneses momentumok rendszerének entrópiája megnő. Ez azonban csak akkor lehetséges, ha a molekulák rendezetlen mozgása csökken, így az anyag lehűl.

A 8.2 ábrán látható módon teljesen hasonló folyamatot hajthatunk végre a gumival is. A mágneses tér megfelelője itt az f feszítőerő, melynek hatására a térbeli rendezetlenség és ezzel a konfigurációs entrópia csökken. A feszültség adiabatikus megszüntetésének hatására a gumi hőmérséklete lecsökken.

IRODALOMJEGYZÉK

1. *Dr. Szőke Péter:* Polimerek fizikai kémiája I. Mérnök Továbbképző Intézet kiadványa Ve. 53 Tankönyvkiadó 1964.
2. *Patrick Meares:* Polymers Structure and Bulk Properties Van Nostrand London 1965.
3. *Ch Kittel:* Bevezetés a Szilárdtest Fizikába Műszaki Könyvkiadó, Budapest 1966.
4. *J. Ogborn:* Law Two Atoms in the School 82—112. R. Eötvös Phys. Soc. and Comittee for Training of the Federation of Technical and Scientific Sciences
5. *F. Károlyházy:* Botzmann-Distribution and Increases of Entropy on an Elementary Level. Atom in the School 112—120. R. Eötvös Phys. Soc. and Comitee for Training of the Federation of Technical and Scientific Sciences

A MÁSODIK FŐTÉTEL: KRISTÁLY-MODELL

Akadémiai Természettudományos Oktatási Munkaközösség

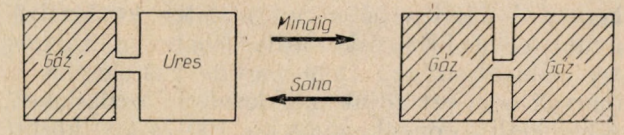
1. Egyirányú folyamatok

Tapasztalati tény, hogy bizonyos folyamatok mindig csak egy irányban mehetnek végbe, a fordított folyamatot soha nem látjuk. A vízbe cseppentett tinta megfesti az egész folyadékmennyiséget, de halványan tintás víz soha nem válik szét tiszta vízre és egy csepp tömény tintára. Egy gyufaszál elégése természetes dolog, de ha a folyamatot filmre vesszük és visszafelé vetítjük le, rögtön kitűnik a „csalás". Hasonló egyirányú, megfordíthatatlan (idegen szóval irreverzibilis) folyamat a cukor oldódása a teában, a jég olvadása egy pohár langyos limonádéban, egy léggömb kipukkadása, a vas rozsdásodása, vagy éppen az élőlények öregedése. Mi szabja meg, hogy egy folyamat melyik irányba mehet végbe? Honnan „tudja" az energia, hogy egy meleg és egy hideg test összeérintésekor mindig csak a hidegebb felé terjedhet és sohasem visszafelé? Meg lehet ezt érteni valamilyen szemléletes modell alapján, vagy pedig el kell fogadnunk, mint alapvető természettörvényt?

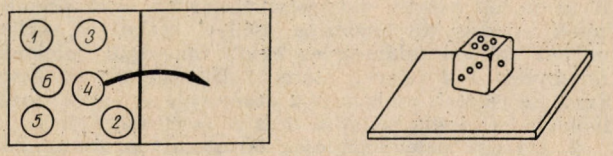
Hívjuk segítségül az anyag golyómodelljét! Próbáljuk megérteni azt a jelenséget, hogy egy üres és gázzal töltött palack összekapcsolása után a gáz egyenletesen szétterjed mindkét palackban, viszont a gáz magától soha nem megy át teljes egészében a palack egyik felébe.

Csináljunk egy modellt erről a jelenségről! Vegyünk hat kis papírkorongot és számozzuk meg ezeket 1-től 6-ig! Rajzoljunk két téglalapot és helyezzük el a korongokat a baloldali területen (2. ábra). Vegyünk egy dobókockát és játsszuk a következő játékot: Dobjunk a kockával sokszor egymás után! Minden egyes dobás után a kockán látható pontszámnak megfelelő számú korongot tegyük át a másik területre, és jegyezzük fel, hogy hány korong van éppen a baloldali területen!

A korongok modellezik a gáz atomjait, a két téglalap a két gáztartályt, a kockadobás pedig gondoskodik róla, hogy az egyes „molekulák" véletlenszerűen kerülhessenek át az egyik palack-



1. ábra



2. ábra

ból a másikba. Az első dobás után biztosan 5 korong marad a baloldalon.

Mondjuk a 4-es korong kerül át a jobboldalra. Ezután két lehetőség van. Vagy 4-est dobunk újra, és akkor visszaáll az eredeti állapot, vagy 1, 2, 3, 5, 6 bármelyikét, és ekkor már csak 4 korong marad a baloldalon. A sűrűbb helyről tehát sokkal (ötször) nagyobb valószínűséggel kerül át „molekula" a ritkább helyre, mint fordítva, de az utóbbi sem lehetetlen.

Végezzünk kb. 50 dobást és ábrázoljuk grafikonon a baloldalon található golyók számát a dobásszám függvényében! Mi a következő számsorozatot kaptuk:

6 5454545432 3212345454 3434345434
3212123454 5454323434

Mit olvashatunk le erről a grafikonról? A baloldalon található részecskék száma 2 és 4 körül ingadozott, de ettől erősen el is tért, 50 dobás alatt összesen 13 esetben volt 5—1 vagy 1—5 a korongok szétosztása, de véletlenül úgy adódott, hogy az utolsó korong sosem került a többi 5 mellé. Ha többen is végigjátsszák ezt a játékot, előbb-utóbb biztos lesz valaki, akinél mind a 6 korong visszakerül az eredeti oldalra, vagy éppen valamennyi átkerül a túloldalra. Az ilyen eset azonban viszonylag ritka. Sokkal többször lesz az eloszlás 3—3, 2—4 vagy 4—2. Számoljuk össze, hányszor láttunk 6 korongot a baloldalon (N_6), hányszor 5-öt (N_5), stb. és mérjük fel ezeket a számokat egységnyi alapú téglalapok magasságaként (4. ábra)! Ezzel tulajdonképpen egy függvényt ábrázolunk (N_i-t i függvényében, $i = 0,1,2,3,4,5,6$). Áttekinthetőbb az ábra, ha egész i-knél fekvő pontok helyett téglalapokat rajzolunk. Ezt az ábrát eloszlásfüggvénynek vagy eloszlásdiagramnak nevezik. Leolvasható róla az egyes eloszlások gyakorisága. Pl. $N_3 = 12$ azt jelenti, hogy 51 eloszlásból 12-szer volt a baloldalon 3 korong. Azt, hogy melyik három korong volt ott, persze nem tudjuk a diagramból kiolvasni, de az számunkra nem is lényeges. Látjuk, hogy ebben a kísérletben N_3 és N_4 értéke a legnagyobb, de az ingadozások (fluktuációk) elég nagyok. Az egyenlő vagy nagyjából egyenlő eloszlás mindenképpen gyakoribb volt a nagyon egyenlőtlen eloszlásnál. Bár a korongok *ugyanolyan valószínűséggel* ugranak jobbról balra, mint balról jobbra, mégis 5—1-es eloszlásnál ötször nagyobb esélye van a 4—2-es eloszlás kialakulásának, mint a 6—0-nak. Ennek nyilván az az oka, hogy az előbbi *többféleképpen* jöhet létre, az utóbbi pedig csak egy megadott szám dobása esetén.

Ha a korongok (atomok) számát növeljük, az ingadozások csökkennek. 300 korongot véve olyan kicsi esélye van annak, hogy mind a 300 korong az egyik féltérbe kerül, mint annak, hogy tíz héten keresztül minden héten telitalálatos lottószelvényünk legyen! Ez gyakorlatilag lehetetlen! Ugyanígy „lehetetlen" az 1—299, vagy 2—298 eloszlás is, (hacsak nem ezt adjuk meg kezdeti eloszlásként). A baloldali korongok száma kb. 100 és 200 között ingadozik.

1. Számoljuk össze, hányféleképpen helyezkedhet el N atom két tartály valamelyikében! Ha ezen elrendezések mindegyike egyforma eséllyel alakul ki, akkor milyen eséllyel találunk az egyik (mondjuk baloldali) tartályban 1, 2 vagy 3 atomot? Hasonlítsuk ezt össze azzal az esettel, amikor $N/2$ atom van az egyes tartályokban! (Nézzük pl. $N = 6$ és $N = 60$ eseteket!)

2. Ha egy palackban csak 60 atom van és minden másodpercben megvizsgáljuk az atomok elhelyezkedését, kb. mennyi ideig kellene várnunk, hogy valamennyi atomot a palack egyik felében találjuk! Hasonlítsuk össze ezt az időt az Univerzum 10^{10} évre becsült korával!

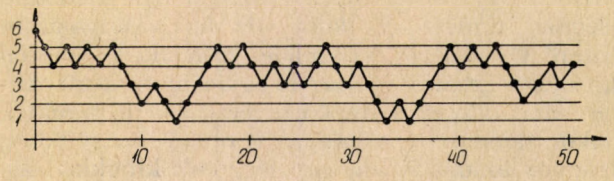
2. Az energia eloszlása az atomok között

Az előző fejezet alapján értjük már, hogy miért keveredik a tinta a vízzel, vagy hogy miért oszlik el a gáz egyenletesen egy tartály részei között, illetve miért nem mennek végbe ezek a folyamatok visszafelé. Nem azért egyirányúak ezek a folyamatok, mert valamilyen tudatos irányítottság rejlik az atomok mozgásában. Éppen ellenkezőleg: *az egyes atomi folyamatok egyforma gyakran mennek végbe mindkét irányba, de a folyamatok igen nagy számából következő* (lényegében matematikai jelleggű) *statisztikai törvények hoznak egy új vonást a természeti folyamatok lefolyásába. A természetben megfigyelt folyamatok nagyon sokféleképpen mehetnek végbe. A természetben az a változás fog megvalósulni, amelyet az atomok-molekulák legtöbbféle módon idézhetnek elő. Az ellentétes irányú folyamat olyan valószínűtlen, hogy gyakorlatilag lehetetlen. Ezt a tényt fejezi ki a termodinamika második főtétele.*

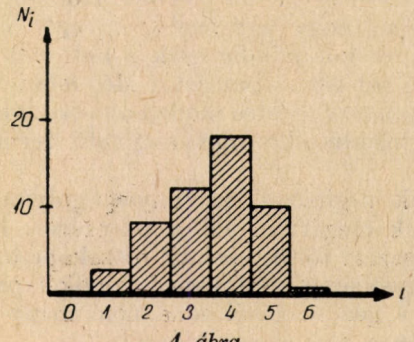
Meg lehet-e magyarázni a fentiekhez hasonló gondolatmenettel azt a tapasztalati tényt is, hogy *hőcserénél az energia mindig a melegebb testből áramlik a hidegebb felé, és sosem fordítva?* Az előzőhöz hasonló, de kicsit bonyolultabb játékot kell játszanunk.

Egy szilárd anyag atomjait (ionjait, molekuláit) kis golyókkal modellezhetjük. A golyók a környező golyókhoz rugókkal kapcsolódnak (5. ábra). Ez meglehetősen bonyolult modell: ha valamelyik „atom" rezgésbe jön, mozgásba hozza a környezetét, amely további „atomok" rezgését eredményezi.

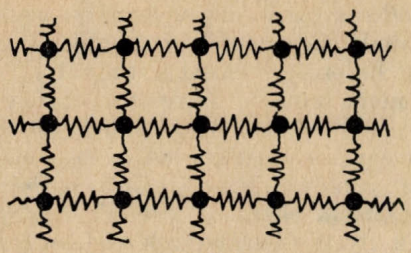
Einstein egyszerűbb modellt javasolt. Azt mondta, hogy tekintsük a kristályt merev cellákból álló rendszernek. Minden cella közepén egyetlen atom található, amely egyensúlyi helyzete körül harmonikus rezgőmozgással rezgéseket végezhet, füg-



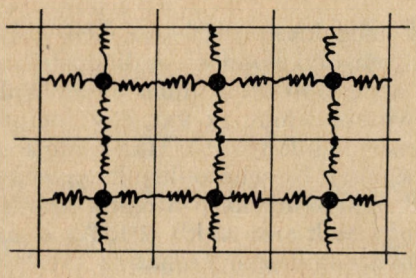
3. ábra



4. ábra



5. ábra

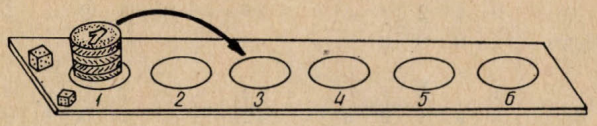


6. ábra

getlenül a többi atomtól (6. ábra). Ez azonban már túlságosan leegyszerűsített modell, hiszen ebben a modellben egyetlen atomot megrezgetve, ez nem tudna energiát átadni a többieknek. Egy valódi kristályban nem ez a helyzet. A tapasztalat szerint az energia önként szétoszlik az egész kristályban (hővezetés), enélkül nem alakulhatna ki hőmérsékleti egyensúly az anyag részei között. Einstein modelljének következő kiegészítését javasolta: Legyenek a cellafalak nagyon kicsit rugalmasak. Ilyen falak bármelyik atom energiáját bármelyik másikhoz tudják továbbítani, de elég merevek ahhoz, hogy az egyes atomok a rezgésük során ne érezzék közvetlen szomszédjaik befolyását. (Nem állítjuk, hogy az igazi kristályok pontosan ilyen tulajdonságúak. Ez a modell nagyon sok szempontból hiányos, de bizonyos jelenségeket jól ír le. A modellből leolvasható következtetések egy része átvihető sok elemből felépített bonyolultabb modellekre is.)

Az egyes atomok mozgása x, y és z tengelyek menti mozgásokból tehető össze. Az energia a háromféle mozgás energiájának összegeként kapható meg. Mivel a három tengely egyenértékű, elegendő csak az egyik (mondjuk az x tengely menti) mozgással foglalkoznunk; a másik kettőt csak a számolás végén vesszük majd figyelembe.

Van N darab atomunk, mindegyik rendelkezik valamennyi energiával. Véletlenszerűen bármelyik átadhatja energiáját, vagy energiájának egy részét valamelyik másik atomnak. (Nyilván hasonlóan modellezhető a gázmolekulák közt is az energiaátadás.) Az egyszerűség kedvéért ne engedjünk meg akármekkora energia-cserét, hanem csak valamekkora elemi energiaadag („kvantum") egészszámú többszörösét. Így könnyű összeszámolni az egyes atomok energiáját. (A kvantummechanikában látni fogjuk, hogy az egyes atomok között valóban véges adagokban történik az energiaátadás.)

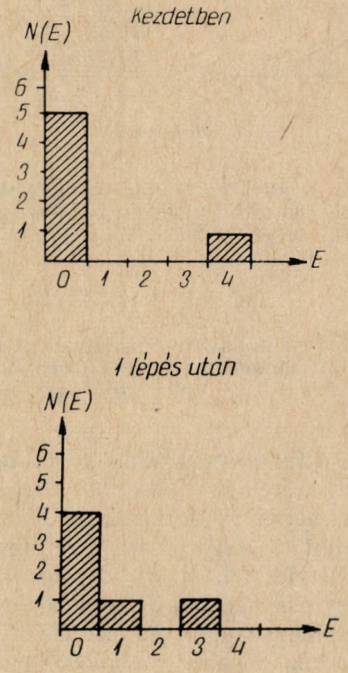


7. ábra

Kezdjük a játékot! Rajzoljunk 6 kört és számozzuk meg ezeket 1-től 6-ig! Ezek jelentik az egyes atomokat. Helyezzünk el a körökben tetszés szerint valamennyi (mondjuk 4) pénzdarabot, ezek jelentik az energiaadagokat. Természetesen egy atom több energiaadaggal is rendelkezhet. Rakjuk például mind a 4 pénzt az 1-es körbe (7. ábra).

Vegyünk ezután egy dobókockát! Ezzel fogjuk eldönteni, hogy melyik atom ad át energiát (első dobás) melyiknek (második dobás). Ha van kétféle dobókockánk, dobhatunk egyszerre és megállapodás szerint pl. a fehér kocka által mutatott számú helyről teszünk át egy pénzdarabot a fekete kocka által mutatott helyre. Természetesen, ha olyan helyről kellene elvennünk pénzt (energiát), ahol nincsen, akkor nem tehetünk semmit, újra kell dobnunk.

Az első lépés csak az lehet, hogy az 1-es helyről átkerül egy pénz a 2,3,4,5,6 valamelyikére, mondjuk a 3. helyre. Ábrázoljuk ezt egy eloszlásdiagramon! Rajzoljuk le a 4. ábránál alkalmazott téglalap-diagramhoz hasonlóan, hogy hány helyen van 0 energia, hány atom rendelkezik



8. ábra

1 energiaadaggal, és így tovább. A kezdeti eloszlást jellemezhetjük az (5,0,0,0,1) számsorral, ami 5 db nulla és 1 db. négyenergiájú atomot jelent. Ez az eloszlás (8a. ábra) az első lépés után átmegy a 8b. eloszlásba, melyet a (4,1,0,1,0) számsor ír le.

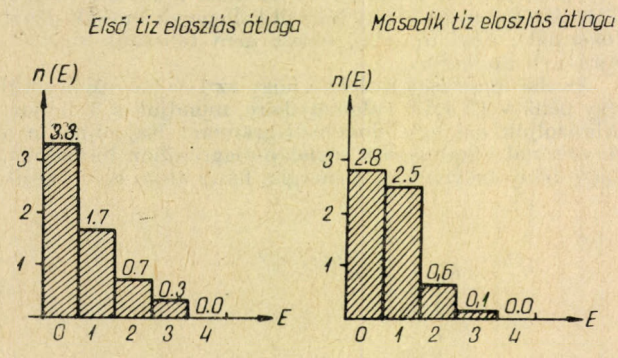
A második lépés után kialakulhat ismét (5,0,0,0,1), ha éppen hármast és egyest dobunk. Ha viszont egyest és bármit dobunk, akkor (3,2,1,0,0) vagy esetleg (4,0,2,0,0) alakul ki.

Egy tanuló ebben a kísérletben 50 energia-átadást hozott létre, közben a rendszer az alábbi állapotokon ment keresztül:

k ⟶	0	1	2	3	4
lépés ↓	5	0	0	0	1
1.	4	1	0	1	0
2.	3	2	1	0	0
3.	3	2	1	0	0
4.	3	2	1	0	0
5.	3	2	1	0	0
6.	4	1	0	1	0
7.	4	1	0	1	0
8.	3	2	1	0	0
9.	3	2	1	0	0
10.	3	2	1	0	0

k ⟶	0	1	2	3	4
lépés ↓					
11.	3	2	1	0	0
12.	4	1	0	1	0
13.	3	2	1	0	0
14.	3	2	1	0	0
15.	3	2	1	0	0
16.	2	4	0	0	0
17.	3	2	1	0	0
18	3	2	1	0	0
19.	2	4	0	0	0
20.	2	4	0	0	0
21.	3	2	1	0	0
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.

Ennek megfelelően ő a 9. ábrán mutatott eloszlásdiagramokat rajzolta fel.



9. ábra

Hány atom rendelkezett nulla energiával? Az első tíz lépés során 3-szor fordult elő, hogy 4-es szám állt az 0 oszlopában, 7-szer pedig 3-as szám. *Átlagosan* tehát

$$\frac{3 \cdot 4 + 7 \cdot 3}{10} = \frac{33}{10} = 3{,}3$$

atom rendelkezett nulla energiaadaggal az első tíz lépés során. Hasonló számolással az első ötven eloszlás átlaga: $n(0) = 3{,}2$; $n(1) = 1{,}8$; $n(2) = 0{,}7$; $n(3) = 0{,}2$; $n(4) = 0{,}02$.

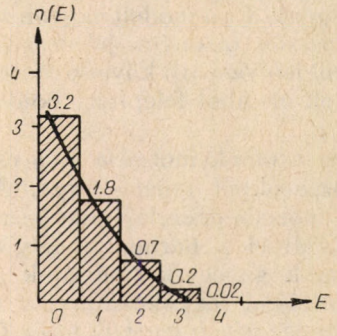
Már az első tíz energiatádás elég volt arra, hogy a ,,kristály'' ,,elfelejtse'' kezdeti állapotát, hiszen sokkal több atom rendelkezik 1, illetve 2 kvantummal, mint 3 vagy 4-gyel. A diagramon az átlagot tüntettük fel, pl. a 3 kvantumnál 0,3 azt jelenti, hogy tíz esetből háromszor rendelkezett atom 3 energiaegységgel. Az első tíz állapot átlaga a következő tíz lépésben ha jellegében nem is, de számértékre jelentősen változott. Ez vagy arra utal, hogy még nem állt be az egyensúlyi eloszlás, vagy arra, hogy nagyok az ingadozások. Az 50 lépés átlaga az utóbbit erősíti meg, hiszen ez újra az első tíz átlagához hasonlít.

A játék során egy másik tanuló *másféle kezdeti feltételből* indult ki, pl. a (2,4,0,0,0) eloszlásból; egyesével szétrakta a pénzeket. A kezdeti eloszlásra nyilván nagyon ,,emlékező'' első néhány állapotot kihagyva 50 lépésre átlagolva ő is majdnem pontosan a 10. ábrán látható eloszlást kapta.

Ez annyit jelent, hogy *a kristály bármely kezdeti állapotból ugyanolyan energia-eloszlású egyensúlyi végállapotba megy át.* Az egyensúlyi végállapotból viszont csak nagyon ritkán tolódik el az eloszlás a kezdeti különleges eloszlás irányába. Az energia önként nem szívesen összpontosul egy atomra. A leírt példában 50 energiaátadás során csupán egyetlen egyszer került mind a négy energiaadag ugyanarra a helyre. Ha négy helyett több energiaadagot osztunk el, és az atomok száma is nagy, akkor az ilyen visszatérések esélye hihetetlenül kicsivé válik, ezek gyakorlatilag lehetetlen események.

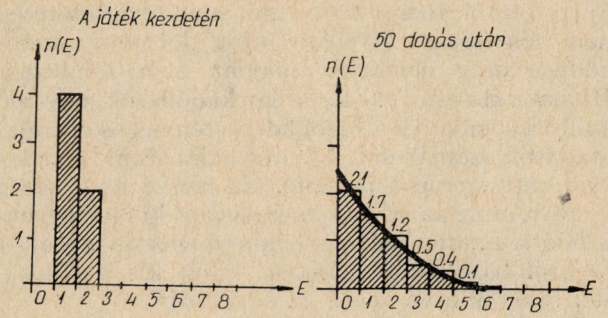
Nézzük meg kicsit részletesebben a 10. ábrán látható egyensúlyi eloszlást. A diagram azt mutatja, hogy a legtöbb atom nulla energiával rendelkezik, kevesebb atomnak van egy energiaadagja, még kevesebbnek kettő stb. Ha az adott energiájú atomok számát összehasonlítjuk az eggyel több energiaadaggal rendelkező atomok számával, azt látjuk, hogy ezek aránya kb. 2:1. Az E energiával rendelkező atomok száma tehát az $N(E) = N(0) \cdot 2^{-E}$ függvénnyel közelíthető. (Az E energiát akkora egységekben mértük, amekkora egy energiaadag, tehát E éppen az energiaadagok száma. Ha más egységekben egyetlen energiaadag ε nagyságú, akkor $N(E) = N(0) \cdot 2^{-E/\varepsilon}$.

Kezdjük most újra a játékot több (mondjuk 8) energiaadaggal! Amíg az előbb 6 helyre összesen 4, azaz atomonként egynél kevesebb energiaadag jutott, most jónéhány atomra egynél több energiaadag jut. Ha egyenletesen osztanánk szét az energiát, akkor az eloszlás-diagram az 1, illetve 2 kvantummal rendelkező atomok túlsúlyát mutatná pl. a nulla energiájú atomok számához képest. Vajon a Természet is ezt az utat követi? Induljunk ki az egyenletes (0,4,2,0,0,0,0,0,0) eloszlásból (a hat atomból négynek 1—1, a többinek 2—2 energiakvantum jut), és hagyjuk, hogy az energia



10. ábra

a véletlenszerű kockadobások utasításainak megfelelően osztódjon szét az egyes atomok közt. Különösen tanulságos a játék, ha minden tanuló más önkényes energiaeloszlással indul, majd 50 dobás után az egyes tanulók kristálytábláján kialakult energiaeloszlásokat hasonlítjuk össze, azok átlagát képezzük. Azt a meglepő eredményt kapjuk, hogy ismét a nulla energiaadag a leggyakoribb, annak ellenére, hogy bőven jutna egy energiaadag minden atomra. Az eloszlás ismét egy exponenciális függvénnyel közelíthető. Mivel azon-



11. ábra

ban két egymás melletti oszlop magasságának aránya nem 2:1, hanem csak kb. 1,4:1, így az E energiájú atomok száma

$$N(E) = N(o) \cdot 2^{-cE}.$$

$N(0)$ a nulla energiájú atomok számát adja meg, a c állandót meg úgy kell megválasztanunk, hogy E egységnyi változására az eloszlásfüggvény $2^{-c} \approx$ $\approx 1/1{,}4$-szeresére csökkenjen. Logaritmustáblázat segítségével jelen esetben $c = \lg 1{,}4/\lg 2{,}0 \approx 0{,}5$. Általában az eloszlásfüggvényt jól jellemezhetjük az $N(0)$ és c paraméterekkel. Ezeket viszont az határozza meg, hogy összesen hány (N) atomból áll a rendszer, és hogy mekkora a rendelkezésre álló összes E energia. Ha ugyanannyi atom közt több energiát osztunk szét, az exponenciális eloszlásfüggvény kevésbé meredeken csökken, vagyis c számértéke kisebb lesz. (Ha sok az energia, egyensúlyban megnő a több energiával rendelkező atomok száma.) Ha viszont kevés az összenergia, akkor c nagy és az eloszlásfüggvény meredeken esik. (Kevés atom rendelkezik több energiával.)

Mi az oka annak, hogy bármilyen E értéknél többször találunk egy atomot nulla energiájú állapotban, mint pl. egy energiakvantumos gerjesztett állapotában? Miért nem az átlagos energiájú gerjesztéshez (az előző példában 8/6-hoz) legközelebb eső egész szám a legvalószínűbb energiatartalom egy atom számára?

A kockadobásos energia-cserék közben megfigyelhettük, hogy bizonyos eloszlásoknál — annak ellenére, hogy energiacsere történt — az eloszlásdiagram több lépésen keresztül nem változott. Erre akkor van lehetőség, amikor az adott eloszlás többféleképpen is létrejöhet. *Minél több lehetőség* van egy adott állapot kialakulására, *annál valószínűbb* ez az állapot. Az olyan állapot, amelyik csak egyféleképpen valósulhat meg, biztosan csak egy dobás idejéig „élhet"; az első energiacsere szükségképpen elrontja. Ha viszont valamelyik eloszlás nagyon sok különböző atomi energiaelrendeződésből egyaránt kialakulhat, akkor ezzel az állapottal nagyon sokszor találkozunk a kristály „élettörténete" során. Ezért az átlagos eloszlásban sokkal nagyobb súllyal szerepel a gyakori eloszlás, mint a ritka eloszlások. *Azt a számot, amely megmutatja, hogy egy adott eloszlás* (makroállapot) *hányféle különböző atomi energiaszétosztásból* (mikroállapotból) *alakulhat ki, az eloszlás termodinamikai valószínűségének nevezzük, és W-vel jelöljük.*

Ugyanannyi atom között több energiát nyilván többféleképpen oszthatunk el, mint kevesebb energiát. Ha N atom közt q db energiaadagot osztunk szét, és egy kiszemelt atomnak 0 energiája van, akkor az annyiféleképpen valósulhat meg, ahányféleképpen q energia szétoszthatható a többi $N-1$ atom közt. Ha a kiszemelt atomnak 1 adag energiája van, akkor a többi $N-1$ között csak $q-1$-t oszthatunk szét. Ezt nyilván kevesebbféleképpen tehetjük meg, mint az előbb, amikor eggyel több energiaadagot osztottunk szét. Az atom 1 energiaadagos gerjesztésének termodinamikai valószínűsége tehát kisebb, mint a nulla energiájú alapállapoté, az utóbbiakkal tehát gyakrabban találkozunk. Ezért van az, hogy átlagosan többször találunk nulla energiával atomokat, mint 1 energiaadaggal. A kétadagos atomok száma még kevesebb, hiszen akkor a szétosztandó maradék már csak $q-2$, és így tovább. Az eloszlásdiagramnak tehát monoton csökkenő függvénynek kell lennie. Bebizonyítható, hogy *ha N és q nagyon nagy számok (a valóságban 10^{23} nagyságrendűek!), akkor az eloszlásfüggvény valóban az exponenciális függvényt közelíti, méghozzá annál pontosabban, minél nagyobb N és q.*

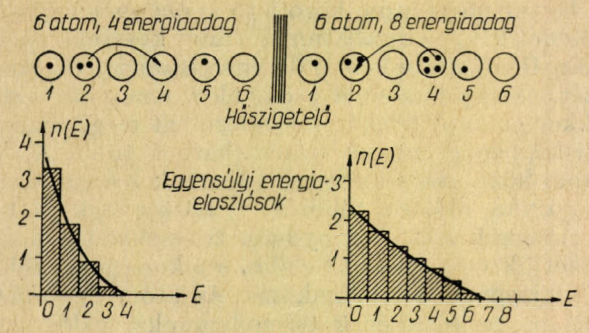
Lényeges-e, hogy az exponenciális függvény alapjául 2-t választunk? Milyen más szám választható alapnak? Írjuk fel a 2^{-cE} kifejezést 3, majd 4 hatványaként! Miben különbözik az így kapott függvény az eredetitől?

3. A hőmérséklet

Az előző fejezetben leírt modell megmutatta, hogyan alakul ki egy anyag egyensúlyi állapota. *Bármilyen legyen is a kezdeti feltétel, kellő idő után a sok molekulából összetett rendszer a nagyszámú energiacsere statisztikai törvénye értelmében „elfelejti" a kezdeti állapotát, és egy dinamikus egyensúly alakul ki. Ezen egyensúly körül bizonyos ingadozásokat figyelhetünk meg, ezek szerepe azonban elhanyagolható, ha az anyagi test elég sok molekulából áll.* Az egyensúlyi eloszlás exponenciális függvény, melynek c csökkenési ütemét a rendelkezésre álló összes energia és az osztozkodásban résztvevő atomok száma szabja meg.

Hogyan magyarázható az a jelenség, hogy két különböző hőmérsékletű test összeérintése után mindig a melegebb test hül le, és sohasem az alacsonyabb hőmérsékletű? *Mi szabja meg az energia áramlásának irányát két rendszer között, ha az egyes energiaadagok egyformán szívesen „ugranak" mindkét irányba?*

Vegyünk két darab, egyenként hat atomot tartalmazó „kristályt"! Adjunk az egyik kristálynak 4, a másiknak 8 energiaadagot. Engedjük meg, hogy egy-egy kristályon belül az energia véletlenszerűen ugráljon ide-oda. Ha a két kristály között hőszigetelő fal van, ez nem engedi, hogy az egyik testből energia jusson át a másikba. Így mindkét testben kialakul egy egyensúlyi energiaeloszlás, ahogy azt az előző fejezetben végigkövethettük. A két rendszerben az átlagenergia különböző, ezért az eloszlásfüggvényekben szereplő c is különböző lesz. Az energiagazdagabb testben c kisebb,



12. ábra

az energiaszegényebb testben pedig nagyobb (12. ábra).

Mi történik, ha eltávolítjuk a hőszigetelő falat, vagyis megengedjük, hogy az energia a 12 atom bármelyikéről bármelyik másikra szabadon átjuthasson? Az eddigiek alapján azt várjuk, hogy most is kialakul egy egyensúlyi eloszlás, amelyben a különböző energiával rendelkező atomok száma monoton (jó közelítéssel exponenciálisan) csökken.

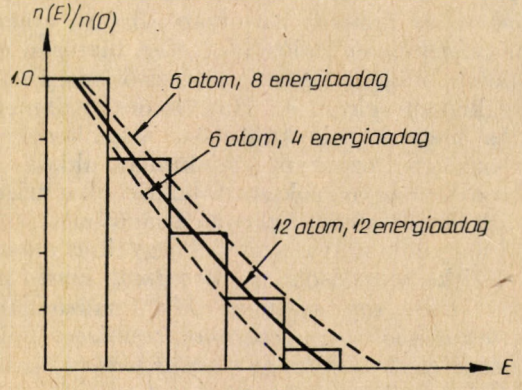
A végül kialakuló együttes eloszlás nem lesz a két elszigetelt eloszlás összege, hiszen két exponenciális függvény összege csak akkor ad újra exponenciálist, ha a kezdeti eloszlások egyforma „esésűek":

$$A \cdot 2^{-cE} + B \cdot 2^{-cE} = (A + B) \cdot 2^{-cE}$$

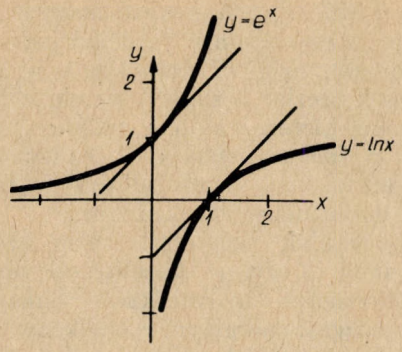
Most azonban nem ez a helyzet!

Mivel 12-oldalú „kockát" nehéz csinálni, ezért legegyszerűbben úgy választhatunk ki véletlenszerűen egyet a 12 atom közül, ha egyszerre egy kockával és egy pénzérmével dobunk. Ha a pénzérme „fejet" ad, a baloldali, ha „írást", a jobboldali 6-os csoportra vonatkozik a kocka pontszáma. Ez az eljárás meglehetősen lassú, részben a 12 lehetőség miatt, részben pedig azért, mert a 12-es energiaeloszlás elrendeződéséhez legalább 100 lépésre kell átlagolnunk. Célszerű a különböző tanulók kísérleteiből adódó eloszlások átlagát képezni. Az így kialakuló energia-eloszlást a 13. ábra mutatja. Hogy jobban össze tudjuk hasonlítani az eloszlásdiagramot a korábbiakkal, mindhármat elosztottuk a nulla energiájú atomok számával. Látható, hogy a kialakult egyensúlyban az eloszlásfüggvény meredekebben csökken, mint a 8-adagos (energiagazdagabb) kezdeti állapot eloszlása, de nem annyira meredek, mint a 4 adagos (energiaszegényebb) eloszlás. Az egyensúlyi eloszlás meredeksége tehát az eredeti elszigetelt meredekségek közé esik. A laposabb eloszlású jobboldali részrendszerben az atomok átlagenergiája a kezdeti 8/6-ról lecsökkent 12/12-re, míg a baloldali részrendszerben 4/6-ról megnőtt 12/12-re. Ez csak úgy lehetséges, hogy *több energia áramlott az energiagazdagabb oldalról az energiaszegényebb felé*, mint fordítva. Hogyan lehetséges ez, amikor a kockadobások egyforma esélyel választották ki az energiacsere irányát a két lehetséges irány közül? A látszólagos ellentmondás magyarázata az, hogy a baloldali részrendszerben többször kellett volna nulla energiájú atomtól energiát elvenni, ami természetesen nem lehetséges. Ilyenkor újra dobtunk, mindaddig, amíg elvehető energiát nem találtunk. Hiába választották ki a kockadobások egyenlő eséllyel a jobb- és a baloldalt, a tényleges energiaátadások számában a jobbról balra irány már kitüntetett szerepet játszott. Ez persze csak addig tartott, amíg az átlagos energiaszint ki nem egyenlítődött. Ezután már ugyanannyi energia áramlott jobbról balra, mint viszont, tehát kis ingadozásoktól eltekintve beállt az egyensúly.

Minden egyensúlyi energiaeloszlást jól jellemez az exponenciális függvény kitevőjében szereplő c paraméter. Ennek nagysága mutatja meg, hogy melyik irányba áramlik energia két — egymással energicserére képes — rendszer között. Az energiaáramlás mindaddig tart, amíg a két rendszer c-je ki nem egyenlítődik. Mindez nagyon emlékeztet a hőmérséklet viselkedésére. A tapintással érezhető és hőmérővel mérhető hőmérséklet is egy olyan jellemzője a termikus egyensúlyban levő rendszereknek, amely önkéntes hőcsere (rendezetlen energiaátadás) során mindig kiegyenlítődik. A hőmérséklet és a c paraméter között egyértelmű, monoton függvénykapcsolatnak kell fennálni, hiszen azonos hőmérsékletű testek közt nincs hőcsere, tehát az őket jellemző c paramétereknek is meg kell egyeznie. A függvénykapcsolat konkrét alakja önkényesen választható, a különböző választások különböző hőmérsékleti skálákat definiálnak. A köznyelv nagyobb hőmérsékletűnek mondja azt a testet, amely a hőt leadja, ennek viszont kisebb c felel meg. A legegyszerűbb választás $c = 1/T$ lenne. Mivel az exponenciális függvény kitevőjében dimenziótlan számnak kell állnia, ez annak felelne meg, hogy a hőmérsékletet energiaegységekben mérjük. Ez egy nagyon jól használható hőmérsékleti skála lenne, a statisztikus fizikában gyakran alkalmazzák. Mivel azonban a hétköznapi életben már kialakult, hogy a hőmérsékletet nem energiában, hanem egy attól független egységben, Kelvin fokban (vagy ami ezzel egyenlő egységű, Celsius fokban) mérjük, c-t csak arányosnak választhatjuk $1/T$-vel. Az arányossági tényező számértéke attól függ, hogy milyen alapú exponenciális függvényt használunk (ld. a 2. fejezet utáni feladatot). Válasszuk alapul azt az e számot,



13. ábra



14. ábra

amelyre teljesül, hogy az $y = e^x$ függvény 45°-ban metszi az y tengelyt!

10^x ennél meredekebb, 2^x pedig laposabb $x = 0$ körül' tehát e egy 2 és 10 közötti szám. Pontosabb számértéke 2,718... Ennek az alapnak az az előnye, hogy ha x kicsi, akkor függvénytáblázat nélkül is kiszámíthatjuk e^x-t hiszen $e^x \approx 1 + x$. Az alábbi kis táblázat mutatja a közelítés pontosságát:

x	e^x
0,1	1,10517
0.05	1.05127
0,01	1,01005

Az inverz függvény $y = \log_e x$. Ezt a függvényt természetes alapú logaritmusnak nevezik és $\ln x$-szel jelölik.

Az e alap választásával

$$c = \frac{1}{KT},$$

így tehát:

$$N(E) = N(0) \cdot e^{-E/KT}.$$

(Itt K később meghatározandó állandó.) Azt, hogy energia az anyagi testet alkotó molekulák közt a fenti módon oszlik el, Ludwig Boltzmann osztrák fizikus (1844—1906) ismerte fel, tiszteletére ezt az eloszlást *Boltzmann-eloszlásnak* nevezik.

Fentebb egy 12 atomból álló kristály energiaeloszlását tanulmányoztuk. Miért nem használhatjuk két kocka által adott pontszámok összegét annak kiválasztására, hogy melyik atom ad le, ill. vesz fel energia-adagot?

4. Az energia egyenletes eloszlása

Felmerül a kérdés: mi köze van a Boltzmann-eloszlás által bevezetett T hőmérsékletnek az ideális gázhőmérővel mért T_i hőmérséklethez? Az utóbbit úgy értelmeztük, hogy

$$pV = NkT_i$$

ahol $k = R/N_A = 1{,}37 \cdot 10^{-23}$ J/K a Boltzmann-állandó (az R gázállandó és N_A Avogadro-szám hányadosa). Mivel a gáztörvény molekuláris értelmezése szerint

$$pV = \frac{2}{3} N\langle E_m \rangle,$$

ahol $E_m = mv^2/2$ a gáz egy molekulájának mozgási energiája, a T_i ideális gázhőmérsékletet úgy tekinthetjük, hogy az lényegében egy molekula rendezetlen mozgásának átlagos energiáját jelenti:

$$\langle E_m \rangle = \frac{1}{2} m \langle v^2 \rangle = \frac{3}{2} kT_i.$$

A gáz molekulája mindhárom térirányben időátlagban egyenlő sebességnégyzettel mozog, így tehát az x-tengely mentén végzett mozgás átlagos energiája

$$\langle E_{mx} \rangle = \frac{1}{2} m \langle v_x^2 \rangle = \frac{1}{2} kT_i. \tag{4.1}$$

Számítsuk ki, mi az átlagos mozgási energia az Einstein-kristályban!

E_0 energiával $N(0)$, $E_1 = \varepsilon$ energiával $N(1) = N(0)e^{-\varepsilon/KT}$, $E_2 = 2\,\varepsilon$ energiával $N(2) = N(0)\,e^{-2\varepsilon/KT}$, $E_3 = 3\,\varepsilon$ energiával $N(3) = N(0).\ e^{-3\varepsilon/KT}$ atom rendelkezik stb. Az összes molekulák száma

$$\begin{aligned} N &= N(0) + N(1) + N(2) + N(3) + \ldots = \\ &= N(0)\,[1 + e^{-\varepsilon/KT} + e^{-2\varepsilon/KT} + e^{-3\varepsilon/KT} + \ldots] = \\ &= N(0)[1 + \alpha + \alpha^2 + \alpha^3 + \ldots], \end{aligned} \tag{4.2}$$

ahol $\alpha = e^{-\varepsilon/KT}$-t jelöli. A szögletes zárójelben egy végtelen mértani sor szerepel, ennek összege zárt képletben felírható:

$$N = \frac{N(0)}{1 - \alpha}. \tag{4.3}$$

Számítsuk ki ezután a kristály teljes energiáját! $N(r)$ atom rendelkezik $E_r = r \cdot \varepsilon$ energiával, tehát

$$\begin{aligned} E &= E_0 N(0) + E_1 N(1) + E_2 N(2) + E_3 N(3) + \ldots = \\ &= \varepsilon\, N(0)[0 + e^{-\varepsilon/KT} + 2\,e^{-2\varepsilon/KT} + 3\,e^{-3\varepsilon/KT} + \ldots] = \\ &= \varepsilon\alpha[N(0)(0 + 1 + 2\,\alpha + 3\,\alpha^2 + \ldots)]. \end{aligned}$$

A szögletes zárójelben álló kifejezés éppen a (4.2)-ben szereplő N-nek α szerint képezett deriváltja. ($\alpha < 1$ esetén a végtelen mértani sor tagonként deriválható.) Így a (4.3) összképlet figyelembevételével

$$E = \varepsilon\alpha \frac{d}{d\alpha}\left[\frac{N(0)}{1 - \alpha}\right] = \varepsilon\alpha \frac{N(0)}{(1 - \alpha)^2},$$

azaz (4.3) felhasználásával

$$E = N \frac{\varepsilon\alpha}{1 - \alpha} = N \frac{\varepsilon}{\alpha^{-1} - 1} = N \frac{\varepsilon}{e^{\varepsilon/KT} - 1}.$$

Most már könnyen kiszámítható az Einstein-kristály egy atomjának átlagos energiája.

$$\langle E_{\text{atom}} \rangle = \frac{E}{N} = \frac{\varepsilon}{e^{\varepsilon/KT} - 1}. \tag{4.4}$$

(Ha N atom között éppen N energia-adagot, tehát $E = N \cdot \varepsilon$ energiát osztunk szét, akkor $e^{\varepsilon/KT}$ éppen 2, ilyenkor az energia eloszlás-diagramján az egymás melletti oszlopok magasságának aránya Boltzmann-eloszlás szerint éppen 2 : 1. Ez azonban csak nagyon nagy E és N mellett igaz, kisebb N esetén ettől eltérő az eloszlás-diagram. A 2. fejezetben láttuk, hogy amikor 6 helyre 4 energia-adagot osztunk szét, a csökkenés üteme akkor is kb. 2:1 volt. Ennek az az oka, hogy modellünk a valódi kristályokhoz képest viszonylag kevés „atomból" épül fel.) Ha az ε energiaadag elég kicsiny, $\varepsilon \ll KT$, akkor $e^x \simeq 1 + x$ közelítés használható:

$$\langle E_{\text{atom}} \rangle = \frac{\varepsilon}{\left(1 + \frac{\varepsilon}{KT} + \ldots - 1\right)} = KT. \tag{4.5}$$

Az Einstein-kristály (egy irányban) rezgő atomjának átlagos energiája KT. Mivel rezgőmozgásnál a helyzeti

és mozgási energia időátlagban megegyezik, egy atom egydimenziós mozgásának átlagos energiája

$$\langle E_{m,x} \rangle = \frac{1}{2} m \langle v^2_x \rangle = \frac{1}{2} KT. \qquad (4.6)$$

Ha egy kristály felülete gázzal érintkezik, akkor az ütközések során a molekulák mozgási energiái kiegyenlítődnek. A kristályt alkotó atomok (molekulák) (4.6) mozgási energiája akkor egyezik meg a gázmolekulák (4.1) mozgási energiájával, ha a Boltzmann-eloszlásban a K állandót a k Boltzmann-állandóval azonosítjuk.

$$N(r) = N(0)\, e^{-E_r/kT}.$$

Ekkor viszont a T Boltzmann-hőmérséklet azonossá válik az ideális gázhőmérővel mért T_i Kelvin-hőmérséklettel, $T = T_i$.

Általános meggondolások azt mutatják, hogy ez általánosabban is igaz: ha *az atomok különféle energiaformákkal rendelkezhetnek (haladó mozgás, forgó mozgás, stb.), akkor a rendszer összenergiája átlagban egyenletesen oszlik el a különböző energiaformák közt és mindegyikre $kT/2$ energia jut.* Ez az egyenletes eloszlás, idegen szóval *ekvipartíció tétele.* Ideális gázban a gömbölyű molekulák (nemesgáz atomok) csak haladó mozgási energiával rendelkeznek. Mivel három különböző (egymásra merőleges) irányban mozoghatnak,

$$\bar{E} = \overline{\frac{1}{2} m v_x^2} + \overline{\frac{1}{2} m v_y^2} + \overline{\frac{1}{2} m v_z^2} = 3 \cdot \frac{1}{2} kT.$$

Az ekvipartíció tételének másik érdekes alkalmazása a szilárd anyagok fajhőjének meghatározása. Móltömegnyi szilárd anyag N_A db atomból áll. ($N_A = 6 \cdot 10^{23}$ az Avogadro-számot jelöli.) Mindegyik atom három egymásra merőleges irányba rezeghet. Mindegyik rezgésre kT energia (mozgási + rugalmas energia) jut, az anyag belső energiája tehát

$$E = 3\, kT\, N_A + E_0.$$

A hőmérsékletet ΔT-vel megnövelve az energia $\Delta E = 3\, kN_A \cdot \Delta T$ értékkel növekszik. Mivel a térfogat állandó, térfogati munka nincs: $\Delta E = Q$. Eszerint valamennyi egyatomos szilárd anyag molhője (vagyis az a Q hőmennyiség, ami moltömegnyi anyag hőmérsékletét 1 °C-kal emeli) azonos, értéke $3\, kN_A = 25$ J/K. Ez a Dulong-Petit szabály, amely a kísérletek szerint jól teljesül. Azt fejezi ki, hogy egy szilárd test hőkapacitása elárulja: hány atomból (vagy molekulából) épül fel a szilárd test, hiszen az energia egyenletes eloszlása miatt a hőkapacitás $3k$ atomonként. Eltérés csak alacsony hőmérsékleten tapasztalható, ahol $kT \lesssim \varepsilon$. Ekkor azonban már nem alkalmazható az $e^{\frac{\varepsilon}{kT}} \approx 1 + \frac{\varepsilon}{kT}$ közelítés. Az

$$E/N = \frac{\varepsilon}{e^{\varepsilon/kT} - 1}$$

képletből leolvashatjuk, hogy egész alacsony hőmérsékleten ($kT \ll \varepsilon$) a nevező nagyon naggyá válik, ezért az egy atomra jutó átlagenergia nagyon kicsi lesz, még kT-vel osztva is nullához tart. Mérések szerint a szilárd testek fajhője alacsony hőmérsékleten valóban csökken és nullához tart. A fizika történetében ez volt az egyik legelső olyan kísérlet, amely felhívta a figyelmet az energia kvantumos viselkedésére.

A gázmolekulák bonyolult belső szerkezetű képződmények. Mégis jó közelítéssel tömegpontoknak tekinthetők, melyek csak haladó (esetleg forgó) mozgási energiával rendelkeznek. A magyarázat az energia kvantumos természetében rejlik. Az a legkisebb energiaadag (energiakvantum), amivel egy molekula belső szerkezete gerjeszthető, még szobahőmérsékleten is sokkal nagyobb, mint kT. Ezért ezek a belső szabadsági fokok nem gerjesztődnek, a molekula úgy mozog, mint egy kemény, megváltoztathatatlan belső szerkezetű golyó.

1. Határozzuk meg az ekvipartíció tétele segítségével az egyatomos-, kétatomos- (súlyzó alakú) és a többatomos molekulákból álló gázok állandó térfogaton vett fajhőjét! Hasonlítsuk össze ezeket a táblázat adataival:

gáz	mc_v/Nk	gáz	mc_v/Nk
Hélium	1,519	NO	2,512
Argon	1,509	Klór	3,02
Hidrogén	2,438	Vízgőz	3,3
Nitrogén	2,448	CO_2	3,38
CO	2,488	CH_4	3,25
Oxigén	2,504	SO_2	3,79

2. Jövő ilyenkor egy osztály diákjai az energia eloszlását fogják tanulmányozni dobókockás modellkísérlettel. Meg tudjuk-e jósolni, hogy elsőnek melyik atom fog energiát leadni és melyik veszi azt fel? Tudunk-e egyáltalán valamit jósolni a játék eredményéről!

3. Gondoljuk el, hogy 6 atom közt 4 energiaadagot osztunk szét és véletlenszerűen 100 000-szer cserélgetjük az energiákat. Meg tudjuk-e becsülni, hogy az egymillió dobás során hányszor rendelkezett a balszélső atom 0,1,2,3 illetve 4 egység energiával?

4. „A hőmérséklet — egységválasztásból eredő számfaktortól eltekintve — az anyag egy szabadsági fokra jutó átlagos energiája." Milyen korlátozással érvényes ez a meghatározás? Mikor nem teljesül az $E = E_0 + fkT/2$ képlet, ahol f a szabadsági fokok száma?

5. A gyémánt mólhője szobahőmérsékleten lényegesen kisebb, mint más szilárd anyagoké. Miért?

5. *A kémiai reakciók sebességének hőmérsékletfüggése*

A Boltzmann-eloszlás ismeretében ki tudjuk számítani, hogy adott T hőmérsékletű anyag belsejében hányszor kevesebb atomnak van E_2 energiája, mint ahány E_1 energiájú atom van ($E_1 < E_2$). Mivel $N(E) = N(0)\, e^{-E/kT}$,

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{N_0\, e^{-E_2/kT}}{N_0\, e^{-E_1/kT}} = e^{-\frac{E_2 - E_1}{kT}} = e^{-\frac{\Delta E}{kT}}.$$

Elegendő tehát az energiák különbségének ismerete, és máris ki tudjuk számítani a Boltzmann-faktornak nevezett arányszámot. Ez a kifejezés jelentős szerepet játszik kémiai (általában atomi) folyamatok sebességének meghatározásánál.

Miért szárad könnyebben a vizes ruha, ha meleg kályha közelében teregetjük ki? „Mert melegben a víz gyorsabban párolog" — mondjuk. Ez igaz is. Számoljuk ki, hogy hányszorosára nő a párolgási sebesség, ha 30°C-ról 70°C-ra melegítjük fel a vizet! Elektromos vízmelegítésnél az elfogyasztott elektromos energia mérésével meghatározhatjuk, hogy 1 mólnyi víz elpárolgatásához $L = 4 \cdot 10^7$ J elektromos munka szükséges. Ennek egy része a vízmolekulák egymástól elszakításához, másik része a levegőmolekulák visszaszorításához szükséges, hiszen a keletkezett vízgőznek helyre van szüksége. (Ez utóbbi miatt L nagyobb, mint a belső energia ΔE változása, a különbség éppen a $p \cdot \Delta V$ tágulási munka.)

Molekulánként $L/N_A = 7 \times 10^{-20}$ J $= 0{,}07$ aJ (attojoule) energiára van szükség a víz párolgásához. Csak azok a molekulák hagyhatják el a folyadékot, amelyek 7×10^{-20} J-nál nagyobb energiával rendelkeznek. Szobahőmérsékleten $kT = 4 \times 10^{-21}$ J, a Boltzmann-faktor kitevője $-L/(N_A kT) \approx 17$. Mivel e^{-17} nagyon kicsiny szám, a víz lassan párolog. A Boltzmann-faktor azonban nagyon érzékenyen változik a hőmérséklettel. Ha csak egy kicsit növeljük a hőmérsékletet, mondjuk 300 K-ről 340 K-re, a kitevő -17-ről -15-re változik. e^{-15} viszont $e^2 \approx 7$-szer nagyobb, mint e^{-17}, a párolgás sebessége tehát 7-szeresére nőtt. A víz párolgásával az eloszlásfüggvény nagyenergiás végéről fogynak a vízmolekulák, a függvény egyre meredebbé válik. Ez összhangban áll azzal a tapasztalattal, hogy a párolgás hűti a folyadékot.

Hogy függ a kémiai reakciók sebessége a hőmérséklettől? A reakciókban csak olyan molekulák vagy atomok vehetnek részt, amelyek egy bizonyos küszöbenergiával — aktivációs energiával — rendelkeznek. A reakció sebessége arányos ezek számával, továbbá a másodpercenkénti ütközések számával. Ha a részecskék mozgási energiája T-vel arányos, akkor a részecskék sebessége és ezzel együtt az ütközések száma $\sqrt{T}$-vel arányos. Azt hihetnénk, hogy az abszolút hőmérsékletet kétszeresére növelve a reakciósebesség másfélszeresére nő, mivel az ütközések száma kb. másfélszeresére nőtt. Ezzel szemben néha néhány fok hőmérséklet-emelés is 2—3-szorosára gyorsítja a reakció sebességét. A lényeges változást ismét a Boltzmann-faktor adja. ΔE aktivációs energiával rendelkező atomok (molekulák) száma $e^{-\Delta E/kT}$-vel arányos. Ha $\Delta E \ll kT$, akkor az nagyon kicsiny szám és T-től nagyon érzékenyen függ. Ha viszont $\Delta E \approx kT$ (robbanásszerű folyamatok), akkor a Boltzmann-faktor 1 nagyságrendű, a hőmérséklet változására a reakciósebesség alig változik.

A víz — mivel a Boltzmann-faktor kitevőjében kb. -16 áll — lassan bár, de párolog. Átlagosan minden tízmilliomodik vízmolekula rendelkezik akkora energiával, amelyik elegendő a párolgáshoz. Ezért az óceánok lassan párolognak és csak ritkán esik az eső. Találunk a Természetben a víznél sokkal szilárdabb anyagokat is. A sziklák évmilliárdokig is megmaradnak anélkül, hogy kémiai reakciókban részt vennének. Miért? A kovalens kötések energiája kb. 10^3 kJ/mol, azaz minden molekulára kb. 2 aJ energia jut. Az E/kT kitevő kb. 400, tehát 10^{170} molekulából csak egy rendelkezik a kötés felszakításához szükséges energiával. Ezért olyan maradandóak a sziklák. Ha az emberi testet is kovalens kötések tartanák össze, akkor mi is ugyanannyira inaktív, változtathatatlan és emiatt hosszú életű képződmények lennénk, mint a kövek. Az élőlényeket olyan kötések tarthatják össze, amelyek sokkal lazábbak, mint a kovalens kötés, de nem nagyon lazák, mert akkor az élet csak egy rövid felvillanás lenne. A hidrogén-kötés éppen megfelelő erősségű. A vízben minden molekulát hidrogénhíd kapcsol a többi molekulához. Egy hidrogénkötésre tehát kb. 3.10^{-20} J energia jut, így a Boltzmann faktor szobahőmérsékleten $E/kT \approx 8$. Ez annyit jelent, hogy minden 4000-ik kötés felszakadhat a hőmozgás miatt. Nem meglepő tehát, hogy az élőlényeket főleg hidrogénkötések tartják össze.

Fontos szerepe van a Boltzmann-faktornak félvezető anyagok vezetőképességének kialakításában. Tranzisztorok vagy félvezető diódák vezetőképessége a ΔE energiafelesleggel rendelkező elektronok számával, ez pedig $e^{-\Delta E/kT}$-vel arányos. Ez magyarázza azt, hogy félvezető anyagok ellenállása nem túl nagy hőmérséklet-változásra nagyságrendeket változhat. Ez egyrészt kellemetlen, mert megköveteli a hőfokstabilizálást, másrészt érzékeny hőmérők (termisztorok) készíthetők félvezetőkből.

1. Kukta-fazékban az ételek 2—3-szor rövidebb idő alatt főnek meg, mint nyitott lábosban. Becsüljük meg ebből az adatból a főzésnél lezajló folyamatok „aktivációs energiáját". (1,6 atm nyomáson a víz 112 °C hőmérsékleten forr.)

2. Egy H-atom gerjesztési energiája 1,6 aJ. Ennél kisebb energiaközlés nem képes megváltoztatni az atom energiaszerkezetét. Szobahőmérsékleten, ill. a Nap 6000° hőmérsékletű légkörében az atomok hányadrésze van gerjesztett állapotban? Milyen korlátok közt megengedett az atomok Dalton-féle merev golyómodelljének használata?

6. Az entrópia bevezetése

Három albán matróznak (A, B, C a nevük) van 21 ezüstpénze. Egy kikötői csapszékben azt játsszák, hogy a 21 pénzérmét hányféleképpen tudják szétosztani egymás között. A lehetséges eloszlások W számát könnyen megkaphatjuk (tábla).

Három bengál matróznak (X, Y, Z a nevük) csak 19 ezüstpénze van. A csapszék másik asztalánál ők is azt játsszák, hogy hány különböző elosztás lehetséges. A két társaság csakhamar összeismerkedik. Nagy fejtörés után rájönnek, hogy az albánok elosztásainak számát ($W_A = 253$) a bengálok elosztásainak számával ($W_B = 210$) megszorozva $W_A \cdot W_B = 253 \cdot 210 = 53\,130$ elosztás lehetséges. Örülnek, hogy ilyen nagy szám!

A bengál matrózok kicsit szomorúak, hogy az ő elosztásszámuk olyan alacsony. Egy albán mat-

A	B	C		X	Y	Z					
0	0	21		0	0	19		0	0	20	
	1	20			1	18			1	19	
	..	..	22 eset		..	..	20 eset		..	..	21 eset
	20	1			18	1			19	1	
	21	0			19	0			20	0	
1	0	20		1	0	18		1	0	19	
	1	19			1	17			1	18	
	..	..	21 eset		..	..	19 eset		..	..	20 eset
	20	0			18	0			19	9	
2	0	19		2	0	17		2	0	18	
	1	18			1	16			1	17	
	..	..	20 eset		..	..	18 eset	..	..	..	19 eset
	19	0			17	0			18	0	
...				...				...			
21	0	0	1 eset	19	0	0	1 eset	20	0	0	1 eset

$W = 22 + 21 + 20 + \ldots + 1 =$
$= 22\frac{22+1}{2} = 253$

21 ezüst elosztásai

$W = 20 + 19 + \ldots + 1 =$
$= 20\frac{20+1}{2} = 210$

19 ezüst elosztásai

$W = 21 + 20 + \ldots + 1 =$
$= 21\frac{21+1}{2} = 231$

20 ezüst elosztásai

róz ezt javasolja: Adjunk egy ezüstöt a bengáloknak! Így a mi elosztásainknak a száma 9%-kal csökken (W_A leesik 253-ról 231-re), de a bengáloké 10%-kal emelkedik (W_B felnő 210-ről 231-re). Meg is teszik, és legnagyobb örömükre felfedezik, hogy az összes elosztások száma most $W_A \cdot W_B = 231 \cdot 231 = 53\,361$, 231-gyel több, mint korábban volt.

A 2. fejeztben szó volt arról, hogy egy eloszlás annál valószínűbb, minél több mikroállapot (atomi elrendeződés) adhatja meg ugyanazt az eloszlást. Egy magára hagyott rendszer kellő idő után önként mindig a legvalószínűbb (legtöbb molekuláris elosztással megvalósítható) állapotba kerül. Ezt az állapotot egyensúlyi állapotnak nevezzük, annak ellenére, hogy a rendszer nem marad pontosan ebben az állapotban, hanem e körül kicsit ingadozik. Az E energia molekulákra történő lehetséges elosztásainak W számát az E energiájú állapot termodinamikai valószínűségének nevezzük.

Mivel a W termodinamikai valószínűség nagyon nagy szám: $10^{(10^{20})}$ nagyságrendű, kényelmesebb, ha a kitevőjét külön elnevezzük valaminek és a továbbiakban ezzel a kitevővel számolunk.

$W = 2^{S*}$ vagy $W = 10^{S**}$.

Különböző alapok választása a kitevőt egy állandó szorzóval változtatja meg. Korábban láttuk, hogy a természetes logaritmus alapszámának, e-nek milyen „kellemes" tulajdonságai vannak. Írjuk fel tehát W-t e valamilyen hatványaként:

$$W = e^{S/k}.$$

Történeti okokból a kitevőt (magában is nagy szám) S/k alakba írtuk, így S már nem lesz nagyon nagy szám. (Ez csupán megállapodás kérdése!) A fenti kifejezésben szereplő S kitevőt *entrópiának* nevezik. Dimenziója ugyanúgy, mint a Boltzmann-állandónak: J/K.

Ha egy rendszer két független részre osztható, és a részrendszerek termodinamikai valószínűsége W_1, illetve W_2, akkor az egész rendszert nyilván $W = W_1 \cdot W_2$ számú mikroállapot valósíthatja meg. Az entrópiával kifejezve:

$$e^{S/k} = e^{S_1/k} \cdot e^{S_2/k} = e^{(S_1+S_2)/k},$$

vagyis a *részrendszerek entrópiája összeadódik.*

A rendszer alapállapota egyértelmű, ilyenkor a termodinamikai valószínűség $W = 1$ (pl. az Einstein modellben egyik atom sem rendelkezik a nyugalmi energián felüli energiával). A megfelelő entrópia:

$$S = k \cdot \ln W = 0,$$

alapállapotban tehát a rendszer entrópiája nulla.

Magárahagyott — de a környezetétől elszigetelt, tehát zárt — rendszer termodinamikai valószínűsége nem csökkenhet. Mivel az exponenciális függvény monoton növekvő függvény, ugyanez érvényes a kitevőre is. *Magára hagyott zárt rendszer entrópiája nem csökkenhet*, az egyensúlyi eloszlásban az entrópia a lehetőségekhez képest maximális: $\Delta S \geq O$ (zárt rendszerre.)

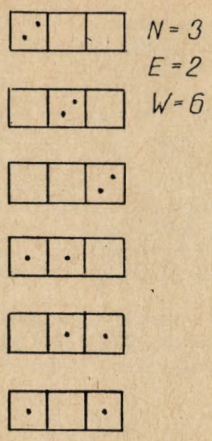
1. N_A db molekulát tartalmazó gáz állandó hőmérsékleten 1 l-ről 2 l-re tágul. Mennyivel nőtt a gáz entrópiája?

2. A gyerekszobában minden játéknak megvan a helye. Magyarázzuk meg, miért az a valószínűbb, hogy nő a rendetlenség a szobában, ha a kisgyermek össze-vissza dobálja a játékait, és miért nem az, hogy a játékok pontosan visszakerülnek a helyükre?

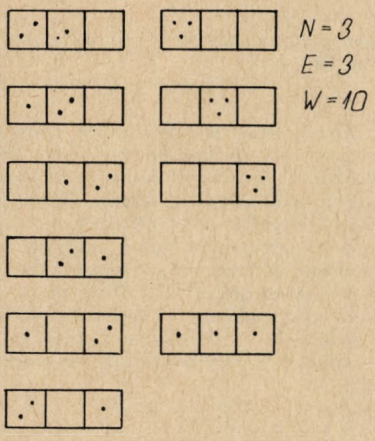
7. *Számítások az entrópiával*

Foglalkozzunk először a termodinamikai valószínűség (és ezzel együtt az entrópia) kiszámításával. Határozzuk meg, N atom között hányféleképpen oszlható el $E = re$ energia, azaz r számú energiaadag! Ha pl. $N = 3$ és $r = 2$, akkor 6 lehetőségünk van (15. ábra); ha viszont hozzáadunk még egy energiakvantumot ($r = 3$), akkor a lehetőségek száma már 10-re nő (16. ábra). W és S értéke E növelésével rohamosan növekszik. Számítsuk ki ezt a növekvést!

Tekintsünk egy rendszert, amely $N + 1$ atomot tartalmaz. A rendszer energiája legyen $E = (r + s) \cdot \varepsilon$. Szemmeljünk ki egy atomot. Annak valószínűsége, hogy ez éppen s energiaadaggal rendelkezik, legyen $p(s)$, annak valószínűsége pedig, hogy $s - q$ energiaadaggal, $p(s - q)$.



15. ábra



16. ábra

Természetesen a rendszer $E_s = \varepsilon s$, illetve $E_{s-q} = (s-q)\cdot\varepsilon$ energiájú atomjainak a száma

$$N(s) = (N+1)\cdot p(s),$$
$$N(s-q) = (N+1)\cdot p(s-q). \tag{81}$$

Másrészt a $p(s)$ valószínűség arányos lesz azzal a számmal, amelyik megmondja, hogy a kiszemelt atom elvétele után keletkezett N atomos rendszer a maradék r számú energiakvantumot hányféleképpen tudja szétosztani:

$p(s)$ arányos $W_N(r)$ számmal,
$p(s-q)$ arányos $W_N(r+q)$ számmal. (8.2)

A (8.1) és (8.2) képletek felhasználásával

$$\frac{W_N(r+q)}{W_N(r)} = \frac{p(s-q)}{p(s)} = \frac{N(s-q)}{N(s)}. \tag{8.3}$$

A jobboldalon álló hányados a Boltzmann-eloszlásból nyerhető:

$$N(s) = N(0)e^{-s\varepsilon/kT}, \quad N(s-q) = N(0)e^{-(s-q)\varepsilon/kT},$$

tehát

$$\frac{N(s-q)}{N(s)} = \frac{e^{-(s-q)\varepsilon/kT}}{e^{-s\varepsilon/kT}} = e^{q\varepsilon/kT}.$$

A baloldalon a W termodinamikai valószínűségek helyébe bevezethetjük az S entrópiát:

$$W_N(r) = e^{S(E_r)/k}, \quad W_N(r+q) = e^{S(E_r+q\varepsilon)/k}.$$

Innen

$$e^{S(E+q\varepsilon)/k} : e^{S(E)/k} = e^{q\varepsilon/kT},$$

azaz mindkét oldal logaritmusát képezve

$$S(E+q\varepsilon) - S(E) = \frac{q\,\varepsilon}{T}.$$

A q energiaadag felvétele rendezetlen módon (hőközlés formájában) történt. Jelölje ezt a felvett hőt $Q = q\varepsilon$.

$$\Delta S = \frac{Q}{T} \qquad \text{(nyílt rendszer, egyensúlyban).}$$

Ha egy rendszer Q hőmennyiséget kap a környezetétől, akkor entrópiája Q/T értékkel nő. Ez csak akkor igaz, ha a rendszer már egyensúlyban volt és a hőcsere sem bontja fel nagyon az egyensúlyt. Ha a rendszerben — miközben hőt vesz fel a környezetéből — egyéb folyamatok is spontán végbemennek, akkor az általánosabb

$$\Delta S \geq \frac{Q}{T}$$

összefüggés érvényes. Egy rendszer entrópiája tehát magától is nőhet, ha még nem érte el az egyensúlyt, de ha a rendszer környezetéből Q hőt vesz fel, akkor entrópiája legalább Q/T értékkel megnövekszik.

Hogyan szabja meg a termodinamikai valószínűség (s vele együtt az entrópia) növekedésének törvénye a Természetben végbemenő folyamatok irányát? Vegyünk két testet, az egyik T_1, a másik T_2 hőmérsékletű. Melyik test adhat át energiát a másiknak? Ha a részrendszerek a hőátadás előtt egyensúlyban voltak, akkor Q hőátadás során az első test entrópiájának változása

$$\Delta S_1 = -Q/T_1,$$

ha ez a test adja le a hőt. Ugyanakkor a másik testre

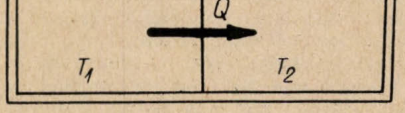
$$\Delta S_2 = +Q/T_2.$$

Az egész rendszer entrópiaváltozása

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 = Q\cdot\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right) \geqq 0.$$

Ha $T_1 > T_2$, akkor a zárójelben álló kifejezés pozitív, tehát Q-nak is pozitívnak kell lennie. Vagyis a *melegebb test ad le energiát*. Ha $T_1 < T_2$, akkor $Q < 0$, vagyis az energia ismét a melegebb testből áramlik a hidegebb felé. Ugyanakkor az energiaátadás kevésbé változtatja meg az entrópiát (és ezzel együtt a lehetséges mikroállapotok számát) egy melegebb testben, mint egy hidegebb anyagban. Ezért összességében az entrópia (termodinamikai valószínűség) növekszik, ha egy melegebb testből hő áramlik a hidegebb felé. A fordított folyamatot sosem figyeljük meg. *A Természetben maguktól csak olyan folyamatok mennek végbe, melyek során az egész (zárt) rendszer entrópiája növekszik vagy állandó marad. Ez a hőtan második főtétele.* Bár az ellentétes (entrópiacsökkentő) folyamatok elvileg nem lehetetlenek, olyan kicsi az esélyük, hogy a gyakorlatban sosem valósulnak meg.

A II. főtétel alapján felelni tudunk arra a kérdésre, hogy miért nem termelhetünk hasznos mechanikai-, vagy elektromos munkát egy hőtartály lehűtésével, (Hőtartálynak nevezünk egy nagy hőkapacitású testet, mint pl. a Föld légkörét, vagy az óceánok vízét.) Ez az „erőgép" lehetne pl. egy dugattyúval lezárt henger. A tágúló gáz munkája egy lendkereket hajtana, a gáz belső energiáját pedig a T_1 hőmérsékletű hőtartály hőátadással pótolná. A gépnek úgy kellene működnie, hogy egy munkaciklus után visszaálljon a kezdeti állapotba, különben nem lenne folyamatos a működése. A II. főtétel szerint egy ciklus során a hőtartályból, a gépből és a lendkerékből álló rendszer entrópiája nem csökkenhet. Az (ideális) lendkerék entrópiája nem változott, hiszen a rendezett mozgáshoz egyetlen állapot tartozik, tehát $\Delta S_k = k\cdot\ln 1 = 0$. A gép entrópiája sem változott, a hőtartályé viszont csökkent: $\Delta S = -E_1/T_1 < 0$. A gép tehát nem működhet!



17. ábra

A működéshez az szükséges, hogy legyen egy másik test, amelynek entrópiája legalább annyival nő, mint az első hőtartály entrópiacsökkenése. Ezt úgy lehet elérni, hogy egy T_1-nél alacsonyabb hőmérsékletű *másik hőtartály* kapja az E_1 energia egy részét, E_2-t. Az összes entrópiaváltozás

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 = -\frac{E_1}{T_1} + \frac{E_2}{T_2} > 0.$$

Ha $T_2 < T_1$, akkor még úgy is pozitív lehet ΔS, ha $E_2 < E_1$, vagyis a második hőtartály a rendelkezésre álló energiának csak egy részét kapja meg. A működés feltétele:

$$E_2/E_1 \geqq T_2/T_1.$$

A gép hatásfoka a hasznos $E_1 - E_2$ energia és a befektetett E_1 energia aránya

$$\eta = \frac{E_1 - E_2}{E_1} = 1 - E_2/E_1 \leqq 1 - T_2/T_1 = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

A belső energia hasznosításához tehát *legalább két hőtartályra van szükség*, és annál jobb a gép ún. termikus hatásfoka, minél nagyobb a relatív hőmérsékletkülönbség a két hőtartály között.

A Földön a növények szerves molekulákban rendezett kémiai energia formájában raktározzák el annak az energiának egy részét, amit a napfény a Nap rendezetlen hőmozgást végző felszínéről a Földre szállít. Úgy tűnik, hogy a Föld E energiatartalma évmilliók során nem nő (a Föld átlaghőmérséklete nem emelkedik), de a növények szerves anyagának gyarapodásával a Föld S entrópiája csökken. (A fákban felhalmozott rendezett energia munkavégzésre hasznosítható, ha a fát gőzgépben elégetjük.) Nem mond-e ez ellen a második főtételnek?

Semmiképpen nem. Az entrópia növekedésének tétele csak zárt rendszerre érvényes. A Föld nyílt rendszer. A $T_1 = 6000$ K hőmérsékletű Napról érkező sugárzás formájában Q fényenergiát felvesz. Ezt (pl. éjjel) a talaj infravörös hősugárzás formájában kisugározza, tehát a Q energia $T_2 = 300$ K hőmérsékletű sugárzás formájában eltávozik. Végeredményben a Földön energia folyt át, de E nem változott. A forró napsugárzás Q/T_1 entrópiát hozott, a langyos földsugárzás Q/T_2 entrópiát vitt el, utóbbi húszszorta több! Az állandó energiájú nyílt rendszeren átfolyó energia elszállíthatja a nyílt rendszer által termelt entrópiát, sőt csökkentheti is a nyílt rendszer saját entrópiáját, ha $T_2 < T_1$. Ezzel a lehetőséggel él a földi bioszféra, ezáltal viszi át a C, H, O, N elemeket alacsonyabb entrópiájú szerves vegyületekbe.

Egy felnőtt élőlénynek sem a tömege, sem a hőmérséklete nem változik idők folyamán. Ha munkát akar végezni, táplálkoznia kell, hogy szerves vegyületek formájában rendezett kémiai energiát vegyen fel. De táplálkoznia kell akkor is (majdnem ugyanolyan mértékben), ha nem dolgozik. Miért?

A szervezetben lejátszódó folyamatok állandóan entrópiát termelnek. Ha a szervezet nem akar a fokozódó rendezetlenség állapotába jutni, szétbomlani, entrópiáját állandó szinten kell tartania. A termelt entrópiától meg kell szabadulnia. Egy állandósult rendszer kikerülheti a szétbomlást, állandó szinten tarthatja entrópiáját, ha nyílt: energia folyhat át a rendszeren, amely több entrópiát szállít el, mint behoz. Valóban: az élőlények ΔE energiát nagymértékben szervezett kémiai energia formájában felvesznek (a táplálék szénhidrátot, zsírt, fehérjét tartalmaz), ugyanezt a ΔE energiát rendezetlen formában (lebonlott anyagcseretermékek, hőleadás) vesztik el. Az L munka formájában felvett energia egyenlő a Q hő formájában leadott energiával. Kissé leegyszerűsítve: táplálkozáskor $\Delta E = L > 0$, (L = labor = munka), $\Delta S = 0$; leadáskor $\Delta E = -Q$, $\Delta S = -Q/T < 0$. Végeredményben E nem változott, de a szervezet entrópiát adott le. Táplálékunk jelentős része nem arra fordítódik, hogy energiatartalmunkat, munkavégzőképességünket növelje, hanem, hogy megszabadítson a szervezetben keletkezett rendetlenségtől.

1. 2 db 1 kg-os vas 20 °C-os. Mennyivel valószínűtlenebb az az állapot, hogy az egyik 1 °C-kal lehül, a másik pedig 1 °C-kal felmelegszik.

2. Számítsuk ki, mennyivel változik meg az N_A molekulából álló ideális gáz entrópiája, ha állandó hőmérsékleten V térfogatról $V + \Delta V$ térfogatra tágul? Igaz-e ebben az esetben is a $\Delta S = Q/T$ összefüggés? *Útmutatás:* Osszuk fel a tartályt képzeletben ΔV nagyságú cellákra! A tágulás után eggyel több cella áll minden molekula rendelkezésére, ez megnöveli a lehetőségek számát. Használjuk ki, hogy kis x-re $\ln(1 + x) \sim x$.

3. T_1 hőmérsékletű hőtartályból Q hőt akarunk „átemelni" $T_2 > T_1$ hőmérsékletű hőtartályba (hűtőgép). Legalább mennyi rendezett (mechanikai vagy elektromos) munkavégzés szükséges ehhez? Mekkora lehet a gép hatásfoka?

4. Egy szobában minden azonos hőmérsékletű. Bekapcsolunk egy hűtőgépet, de ajtaját nyitva felejtjük. Hogyan változik a szoba hőmérséklete?

8. Összefoglalás

A termodinamika első főtétele az energia megmaradását fejezi ki:

$$\Delta E = L + Q,$$

de nem határozza meg a folyamatok irányát. A Természetben nagyon sok folyamat csak egy irányba megy végbe, a fordított folyamat soha nem figyelhető meg. Ennek a megfordíthatatlanságnak (irreverzibilitásnak) okát az anyag atomos szerkezetében kereshetjük.

Egy adott állapotot az atomok nagyon sokféle elrendeződése valósíthat meg. Ezek egyformán valószínűek, így azokat az állapotokat figyelhetjük meg, amelyeket a legtöbbféle (W számú) különböző atomelrendeződés valósíthat meg. W a rendszer termodinamikai valószínűsége, ennek logaritmusának k-szorosát nevezik entrópiának:

$$S = k \cdot \ln W.$$

Magárahagyott zárt rendszer termodinamikai valószínűsége — és ezzel együtt az entrópiája — csak nőhet, egyensúly esetén állandó marad. Ez a második főtétel.

$$\Delta S \geq 0. \qquad \text{(zárt rendszerben)}$$

Egyensúlyban levő rendszer entrópiája Q hőfelvétel során

$$\Delta S = \frac{Q}{T} \qquad \text{(nyílt rendszerben)}$$

értékkel nő. Ha a rendszer nincs egyensúlyban, akkor a hőcsere mellett még az egyensúlyi állapot felé történő belső átrendeződés is végbemegy, ilyenkor

$$\Delta S \geq \frac{Q}{T}. \qquad \text{(irreverzibilis folyamat)}$$

A rendszerben eközben maradandó változások történtek, a folyamat megfordíthatatlan.

Ugyanakkora hőcsere melegebb test entrópiáját kevésbé változtatja meg, mint egy hidegebbét, ezért hő mindig a melegebb testből a hidegebb felé áramlik.

A hőtan második főtétele csak statisztikusan érvényes. Zárt rendszerben elvben lehetséges fordított ($\Delta S < 0$) folyamat is, de ennek valószínűsége nagyszámú atomnál olyan kicsi, hogy a folyamat gyakorlatilag lehetetlen.

Nyílt rendszerben $\Delta E = 0$, $\Delta S < 0$ lehetséges, ha a rendszerben energia áramlik át. Pl. izotermikusan az energiafelvétel munka, energialeadás hő formájában történhet. Vagy a rendszer magasabb T_1 hőmérsékletű környezetből vesz fel Q hőt és azt alacsonyabb T_2 hőmérsékletű környezetnek adja le:

$$\Delta S = \frac{Q}{T_1} - \frac{Q}{T_2} < 0.$$

Átlagosan a molekulák minden szabadsági fokára (haladó mozgás, rezgés, forgás, . . .) $kT/2$ energia jut — ez az energia egyenletes eloszlásának tétele (ekvipartíciótétel). Mindaddig érvényes, amíg az ε energiakvantum $\ll kT$. Ha ez nem igaz, az átlagos energia kT alá csökken.

T hőmérsékletű anyagban E energiával rendelkező részecskék száma $e^{-E/kT}$ tényezővel arányos (Boltzmann-eloszlás), tehát mindig találunk az átlagos $kT/2$ energiánál lényegesen nagyobb energiájú molekulákat is.

IRODALOM

Erdey-Grúz Tibor: A fizikai kémia alapjai
Balázs Lóránt: A termodinamikai alapfogalmak tanítása
Nuffield Advanced Science, Unit 9: „Change and Chance".
Jon Ogborn: A Második Főtétel. Fizikai Szemle 1976/5.
Furcsa történetek. Országos Oktatástechnikai Központ filmje, írta Holics László és Marx György.
Energiaeloszlás Einstein-kristályban. Iskolatelevízió számítógép-szimulációs filmje, írta ifj. Szalay Sándor.

AZ ENERGIA ELOSZLÁSA

Károlyházy Frigyes
ELTE Elméleti Fizikai Tanszéke

I. Áttekintés

Noha mondanivalóm a címben megadott téma köré csoportosul, valamivel általánosabban is szeretnék kitérni a hőtan alapfogalmainak tanítási nehézségeire és a megoldás lehetőségeire.

1. Ami könnyű

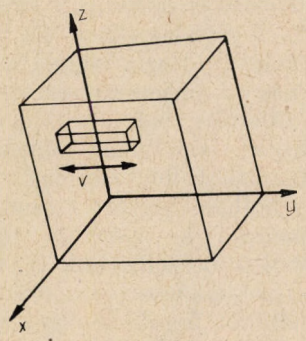
Hőmérséklet. Viszonylag könnyű érzékeltetni, hogy a hőmérséklet nagysága a rendezetlen molekuláris mozgás hevességével függ össze, olyan jelenségek segítségével, mint pl.

— a vaj megpuhulása
— a cukor gyorsabb oldódása a feketekávében
— a víz gyorsabb párolgása
— az autógumiban a nyomás növekedése, stb.,

ha a hőmérséklet növekszik. Figyelemre méltó, hogy a hő mozgásjellegének a gondolata már a többnyire hőfolyadék-képre támaszkodó XVIII. században is élt, sőt az ókorban is, minden bizonnyal nagyrészt a *tűz* pattogásának, a szikra, pernye örvénylésének a sugalmazására. (Természetesen ilyenkor a szabad szemmel is látható részecskék kacskaringós mozgása nem *közvetlenül* mutatja a molekulák megnövekedett lökdösődési kedvét, hanem áttételesen: a meleg levegő *az intenzívebb molekuláris mozgás* miatt kitágul, fajsúlya kisebb lesz, ezért hevesen felszáll s eközben alakulnak ki az örvények.)

Sőt a $pV = RT$ összefüggés kinetikai levezetésével könnyű a hő—mozgás kapcsolatot kvantitatívvá tenni s megmutatni, hogy a molekulák átlagos kinetikus energiája arányos a hőmérséklettel*:

$$\frac{1}{2}\overline{mv^2} = \frac{3}{2}kT \qquad (1)$$



1. ábra

Irreverzibilitás és entrópia. Majdnem ugyanilyen könnyű a csak egyirányban végbemenő folyamatokban az irreverzibilitás lényegének és az entrópia fogalmának egyszerű példákon való érzékeltetése. Máig felülmúlhatatlan Ehrenfest kutya—bolha példája (2. ábra).

Képzeljünk el két kutyát és mondjuk 10 bolhát. Hamar átláthatjuk, hogy még ha abból a feltevésből indulunk is, ki hogy a bolhák semmiféle előszeretettel nem viseltetnek egyik kutya iránt sem, hanem véletlenszerűen és egymástól függetlenül ugrálnak egyik kutyáról a másikra, (sőt *éppen azért, mert összevissza ugrálnak),* egy olyan „tendencia", „igyekezet" fog megnyilvánulni, hogy a bolhák eloszlása a két kutya között egyenletessé váljék, ha kezdetben nem volt az, és egyenletes maradjon, ha már kezdetben is az volt. Azaz: az egyirányúság, az irreverzibilitás látszólagos „szándékossága" mögött éppen ennek ellenkezője, szándéktalanság rejlik.

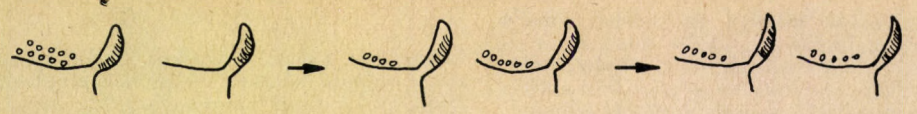
Mindegyik bolha számára 2 elhelyezkedési lehetőség van, ez az egész „bolhagázra" összesen $2^{10} = 1024$ lehetőséget jelent. A 2b ábrán látható mat-

---

* Legyen egy V térfogatú dobozban N molekula, akkor 1 cm³-ben jelen van $\frac{N}{V}$. Becslés céljából azt gondolhatjuk, hogy a molekulák hatodrésze balra mozog, hatodrésze jobbra (1. ábra), hatodrésze előre, stb., valamilyen v átlagsebességgel. 1 s alatt a fal kijelölt cm²-ét azok a balra haladó molekulák érik el, amelyek ennek az időtartamnak a kezdetén az 1 cm²-re állított v magasságú hasábban voltak. Számuk $\frac{1}{6}\frac{N}{V} \cdot v$. A falbaütközésnél impulzusuk ellenkező előjelűre vált, más szóval az impulzusváltozás, egyben a falnak átadott impulzus nagysága, molekulánként 2 mv. 1 s alatt a fal 1 cm²-ének átadott teljes impulzus, azaz a nyomás

$$p = \frac{1}{6}\frac{N}{V} \cdot v(2\,mv) = \frac{1}{3}\frac{N}{V}mv^2,$$

és így $pV = \frac{1}{3}Nmv^2$. Ha N éppen az Avogadro-féle szám és ezt az eredményt összehasonlítjuk a T hőmérséklet olyan empirikus definíciójával, amely mellett 1 mólnyi gázra $pV = RT$ érvényes, kapjuk, hogy $RT = \frac{1}{3}N \cdot mv^2$, vagy a $k = \frac{R}{N}$ Boltzmann-állandót bevezetve $\frac{3}{2}kT = \frac{1}{2}mv^2$. (Természetesen ez a „levezetés" pongyola.)



a.)

2. ábra

rica pontjai a bolhasereglet egy-egy lehetséges állapotát kívánják szimbolizálni. (Tehát a pontok itt nem egyes bolhákat jelentenek.) A rendszer állapotát jelző pont szeszélyesen vándorol a lehetőségek halmazán, amint az egyedek ugrálnak. Mivel azonban csak kisszámú olyan lehetőség van, amely feltűnően egyenetlen bolhaeloszlásnak felel meg (0—10 eloszlás egyetlen egy van, 1—9 eloszlás van tíz, 2—8 eloszlás $\binom{10}{2} = 45$, stb.), a tényleges állapot nagy valószínűséggel a lehetőségeknek abban a nagy kiterjedésű résztartományában fog maradni (illetőleg belejutni, ha a kezdetben kívül volt rajta), amelynek pontjai nagyjából egyenletes eloszlásnak felelnek meg.

Kutyák és bolhák helyett természetesen egy átjárható rekesszel kettéosztott térfogatról és gázmolekulákról is beszélhetünk (3. ábra)

Ezen a ponton szokásos bevezetni a makroállapot és mikroállapot fogalmát. Egy makroállapot egy eloszlást jelent, akkor ismerjük, ha tudjuk, hogy melyik térfélbe hány molekula jut. Ha még azt is tudjuk, a bolhákat vagy gázmolekulákat egyenként megkülönböztethetőnek tekintve, hogy melyik molekula melyik térfélben van, akkor a mikroállapotot is ismerjük. Egy makroállapot (eloszlás) mögött általában nagyszámú lehetséges mikroállapot valamelyike rejlik. Minél több mikroállapot valósíthat meg egy eloszlást, az eloszlás annál valószínűbb. A különböző eloszlások „statisztikai súlyának", „jelentőségének" mértékeként szokás mármost definiálni az eloszlás S entrópiáját:

$$S = k \ln W,$$

ahol k a Boltzmann-állandó és W az adott eloszlás mögé képzelhető mikroállapotok száma. Leggyakrabban az az eloszlás valósul meg, amelyiknek az entrópiája a legnagyobb.

Az entrópia fogalmához tehát — e példa tanulságát általánosítva — két lépés vezet.

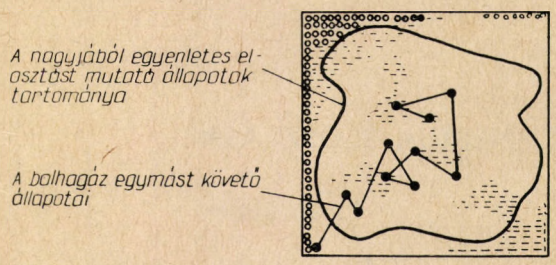
a) Felismerjük, hogy egy *makroszkopikus szempontból* („madártávlatból") egyértelműen megadott „látvány" (pl. adott gázmennyiség adott nyomáson és hőmérsékleten) mögé nagy számú olyan *teljes* (az egyes atomok pontos pillanatnyi állapotára kiterjedő) *részletességgel* megadott állapot képzelhető el, amelyek különböznek egymástól, de amelyek mind ugyanolyan látványt nyújtanak, noha egy konkrét pillanatban ténylegesen nyilván csak az egyik valósul meg közülük.

b) Ennek a makroszkopikus szempontból egyértelműen adott állapotnak a jellemzésére bevezetjük az

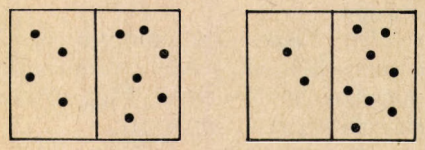
$$S = k \ln W$$

entrópiát.

Némileg meghökkentőnek tűnhet, hogy a kalorimetriai vagy egyéb kémiai vizsgálatok során



b.)



3. ábra

az entrópia mérhető, tehát „igazán" van, akárcsak az energia vagy a hőmérséklet, míg a W valami olyasmit jelent, ami „csak lehetne". Jobban utána gondolva azonban belenyugodhatunk, hogy W is „reális", mert a tényleges állapot mintegy „bizsereg", az egyes mikroállapotok hihetetlenül gyorsan váltják egymást, összehasonlíthatatlanul gyorsabban, mint a bennünket érdeklő makroszkopikus változások, így W is objektív; azon állapothalmaz nagysága, amelyet a rendszer „rendszeresen rendszertelenül" látogat.

A makroállapot jellemzésére azért használjuk az entrópiát és nem magát a W-t, mert ha két különböző rendszert, pl. két gázt két különböző edényben, egyetlen együttes rendszerré foglalunk össze, akkor az együttes makroállapot mögött nyilván $W = W_1 \cdot W_2$ mikroállapot húzódik meg (az első rendszer W_1, a másik W_2 lehetőség közül válogat, egymástól függetlenül) s így fenn fog állni az $S = k \ln W = S_1 + S_2$ összefüggés, más szóval az entrópia *additív* mennyiségnek bizonyul, amilyen pl. az energia is.

2. *Ami problematikus*

Hőmérséklet

a) A „rendezetlen hőmozgás" kifejezés nyomán az *egyetlen atomhoz* fűződő kép a zűrzavar, a kiszámíthatatlanság. Ezzel szemben a termodinamikai rendszerekben makroszkopikus szinten gyakran precíz rend uralkodik, pl. a jég 1 atm. nyomáson szigorúan 273 K°-on olvad meg stb. Részben ugyan ezt is értjük; ha a rendezetlen mozgásban igen sok részecske vesz részt, akkor az ún. *nagy*

számok törvénye érvényesül (fej vagy írás játék). Ez az általános igazság azonban csak a legegyszerűbb termodinamikai jelenségeket teszi közvetlenül szemléletessé, amilyen pl. a sűrűségkiegyenlítődés két egymással közlekedő gáztartály között. Nehéz érezni, hogy pl. a jég miért nem fokozatosan puhul meg, mint a vaj, holott ugyanakkor *minden hőmérsékleten* van a jégnek is valamekkora gőznyomása (nem csupán, mondjuk, a víznek, a forráspont közelében).

b) Abból, hogy pl. a gázmolekulák rendezetlen haladó mozgásának *átlagos energiája* a hőmérséklettel arányos, nem érződik ki az

$$e^{-\frac{E}{kT}}$$

Boltzmann-faktor, márpedig ennek szerepét, elsősorban a kémiai és biokémiai folyamatokban, nem lehet eléggé hangsúlyozni.

Jól tudjuk, mi a Boltzmann-tényező jelentése: ha ismerjük azoknak az állapotoknak egy mondjuk i indexszel megszámozott halmazát, amelyeket egy mikroszkopikus rendszer, pl. egy gázmolekula felvehet, akkor annak a w_i valószínűsége, hogy a rendszer a T hőmérsékletű környezettel termikus egyensúlyban egy kiragadott pillanatban éppen az i-ik állapotot valósítja meg,

$$w_i = C \cdot e^{-\frac{E_i}{kT}} \qquad (2)$$

ahol C normálási tényező, amely arról gondoskodik, hogy az összes valószínűség összege 1 legyen. Látnivaló, hogy a kT értéknél jóval nagyobb energiákhoz rohamosan csökkenő valószínűség tartozik, ezért az ilyen nagy energiájú állapotok az *átlagenergiához* alig járulnak hozzá. A legtöbb kémiai reakcióhoz azonban ún. aktivációs energia szükséges: a kémiai átalakulás csak akkor következik be, ha a reakcióba lépő molekulák ütközési energiája elér vagy meghalad egy bizonyos kritikus értéket. Ha ez nagy, akkor a szóban forgó reakció szempontjából éppen az a *viszonylag kisszámú* molekula érdekes, amelyek energiája az átlagot jelentősen meghaladja. Az átlagenergiával ellentétben, az ilyen molekulák száma a hőmérséklettől nagyon érzékenyen függ, az exponenciális csökkenés természetéből kifolyólag. És valóban, éppen a rendkívüli hőmérsékletérzékenység a jellemzője sok kémiai s főleg biokémiai folyamatnak.

A Boltzmann-tényezőt tehát elfogadhatóvá kell tenni a diákok számára. Márpedig a diákok (akárcsak az egyetemi hallgatók) nem szeretik a Boltzmann-faktort. Nem világos, hogy miért nagyobb egy az átlagos termikus energiánál sokkal kisebb energiájú állapot valószínűsége egy olyan állapoténál, amelynek energiája megfelel az átlagos termikus energiának. Így pl. furcsának tűnik, hogy egy gázban, akármilyen forró is, egy kiszemelt atom nagyobb valószínűséggel van éppen nyugalomban, mint amilyen valószínűséggel egy tetszőlegesen előírt egyéb sebességvektorrral rendelkezik.

c) Ha hőmozgás címén nem csupán gázatomok vagy molekulák *haladó* mozgását vizsgáljuk, hanem pl. e részecskék belső mozgását is (az elektronok viselkedését az atommag körül, vagy a molekula atommagjainak egymáshoz viszonyított mozgását), ezekre általában nem igaz, hogy a hozzájuk tartozó átlagos mozgási energia arányos a hőmérséklettel.

Legegyszerűbb példaként képzeljünk el egy szobahőmérsékletű ($kT \approx 4{,}8 \cdot 10^{-21}$ *J*) He-gázba tévedt hidrogénatomot. Az első gerjesztett elektronállapot energiája $1{,}6 \cdot 10^{-18}$ *J*-lal van az alapállapot energiája fölött, ezért 1) alapján ez a H atom gyakorlatilag 100%-os valószínűséggel alapállapotban van. Belső állapota mérsékelt hőmérsékletnöveléssel szemben teljesen érzéketlen, a gáz melegítése közben nem „szív magába" energiát a környezetből, más szóval nem járul hozzá a gáz fajhőjéhez. Ugyanez áll természetesen a He-atomokra is. Azt szokás mondani ilyenkor, hogy a belső szabadsági fokok *be vannak fagyva*. A hőmérséklet 1K°-kal való növelésekor csak a haladó mozgás energiája nő, 1) szerint atomonként $\frac{3}{2}$k-val. Így válik érthetővé, hogy 1 mól egyatomos, nem túl meleg gáz fajhője (állandó térfogaton) $\frac{3}{2}Nk$, és nem nagyobb.

A kvantummechanika tanítása szerint azonban az elektronoknak ilyenkor is van mozgási energiája, amelyet az elektronfelhő alakjából lehet kiolvasni. Az alapállapotú H-atomban „befagyott" elektron mozgási energiája nem kevesebb, mint $2{,}2 \cdot 10^{-18}$ J, a szobahőmérséklethez tartozó kT értéknek több, mint négyszázszorosa! (A H-atom természetesen kötött rendszer, mert az elektron *helyzeti energiája* a mag vonzó terében a mozgásinak éppen kétszerese, de negatív.)

A hőmérsékletet jelentősen növelve már számottevővé válik az elektronfelhő gerjesztésének valószínűsége is, az atomok átlagos belső energiája nőni fog a hőmérséklettel. Azonban *esetenként másképpen*, attól függően, hogy hogyan helyezkednek el az illető atom vagy molekula energiaszintjei. (Nem lesz érvényes a „minden atomra ugyanannyi": az *ekvipartició* elve.) Ugyanilyen befagyott, helyesebben „Csipkerózsika-álmot" alvó, vagy „ébredező" mozgásokkal találkozunk a szilárd testekben is.

Napnál világosabb, hogy az ilyen esetekben csak akkor tudunk tájékozódni, ha elsajátítottuk *a hőmérsékletnek azt a vonását, amely a 2) egyenlőségben nyilvánul meg*. Ez a vonás nem közvetlenül az átlagenergiára vonatkozólag ad felvilágosítást. A nagy vagy kis hőmérséklet itt inkább azt jelzi, hogy a rendszernek *„mennyire mindegy"*, hogy a *rendelkezésére álló állapotok közül* a nagy vagy a kis energiájút foglalja-e el. Más szóval, ha sikerül a Boltzmann-faktort élménnyé tenni, akkor a *hőmérsékletben nem a rendezetlen mozgás mértékét fogjuk látni* (ha az alapállapot fölött „belátható magasságban" nincs energianívó, akkor

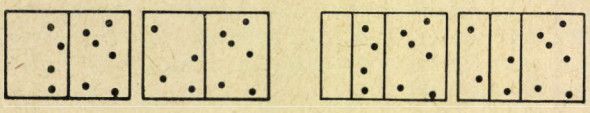
a rendszer egyszerűen „nem bír" rendezetlenül viselkedni), hanem a rendezetlen mozgásra való *hajlandóság* mértékét. Ha az alapállapot fölötti néhányszor kT energiaintervallumban *vannak* energiaszintek, akkor a rendszer nem mulasztja el azokat „rendszeresen", bár véletlenszerű sorrendben, felkeresni. (A hőmozgás rendezetlenségének a mértéke az entrópia lesz.)

Entrópia. A kettéosztott térfogat példája, noha egyszerűsége miatt vonzó, alapvetően hiányos, ezért *nem ad biztonságérzetet* az entrópia fogalmával kapcsolatban.

a) Egyáltalán nem teszi világossá, hogy mi az összefüggés az *entrópia* és a *hőmérséklet* között.

b) A *csak térfogattal* operáló példa alapján nem érezzük, hogy miért nem lehet egy irreverzibilis folyamatot (amilyen pl. az atomok egyenletes elkeveredése a két résztérfogatban, ha kezdetben mind a baloldali rekeszben voltak) „kívülről" *akadálytalanul* „visszacsinálni"; miért nem elég hozzá az emberi akarat és ügyeskedés, még ha magától nem megy is végbe. (Miért nem lehet a molekulákat egyszerűen „visszaseperni" a baloldalra?)

c) Rejtély marad, hogyan lehet az entrópiát *mérni*, holott, úgy tűnik, merőben önkényes, milyen megvalósulási lehetőségeket tekintünk különbözőnek, vagy mit tekintünk makroállapotnak. A 4. ábra első két rajzán ugyanazt a makroállapotot látjuk, de ha gondolatban a baloldali rekeszt további két részre osztjuk, akkor már két különbözőt.



a.) b.)

4. ábra

d) Példánkban az, hogy egy makroállapothoz több mikroállapot tartozik (tehát lehet entrópiáról beszélni), azon múlt, hogy a bolhákat, illetve gázmolekulákat „önálló személyiségnek", egymástól megkülönböztethetőnek tekintettük. A bolhákra vonatkozólag ez kétségtelenül helyes, egynemű gáz molekuláira vonatkozólag viszont biztosan helytelen. A kvantummechanika tanítása szerint a gáz pillanatnyi állapotát a molekulák hely- és impulzuskoordinátáinak *összessége* egyértelműen megszabja, értelmetlenség azt firtatni, hogy „melyik molekula melyik". (A hely és impulzuskoordinátákat természetesen a kvantummechanikában bizonyos elmosódottság jellemzi.) Ez a *megkülönböztethetetlenség* fontos kísérleti következményekkel jár, elhallgatni helytelen.

A következőkben megpróbálunk úrrá lenni ezeken a nehézségeken.

II. Hőmérséklet és entrópia

1. Boltzmann faktor

A levezetésnél többet ér az érzékeltetés.

a) Ideális gáz. Ha már érezzük az $\frac{1}{2}\,\overline{mv^2} = \frac{3}{2}\,kT$ összefüggést, akkor (az egyes molekulák lehetséges állapotaira gondolva) az e^{-kT} tényező „nagyenergiás farka" könnyen elfogadható. (E egy kiszemelt molekula pillanatnyi haladó mozgásának az energiája, $E = \frac{1}{2}mu^2$, ahol u a pillanatnyi sebesség.) Világos ugyanis, hogy ha egy molekula az *átlagos sebességnél már gyorsabban halad*, akkor *a többi molekula zömének őhozzá viszonyított sebessége* ellentétes irányú, mint az ő sebessége. Sokkal valószínűbb tehát, hogy *szemből* kap — fékező — lökést, mint az, hogy hátulról, amely még tovább gyorsítaná.

Mit mondhatunk az átlagos sebesség közelébe eső sebességekről?

Először azt, hogy egy ilyen sebességgel mozgó molekula elölről is, hátulról is, számottevő valószínűséggel kaphat lökést, más szóval nem fog „sürgősen" fékeződni. *Másodszor* azonban éppen azt kell észrevennünk, hogy *mihelyt a molekula egyáltalán mozog* (ha mégoly kis sebességgel is) ő hozzá viszonyítva az össztömegében nyugvó gázban *több* az „ellene", mint a „vele" mozgó molekula, ezért a pillanatnyi sebességgel ellentétes irányú változásnak mindig egy kicsit nagyobb a valószínűsége, mint az egyező irányúnak. Innen van, hogy az összes konkréten megadott sebességvektor közül a zérusnak a legnagyobb a valószínűsége. (Ha a sebességnek csak a nagyságát tekintjük, az irányát nem, akkor *nem* a zérus érték a legvalószínűbb, minthogy egy zérustól különböző sebességnagysághoz sok különböző — a sebesség irányában különböző — állapot tartozik.) Így végül az „egész" $e^{-\frac{E}{kT}}$ elfogadhatóvá válik.

b) Egyszerű modell. (A részeg tengerészek játéka.)

Képzeljük el, hogy 20 Ft-ot az összes lehetséges módon forintonként szét kell osztani három személy, A, B, és C között. (Az egyes pénzérméket nem tartjuk számon, csak azt, hogy kinek hány Ft jut. A lehetőségek:

A	B	C
0	20	0
	19	1
	...	...
	0	20

21 eset

A	B	C
1	19	0
	18	1
	...	...
	0	19

20 eset

A	B	C
20	0	0

1 eset

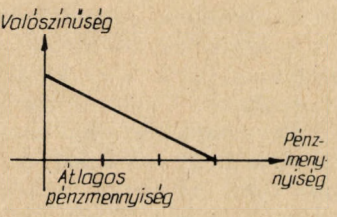
Tekintsünk minden egyes esetet egyenlő valószínűnek.

Akkor világos, hogy átlagosan mindegyik személynek 20/3 Ft = 6,6 Ft jut, mégis mindegyikük számára a leggyakoribb pillanatnyi érték a zérus.

Külön-külön akármelyikükre az alábbi diagramm érvényes. (5. ábra)

Kommentár alig szükséges. A 20 Ft pénzösszeg felel meg pl. annak az *U összenergiának*, amellyel egy (egyszerűség kedvéért hőszigetelő falú edénybe bezárva képzelt) gáz rendelkezik, *A* egy kiszemelt molekula. Általános tanulság (ez itt világosabban látszik, mint az előző fejtegetésben): *A kiszemelt molekula egy meghatározott, E energiájú állapotának valószínűségét termikus egyensúlyban semmi egyéb nem szabja meg, mint az, hogy hányféleképpen lehet a maradék U − E energiát a többi szabadsági fok között szétosztani.*

(A 5. ábrán látható egyenes azért nem hasonlít „még jobban" az exponenciális görbéhez, mert példánkban a „maradék U − *E* energiát" mindössze két további szereplő között kevergetjük.)



5. ábra

Ha a „játékban" azt a változtatást tesszük, hogy *A* csak 10 Ft-os adagokban hajlandó pénzt felvenni vagy átadni, akkor ez a példa egy szabadsági fok kezdődő befagyását is jól érzékelteti:

A	B	C
0	20	0
	19	1
	...	...
	0	20

21 eset

A	B	C
10	10	0
	9	1
	...	...
	0	10

11 eset

A	B.	C
20	0	0

1 eset

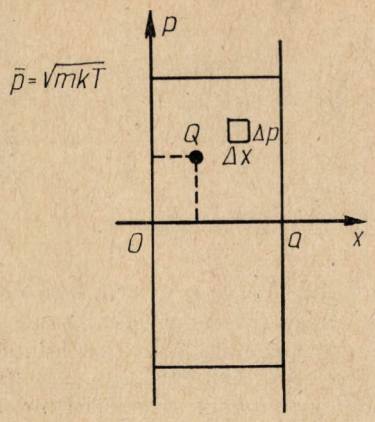
Most A-ra átlagosan csak $\frac{21.0 + 11.10 + 1.20}{21 + 11 + 1} =$ = 4 Ft jut.

2. Entrópia

a) Egyetlen atomból álló gáz egydimenziós térben. Egyetlen atomot képzelünk az x-tengely egy *a* hosszúságú szakaszára bezárva. Hogy a lehetséges állapotok számát egyértelművé tegyük, két dolgot veszünk figyelembe.

1. Az atom állapota nem csak a helyet jelenti, hanem az impulzust is. Ezért az állapotot nem a közönséges (itt egydimenziósnak tekintett) térben, hanem egy olyan síkon kell kijelölni, amely a lehetséges impulzusokat is feltünteti (6. ábra.)

2. Ellentétben azzal, amit a klasszikus mechanika alapján várnánk, az atom pillanatnyi állapotát nem egy matematikai szigorúságú pont jelzi ezen az állapot- vagy fázissíkon, amilyen pl. a Q pont lenne. Az anyag „hullámsajátságai" miatt mind az atom pillanatnyi helye, mind az



6. ábra

impulzus elmosódott érték, amelyeket a Δx, ill. Δp elmosódottság jellemez, ezekre fennáll a $\Delta x \cdot \Delta p \approx h$ Heisenberg-féle határozatlansági reakció. Az atom egy *kvantummechanikai értelemben teljesen meghatározott* állapotának tehát nem egy pont, hanem egy *folt* felel meg az állapotsíkon, amelynek területe éppen *h*. Az atom két állapota akkor tekinthető határozottan különbözőnek, ha a megfelelő foltok nem fedik át egymást.

Az adott térfogatú és hőmérsékletű „gáz" összes különböző mikroállapotának pontos számát mármost akkor tudnánk megmondani, ha pontosan ismernénk a fázissíkon annak a tartománynak a nagyságát, amelyet a pillanatnyi állapotot jelző folt az adott hőmérsékleten véletlenszerűen ugyan, de mégis rendszeresen végiglátogat, lefed.

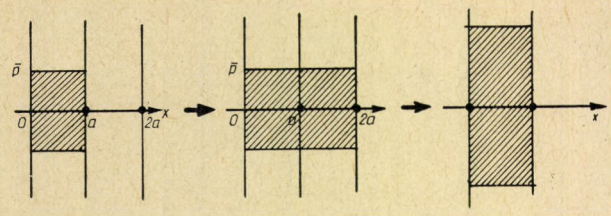
Ezen a ponton azonban egy kézenfekvő közelítéssel kell élnünk, ha nem akarunk reménytelen bonyodalmakat. A „látogatott" tartománynak szigorúan véve egyáltalán nincs éles határa. A Boltzmann-faktort „leegyszerűsítve" azonban közelítőleg mégis vonhatunk egy ilyen határt. Az olyan p értékek valószínűségét, amelyek a $\frac{\overline{p^2}}{2m} \approx$ $\approx \frac{1}{2} kT$ egyenletből számított kritikus értéknél nagyobbak (*m* az atom tömege), elhanyagoljuk, az ennél kisebb *p* értékek valószínűségét viszont egyformának tekintjük. Ekkor a lehetséges, nagyjából egyforma valószínűségűnek tekintett lehetőségek száma

$$W = \frac{2 \cdot a}{h} = \frac{2\sqrt{mkT \cdot a}}{h}$$

Ennek a számnak a logaritmusa szolgálgatja, a Boltzmann-állandóval megszorozva, az egyetlen atomból álló gáz entrópiáját *a* (lineáris) térfogaton és *T* hőmérsékleten:

$$S = k \ln \left[\frac{2\sqrt{mkT \cdot a}}{h} \right] \qquad (3)$$

A 3. ábrán látható képpel ellentétben a 6. ábrán a *lehetőségek tere* az impulzuson keresztül a hőmérsékletet is magában foglalja, így egycsapásra érzé-



7. ábra

kelhetővé válik, hogy egy irreverzibilis folyamat csakugyan valami visszacsinálhatatlant jelent. A 7. ábra mutatja, hogy mire gondolunk.

Ha az eredeti ,,térfogat'', azaz a (0, a) intervallum mellé egy másik *üres* térfogatot helyezünk s a kettő között ,,a csapot megnyitjuk'', modellgázunk munkavégzés nélkül (hiszen nincs mi ellen munkát végezzen), mint a közismert Gay-Lussac kísérletben, birtokba veszi az új térrészt is, anélkül, hogy hőmérséklete csökkenne. A lehetőségek halmaza s így az entrópia megnő. Mi történik, ha a gázt újra össze akarjuk nyomni? Az ide-oda pattogó atom ellen most munkát kell végeznünk: miközben a térfogat lecsökken, a gáz energiája s így hőmérséklete megnő, az egyszerű elemzés szerint éppen az ábrán látható módon. *Az egyszer már megnövekedett W-t az összenyomással nem sikerül eredeti nagyságára visszaszorítani.* Eszünkbe juthat, hogy *hűtéssel* próbálkozzunk. (8. ábra. A két térfogat között most a csap zárva van, a bal oldali rekeszben forró, a jobb oldaliban hideg gáz van.) A baloldali gáz entrópiája így csakugyan csökkenthető, de közben a jobb oldalié nyilván nő (a 7b, ábrán az entrópianövekedés ,,külső segítség'' nélkül is végbement), s könnyű megmutatni, hogy az összentrópiaváltozás pozitív. *Rendszer+környezet együttes entrópiája nő vagy marad, de soha nem csökkenthet.*

Az ,,egyetlen atomból álló gáz'' természetesen bánatosan mesterkélt dolog, de több lényeges vonást jól tükröz.

Nevezetesen

α) A 3) képlet, jóllehet a levezetése során közelítést alkalmaztunk, megadja az adott esetben az entrópia konkrét numerikus értékét s így mintegy kézzelfoghatóvá teszi azt.

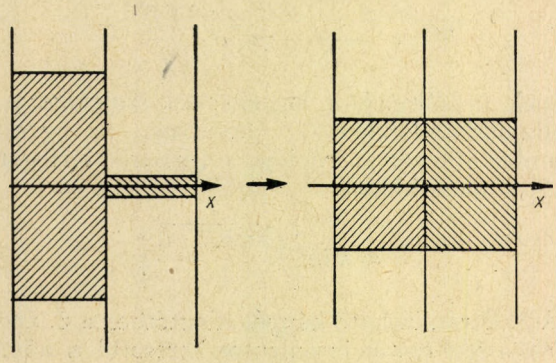
β) Kitűnik, hogy az entrópiában nem annyira az egy adott pillanatban elképzelhető, de meg nem valósuló mikroállapotok számát kell látnunk, mint inkább a *viselkedés* rendezetlenségének, a szeszélyesen látogatott állapotok halmazának (röviden: a rendezetlen hőmozgásnak) a mértékét. (Végeredményben tehát: a hőmérséklet = az igyekezet, az entrópia = az eredmény.)

b) Entrópia és szabadenergia. Az előző szakaszban a Boltzmann-faktor nagyfokú leegyszerűsítése segített a gyors eredményhez, a most következő tanulságos kis példában jobban kihasználjuk a pontos alakot.

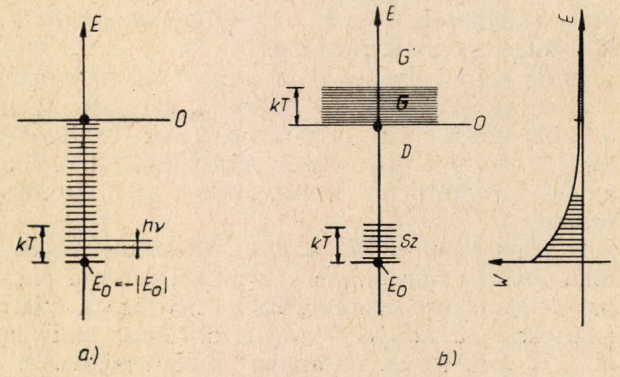
A párolgás jelenségét fogjuk tanulmányozni. Az előbbi példához képest annyi a változás, hogy a (0, a) intervallum (,,gáztartály'') egyik szélét (,,sarkát'') ún. *kötőhelyként* képzeljük el, amely a kis környezetében biztosított nagy negatív helyzeti energia révén ugyanúgy képes rövidebb-hosszabb ideig megkötni a modellként szolgáló egyetlen atomot, ahogy — realisztikusabb esetben — egy tartály alján elhelyezkedő folyadékcsepp vagy inkább szilárd anyagszemcse rövidebb-hosszabb ideig pihenőül szolgálna a gázfázisból kiváló, majd oda visszatérő atomoknak. A laboratóriumi kísérletben — parányi anyagmennyiség alkalmazása esetén — azt tapasztalnánk, hogy egy keskeny hőmérséklet-intervallumtól *lefelé* az anyag csaknem teljes tömege a kondenzált fázisba tömörülne, a magasabb hőmérsékleteken ellenben gyakorlatilag csak a gázfázis lenne jelen. Modellünkben nyilván az lesz az ,,egyensúlyi'' hőmérséklet, amelynél a kötött és szabad állapot valószínűsége egyenlő, a ,,rendszer'' egyik halmazállapot felé sem törekszik.

Milyen képet fűzzünk atomunk viselkedéséhez olyankor, amikor a termikus állapotingadozások során éppen kötött állapotban tartózkodik? Ezt a képet a szilárd anyag más előadásban részletesen tárgyalt Einstein-féle modelljéből kölcsönözzük.

A kötött állapotban kis helyre összeszorított atom ,,rezgését'' az egyensúlyi helyzet körül a kvantummechanika írja le. A 9a) ábrán a különböző kötött állapotok lehetséges energiaszintjeit látjuk. Az alapállapot energiáját E_0-lal jelöljük. Két szomszédos energiaszint között a különbség $h\nu$, ahol ν az a frekvencia, amellyel az atom a klaszszikus mechanikának engedelmeskedve rezegne. Valamennyi energiaérték negatív, ha az energia eléri a zérus értékét, az atom kiszabadul a vonzóerőtől mentes gáztérbe s egy darabig ott időzik.



8. ábra



9. ábra

A különböző szabad állapotoknak a 6. ábra egy-egy h nagyságú cellája felel meg. Minden ilyen állapothoz tartozik egy (tisztán mozgási) energia, amelyet egyszerűség kedvéért határozott számértéknek tekintünk (noha a valóságban egészen parányi mértékben elmosódott, hiszen a p impulzus is az). A 9b) ábrán az egyes szabad állapotok energiáit is feltüntettük. A kötött és szabad állapotok egyesített halmazát alulról kezdve, a növekvő energia sorrendjében megszámozva képzeljük. Egyszerű modellünkben nyilván az $i_0 = \frac{|E_0|}{h\nu}$-sorszámig terjednek a kötött állapotok. A tetszőleges i-ik állapot valószínűsége, mint tudjuk,

$$w_i = C \cdot e^{-\frac{E_i}{kT}}.$$

C-nek akkorának kell lennie, hogy $\sum_{i=1}^{\infty} w_i = 1$ legyen, konkrét értékére, bár könnyen megkaphatjuk, nem lesz szükségünk. Annak teljes valószínűsége, hogy az atom kötve, ill. gázállapotban van,

$$w_{sz} = \sum_{i=1}^{i_0} w_i = C \cdot \sum_{i=1}^{i_0} e^{-\frac{E_i}{kT}} \tag{4}$$

illetve

$$w_g = \sum_{i=i_0+1}^{\infty} w_i = C \cdot \sum_{i=i_0+1}^{\infty} e^{-\frac{E_i}{kT}} \tag{5}$$

Az a T lesz az egyensúlyi hőmérséklet, amelyen $w_{sz} = w_g$. A számítás egyszerűsítése érdekében tegyük fel már előre, hogy T „mérsékeltnek" fog kiadódni, amin azt értjük, hogy $kT \ll |E_0|$, de ugyanakkor $kT \gg h\nu$ (a gáztérfogat alkalmas megválasztásával ezt mindig elérhetjük). Ekkor a fenti két összeg közelítő értékét könnyen megadhatjuk. Foglalkozzunk először w_{sz}-szel. A 9b) ábra jobb oldalán emlékeztetőül feltüntettük a Boltzmann-tényező nagyságát. Látnivaló, hogy csak az E_0 energia feletti nagyjából kT vastagságú energiarétegbe eső, kb. $W_{sz} = \frac{kT}{h\nu}$ számú állapot valószínűsége összemérhető az állapot valószínűségével, hozzájuk képest az ábrán D-vel jelölt tartományba eső állapotok valószínűsége elhanyagolható. Ezért írhatjuk, hogy

$$w_{sz} \approx W_{sz} \cdot C \cdot e^{-\frac{E_{sz}}{kT}} \tag{6}$$

ahol E_{sz} valamilyen E_0 és $E_0 + kT$ közé eső érték, az atom *kötött állapotbeli* átlagos energiája. (A magasabb energiájú kötött állapotok járulékát pontosabban tekintetbe véve éppen $E_{sz} = E_0 + kT$ adódik).

Vizsgáljuk most a szabad állapotokat. Első pillanatra úgy tűnhet, hogy azok valószínűsége elhanyagolható, hiszen már a D energiatartományba eső állapotok valószínűsége is az volt. Egy-egy szabad állapot valószínűsége valóban rendkívül kicsi, csakhogy ezek az állapotok a nagy gáztérfogat miatt az energiaskálán *sokkal sűrűbben* helyezkednek el, mint $h\nu$, együttes valószínűségük ezért mégis számottevő. Az azonban most is igaz, hogy elég a zérus érték feletti kT vastagságú energiarétegbe eső állapotok W_g számát meghatározni. Az e fölé eső G′ tartomány, noha az állapotsűrűség itt is igen nagy, a Boltzmann-tényező további gyors csökkenése miatt megint csak elhanyagolható. A $0 - kT$ energiaközben a Boltzmann-tényező értékét $e^{-\frac{Eg}{kT}}$-nek vehetjük, ahol E_g az atom átlagenergiája a gázállapotban. (Mint tudjuk, ez éppen $\frac{1}{2}kT$, de inkább megtartjuk az E_g jelölést.)

Ezek után

$$w_g = W_g \cdot C \cdot e^{-\frac{Eg}{kT}} \tag{7}$$

W_g értékét már meghatároztuk, ez a (3) egyenlőség jobb oldalán a logaritmus argumentuma. A $w_{sz} = w_g$ egyensúlyi feltételből C kiesik (egyébként a $w_g + w_{sz} = 1$ feltételből kellene kifejeznünk) s kapjuk, hogy

$$W_{sz} \cdot e^{-\frac{Esz}{kT}} = W_g \cdot e^{-\frac{Eg}{kT}} \tag{8}$$

Ennek az egyenlőségnek a lényeges fizikai tartalma a következő. A lehetséges állapotok teljes halmazában (9b ábra) két viszonylag jól elkülönülő résztartománynak van számottevő statisztikai súlya, ezeket az ábrán *Sz* és *G* jelöli. Az egyik a szilárd a másik a gázfázisnak felel meg. A két tartományra nézve jelentősen eltér az energia s így a Boltzmann-tényező, de jelentősen eltér az állapotok száma, azaz, mint nyomban felírjuk, a két halmazállapotra külön-külön jellemző entrópia is. A „megvalósulásért vívott küzdelemben" tehát az energia (Boltzmann-faktor) és az entrópia egymással versenyez, az egyensúlyi hőmérsékleten ez a verseny az *Sz* és *G* tartományok között döntetlenre áll.

Fontos! Időről időre az atom energiája a D tartományon is áthalad, különben nem lenne közlekedés a két halmazállapot között. A kötött állapotban való tartózkodás idejének messze túlnyomó részét azonban az atom az *Sz* tartományban tölti. *Ez a magyarázata annak* (némileg szabad eszmetársítással a szilárd test és a fölötte levő telített gőz realisztikus, a bevezetőben említett esetére gondolva), *hogy mérsékelt hőmérsékleten egy szilárd test „kemény" marad, annak ellenére, hogy egy része elpárolog.*

És ez a magyarázata annak is, hogy a szilárd halmazállapothoz tartozó S_{sz} entrópia, a szilárd halmazállapotban a viselkedés rendezetlenségének mértéke

$$S_{sz} = k \ln W_{sz} = k \ln \left(\frac{kT}{h\nu}\right), \tag{9}$$

és nem mondjuk $k \ln \left(\frac{|E_0|}{h\nu}\right)$. Természetesen ugyanúgy $S_g = k \ln W_g$.

Ha W_{sz}-et és W_g-t a megfelelő entrópiákkal fejezzük ki és (8)-ba beírjuk, azt kapjuk, hogy

$$e^{\frac{Ssz}{k}} \cdot e^{-\frac{Esz}{kT}} = e^{\frac{Sg}{k}} \cdot e^{-\frac{Eg}{kT}}, \text{ azaz } e^{-\frac{Esz-TSsz}{kT}} = e^{-\frac{Eg-TSg}{kT}} \quad (10)$$

Ez csak akkor állhat fenn, ha

$$F_{sz} \equiv E_{sz} - TS_{sz} = F_g \equiv E_g - TS_g$$

Az így bevezetett $F = E - TS$ mennyiséget nevezik, teljes általánosságban, bármely rendszerre vonatkozóan, *szabad energiának*. Szerepe (10) alapján világos: a rendszer entrópiájának és a Boltzmann-tényezőnek együttes hatását mutatja. Mivel a Boltzmann-tényező, mint láttuk, a környezetben maradó energia szétosztási lehetőségeinek számával, más szóval a környezet entrópiájával áll közvetlen kapcsolatban, azért a szabad energia is közvetlen kapcsolatban áll a rendszer + környezet együttes entrópiájával. Izotermikus folyamatban pl. a szabad energia csak csökkenhet, stb.

ESEMÉNYEK

ANYAGFEJLŐDÉS '76

A kilencnapos tanári konferencián, Nagykanizsán nem kígyót-békát, hanem gólyát-békát „hordtak össze" a szó szoros értelmében a résztvevők számára. Az előbbit a nyomda ördöge sugallta, amely a golyómodell helyett g ó l y a modellt varázsolt a konferencia meghívójába. A két kis zöldpöttyös béka a kanizsai kertek alól az Anyagszerkezet Hullámmodell tankönyvének tanítóbékáit keltette életre.

A konferencia előadásainak témáit, didaktikai megbeszéléseinek anyagát a Fizikai Szemlében nemrég megjelent „Terv a természettudományok tanítására" tantervvázlat, és az azt megvalósító kísérletek problémái szabták meg.

Az elmúlt nyarakon, Kőszegen, Tatán, Gyulán, Patakon rendezett konferenciákon e gimnáziumi terv megszületésén, a megvalósítás egyes lépésein dolgoztak a résztvevők, miközben természetkutatók módjára (bár eddig csak kvalitatíven) figyeltek a megelőző tanítási év kísérleti oktatási tapasztalataira, eredményeire, problémáira.

Az idei konferencia a negyedik osztályos záró tárgyak témáira, mint megoldandó feladatra, és a megelőző évek tárgyainak didaktikai letisztítására, finomítására koncentrált. Így az előadások három téma köré csoportosultak: A II. főtétel, A genetika, Az anyagszerkezet (kvantummechanika, kvantumkémia, szilárdtestfizika). A Fizikai Szemle ezen száma az első témakör előadásait tartalmazza. A délutáni didaktikai megbeszélések pedig sorra vették a tantárgyakat.

A negyedik osztályos fizika és biológia a tizenkét éves természettudományos képzés zárását adja. Itt azonban nemcsak mechanikus összefoglalást, hanem új, átfogó szempontokat is kívánunk adni a gyerekeknek a természettudományos ismeretek szerzéséhez, áttekintéséhez.

A negyedik osztály első félévében a fizika is, a biológia is a *mintát*, alakot és a *sokaságot*, a populációt vizsgálja. E két tárgyban mutatjuk meg, hogyan „szüli" a természet a mintát a kicsiny részeknél, élettelen anyagnál (kvantummechanika, magfizika), az élő anyagnál (genetika), és milyen módon élnek, léteznek ezen egyedi mintát hordozók sokaságai (statisztikus mechanika, ökológia).

A negyedik osztály második féléve az Anyagfejlődés, biológia- és fizikatanár által együtt tartott órákkal. Ez a témakör mutatja meg a gyerekeknek, hogy a megismert természettörvények működése alapján érthetjük meg világunk időbeli mozgását, a csillagok kialakulásától az emberi társadalom megjelenéséig, vagy akár az ember és természet viszonyának jelenlegi, jövőbeli alakulásáig.

A kísérletet végző, az idén belépő tanárok felelőssége tanítványaink okosabb, mélyebb, modernebb természettudományos neveléséért tette tartalmassá a délutáni módszertani vitákat, eszmecseréket. Vannak még tantárgyak, amelyekben van probléma az anyag feldolgozásával, az életkori sajátosságokhoz való igazítással. Nem értünk még munkánk végéhez, (talán nem is lenne jó, ha egyszer ezt mondanánk). Sokat tanultunk fizikát, kémiát, biológiát most is és a megelőző nyári iskolákon, az új anyagra való óráról órára való felkészüléseken, rendszeres összejöveteleinken. Új módszereket próbálunk ki óráinkon, amit egymástól vagy nemzetközi konferenciákon hallottunk. Nagykanizsán Abonyi Ivánné, a konferencia szervezője fogalmazta meg a búcsúesten azt, amit e kísérleti oktatásban a résztvevők tesznek, amit tenniük kell tanítványaik érdekében.

A búcsúestre összegyűlt résztvevők a kísérletben tanuló gyerekek legélesebb problémájáról a továbbtanulásról, a felvételi vizsgáról tartottak fórumot. A vita legforróbb pillanatában megérkezett: az Elefánt. Egy valódi, élő, kétéves elefánt bejött a kollégium pici ajtaján, és a hallban izgatottan várta a résztvevőket.

Szemfényvesztés, hatásvadászat? Valóban, volt hatás! Az első reakció a megrökönyödés, aztán lassan a felszabadulás, és sokunkban az önfeledt játék öröme a kilenc nap kemény munkája után. És később végig gondoltuk: Abonyi Magdinak egy délután 5-kor felvetődött ötlet alapján, hogy gólya és béka után jó lenne egy elefánt is, két órán belül sikerült előteremtenie Magyarország egyik vidéki városkájában egy valódi elefántot.

Vajon nem ugyanezt próbáljuk mi is megtenni az kísérletben? Nem ugyanúgy „elefánt-ötlet" volt-e az atomfizika elsős gimnazistáknak, a szerveskémia előbb, mint a szervetlen, vagy a mechanika dinamikával való kezdése? A kanizsai elefánt történetében nem az volt a nagyobb tett, hogy az elefántot sikerült behozni azon a picinyke ajtón, hanem az, hogy egyáltalán elindultak érte a cirkuszba.

Kanizsa óta, ha meglepően újjal szeretnénk érthetőbbé tenni a természetet a gyerekek számára, még ha csak apróság is az, magunk között azt mondjuk: „Van egy elefántom". A konferencia megszervezésén túl, elsősorban ezt a szavakkal el nem mondott, de munkánk hangulatának lényegét megfogalmazó estét köszönjük Abonyi Magdinak.

szi—tó

KALKULÁTOR ÉS MIKROKOMPUTER AVAGY DÁVID ÉS GÓLIÁT?

Csákány Antal
Központi Fizikai Kutatóintézet

Második ipari forradalomnak is nevezik azt a folyamatot, amely az elektronikában a közelmúlt esztendőkben végbement. Lényege röviden megfogalmazva mindössze annyi, hogy a félvezető technológiák kifinomodása következtében sikerül megbízhatóan és olcsón tízezernyi tranzisztorból álló szerkezeteket egyetlen áramköri tokban előállítani. És a szakma jóslással is foglalkozó képviselői szerint tíz év múlva már milliónyi tranzisztor kap helyet egy négyzetcentiméternyi felületen.

Hazai adottságaink (vagy nevezzük becsületesen elmaradottságnak?) következtében ezt a fejlődést csak távolról figyeljük, de többé kevésbé részesedünk áldásaiból. Mindenesetre két termékkel már valamelyest megismerkedtünk: a böröndök mélyéről előkerülő olcsó, sokat tudó kalkulátorokkal és a szakkörökben egyre nagyobb érdeklődést és izgalmat kiváltó mikrokomputerekkel (mikroprocesszorokkal).

A kalkulátor is programot hajt végre, és a mikrokomputer is kalkulálhat — feladataik tehát részben egybeesnek. Másrészt viszont a mikrokomputer szó általános célú, univerzális számítógépet sejtet. Hogy mi a kettő viszonya: hogy egymást felfaló speciesekről van-e szó; hogy a pénzünket dobáljuk-e akkor, ha kalkulátort vásárolunk az idén, mikor két év múlva mikrogépet vehetünk; — olyan kérdések, amelyekkel érdemes foglalkozni és a válaszadást megkísérelni.

Az összehasonlítást az idősebbel, a kalkulátorral kezdjük. Súlya, térfogata, konstrukciója elsősorban személyi használatra teszi alkalmassá. Számítási képességei állandóan rendelkezésre állnak, de ugyanakkor az egyik legkevésbé kihasznált eszköz, hisz általában ritkán és rövid ideig használja őket a tulajdonosuk. Sebessége munkanélkülivé teszi a fejszámolóművészeket. Ugyanúgy megtalálja helyét a zöldségüzletben, mint a tervezőirodák munkaasztalain. Egyre elterjedtebbek azok a típusok, amelyek nem csupán az alapműveleteket ismerik, hanem tudják a „középiskolai matematikát". Nagyon hasznosak a szerény keretek között programozható változataik is. Ez utóbbiak kivételével nagyon lényeges közös tulajdonságuk, hogy használatuk nem igényel különösebb előképzettséget, kezelésük teljesen magától értetődő. Előtanfolyamok nélkül is használhatók!

A kalkulátorok azonban nem csak munkaeszközök. Oktatási segédeszközként, tanszerként való felhasználásuk csábító, azonban korántsem problémamentes. Tömeges elterjedésük feltehetően vissza fog hatni a matematika-oktatásra is. Megfelelő életkorban, megfelelő ismeretháttérrel e komplex számoló pálcikák segítségével más értelmezéshez juthat a számelmélet vagy a függvénytan. — A zsebkalkulátorok kitűnő játékszerek is: trükköket lehet velük csinálni, pasziánszozni, vagy gondolkodtató társasjátékot játszani, — egyszóval agyat csiszolni. És közben megnyílik az az út a számítástechnikai ismeretek megszerzésére, amelynél kényelmesebb és szórakoztatóbb alig képzelhető el.

A kalkulátorok elterjedéséről hatalmas, profitéhes iparág gondoskodik. Becslések szerint minden negyedik amerikai családban van legalább egy kalkulátor. Úgy számítják, hogy 1980-ban a Földön több mint egy milliárd darab lesz használatban. Különleges típusokat konstruálnak: van karórába épített változat; terveznek olyat, amelyik gyártáskor behelyezett telepével évtizedekig működik és nincs kikapcsoló gombja; olyat, amelyik az eredményt hangosan közli stb. Elemiiskolás gyerekek részére sorozatban gyártanak olyan kalkulátorokat, amelyekkel nem lehet számolni, csupán a számítások eredményét ellenőrizni: helyes eredmény bebillentyűzése esetén jutamazóan, hibásnál haragosan pislog...

A mikrokomputerek táskányi méretű, nagyon komplex elemekből felépített teljes, vagy részleges számítógépek. Számítógép jellegük nem módosul annak következtében, hogy a tranzisztorok egymás közvetlen közelében szoronganak. Drága, — vagy csak sután használható — perifériális berendezések kellenek hozzájuk, de rövidebb—hosszabb, különböző célú programok hihetetlenül változatos felhasználási területeket jelölnek ki: bonyolult műszerek vezérlését végezhetik, gyártási folyamatrészeket koordinálhatnak, közlekedési csomópont forgalmát irányíthatják, zenei melódiák sorát állíthatják elő, vagy éppen a családi tv készülék felhasználásával sakkozhatunk velük stb. A mikroszámítógépek forradalmi volta nem létükben van, hiszen ugyanezeket a feladványokat eddig is megoldották a miniszámítógépek, hanem árukban. Egyszerű változataik 1—2 átlagos tv készülék árából beszerezhetők. Geometriai méreteik következtében könnyen „bebujhatnak" hagyományos műszereinkbe, eszközeinkbe, az „elosztott intelligenciájú" rendszerek széles választékát hozva létre.

Nagyon erősen ki kell emelni, hogy a mikrogépek (mikroprocesszorok) programokat igényelnek. Egy közepes kalkulátor funkcióinak előállításához mintegy ezer utasítást kell megírni. Ha két számot úgy akarunk összeszorozni, ahogy a legegyszerűbb kalkulátor is megteszi, órákat tölthetünk a programozással, persze csak akkor, ha egyébként már igen jól felkészültünk a gép utasításrendszeréből. E nehézségek oka az, hogy a mikroszámítógép néven jelenleg forgalombahozott eszközök egyszerűek, memóriájuk kicsi. Ezért magasabb szintű programnyelvek nem használhatók: gépi kódban pedig csak arcunk verítékével készíthetünk programokat.

A számítógépek eddigi fejlődése kifejezetten embercentrikus volt: egyre bonyolultabbak lettek a számítógépek azért, hogy az ember egyre könnyebben tudjon bánni velük. A mikrogépek, — legalábbis időlegesen — ilyen szempontból visszalépést jelentettek. Jól

látszanak azok a törekvések, amelyek a mikrogépeknek is meg akarják adni a magasabb szintű programnyelvek előnyeit. A fejlődés tendenciája nyilvánvaló: ezeket is BASIC, FORTRAN, vagy ALGOL nyelven fogjuk majd programozni (illetve a feladatok által igényelt speciális nyelveken).

A zsebkalkulátorok és a mikroszámítógépek között a programigény lényeges különbséget teremt. Ha a mikrogépek fognak ugyanannyiba kerülni, mint ma a kalkulátorok, akkor sem várhatjuk, hogy programírás tömegszenvedéllyé váljék. Családi és társas összejövetelek résztvevői sohasem fognak nekiesni a házi komputernek, hogy egy új algoritmussal dolgozzanak ki egy új társasjátékot. Gondoljunk csak a magnetofonra: szinte mindenki csak zenekonzervként használja, és alig akad, aki hang-fényképet, minihangjátékot készítene maga és mások örömére. Vagy vegyük az autót példának: elterjedésének kezeléséhez le kellett egyszerűsödnie, illetve kitűnően kezelheti olyan valaki is, aki a Bernoulli törvényről nem is hallott.

Mindezeket azért kell említeni, mert mikroszámítógépek elterjedésének vigiliáján prófétai felhívások hangzanak el a számítástechnikának közoktatási anyaggá való deklarálásáról. Közben sajnos nem esik szó arról, hogy nemzetközi tekintélyű számítástechnikai oktatásunk még a szakemberképzés feladatának is csak megszorításokkal tud eleget tenni, mert nem lehet a gyakorláshoz megfelelő mennyiségű gépidőt biztosítani. Az sem teljesen világos, hogy a közismereti tantárgyak milyekét kellene megnyirbálni ahhoz, hogy — nagy és gazdag nemzeteket megelőzve — az általános számítástechnikai oktatást célul tűzhessük. Gyermekeink nagyrésze az iskolái befejezésekor nem tud úszni, nem tud írógépen írni, nem tud autót vezetni. Tényleg a számítástechnika általános oktatása fogja országunkat az élvonalba lendíteni? És ki tudja, számítástechnikát oktatni nem sokkal nehezebb-e, mint kamaszgyerekeket pentaton dallamok dúdolására rászoktatni?

*

A bevezetőben feltett kérdésekre a felelet már kialakult. A kalkulátorok — mindannyiunk örömére — remélhetőleg életben maradnak, a számítógépek pedig hasznunkra és ismereteink fokozására egyre jobban elterjednek. A kalkulátorokat és bizonyos célszámítógépeket előismeretek nélkül is embermilliók fogják tudni kezelni — ahogy a háziasszonyok is a rendkívül bonyolult összetételű és hatásmechanizmusú mosóporokat. A számítógépekről azonban unokáink egészen mást fognak tudni, mint mi. Egyszerűbben, magától értetődőbben fogják használni őket, mert a számítógépek is változnak. A programozás fogalmával valószínű mindenki megismerkedik majd, de azért maradnak költők, írók, esetleg fizikusok is.

Dávid és Góliát pedig békességben élnek egymás mellett, míg valami újnak a kifejlesztéséhez nem segítik hozzá az emberiséget.

ESEMÉNYEK

A KÖZÉPISKOLAI MATEMATIKAI LAPOK FIZIKA PONTVERSENYÉNEK EREDMÉNYE

Az Eötvös-verseny eredményének kihirdetése után megtörtént a díjkiosztás a Középiskolai Matematikai Lapok Fizika Rovatának pontversenyén is. A fizika pontversenyen középiskolai tanulók vesznek részt osztályoknak megfelelően négy kategóriában. Az első osztályosok versenyére általános iskolai tanulók is jelentkezhetnek. Ezúttal 1176 tanuló (985 fiú és 191 lány) nevezett be 140 iskolából (ebből 24 iskola budapesti, a többi vidéki). Az osztályok szerinti megoszlás a következő: I. osztály 200, II. osztály 276, III. osztály 355, IV. osztály 334, általános iskolás 11. A Lap sajnos nem jut el eléggé az általános iskolákba. Még mindig nem kielégítő a lányok aránya, és nagymértékű a lemorzsolódás. A nevezőknek csak 37%-a dolgozik rendszeresen (435 tanuló, 390 fiú és 45 lány). Kevesen közelítik meg az elérhető legmagasabb pontszámot. A lányok hamarabb morzsolódnak le, mint a fiúk.

A pontverseny egyéni. A különböző kategóriákban első díjat nyertek: Szalontai László (Törökszentmiklós, Rózsa Ferenc téri Általános iskola), Kaufmann Zoltán (Vác, Sztáron Sándor Gimn.), Samu Péter (Csongrád, Batsányi János Gimn.), Kriza György (Budapest, Fazekas Mihály Gimn), Vankó Péter (Budapest, Móricz Zsigmond Gimn.), Kertay Zoltán (Budapest, Petőfi Sándor Gimn.), Harsányi Gábor (Budapest, Radnóti Miklós Gimn.).

A nevezők száma és a nyert összpontszám alapján élenjáró iskolák a következők:

Földes Ferenc Gimn., Miskolc	49 nevező	1337 pont
Verseghy Ferenc Gimn., Szolnok	27 nevező	729 pont
Fazekas Mihály Gimn., Budapest	24 nevező	776 pont
Gárdonyi Géza Gimn., Eger	22 nevező	540 pont
Batsányi János Gimn., Csongrád	18 tanuló	722 pont
Bethlen Gábor Gimn., Békéscsaba	17 tanuló	522 pont

A Lap által hirdetett kísérletező-kutató pályázatra 28 dolgozat érkezett, kétszerannyi, mint a múlt évben. A választott témák érdekesek, a kidolgozás lelkiismeretes volt. Kiosztásra került 6 első és 10 második díj. A díjakat a Magyar Tudományos Akadémia Atomagkutató Intézete és az Eötvös Loránd Fizikai Társulat adományozta 9000 Ft összegben. A legkiválóbb pályamunkákat szerzőik az Ifjúsági Ankéton nagy érdeklődés mellett bemutatták. A következő évi pályázatra sok érdekes terv érkezett. A tanulók eredményes kísérletező munkájának segítésére a Lap hónapról-hónapra rövidebb kísérleti feladatokat is közöl.

A tanév folyamán a téli és a tavaszi szünetben rendezett 3—3 napos ankétról, továbbá a július elején Budapesten tartott Nemzetközi Fizikai Diákolimpiáról más helyen részletesen beszámoltunk.

K. R.

A szerkesztésért felel: Turiné Frank Zsuzsa
Szerkesztőség: Budapest V., Anker köz 1, Eötvös Loránd Fizikai Társulat. Távbeszélő: 227-040
A kiadásért felelős: Siklósi Norbert igazgató
Kiadja a Lapkiadó Vállalat, Budapest VII., Lenin körút 9—11. Levélcím: 1906. postafiók 223 Távbeszélő: 221-293
Terjeszti a Magyar Posta. Előfizethető bármely postahivatalnál, a kézbesítőknél, a Posta hírlapüzleteiben és a Posta Központi Hírlap Irodánál (KHI, 1900 Budapest V., József nádor tér 1.) Közvetlenül vagy postautalványon valamint átutalással a KHI 215-96162 pénzforgalmi jelzőszámlára
Előfizetés egy évre 72,—Ft; egyes szám ára 6,—Ft. Megjelenik havonta
77.3791 Akadémiai Nyomda Budapest V., Gerlóczy utca 2. — Felelős vezető: Bernát György
Index: 25.289