

fizikai szemle

2020/7–8

5 μm

PRO URBE – FIZIKÁVAL A VÁROSÉRT

Nemzeti ünnepünk, március 15-e alkalmából Újbuda képviselő-testülete Pro Urbe Újbuda kitüntetést adományozott *Härtlein Károly* egyetemi mesteroktatónak, a minden korosztályt megszólító természettudományos szemléletformálás, a tudomány népszerűsítése, a közép- és felsőfokú fizikaoktatás, a tehetséggondozás terén végzett kimagasló munkája elismeréseként.

Härtlein Károly, a BME Demonstrációs Laboratóriumának vezetője a fizika jelenségeinek széleskörű és izgalmas bemutatása révén lett ország-szerte ismert. Az egyetem szenátusát idézve: „a fizikát tanító kollégák körében általánosan elfogadott az a megállapítás, hogy Härtlein Károly *Öveges József* professzor hagyományaihoz méltó tevékenységet végez a fizika népszerűsítéséért”.

1991 óta tagja az Eötvös Loránd Fizikai Társulatnak. Nevéhez köthető a Csodák Palotájában az Öveges József terem létrehozása, bemutatók megalkotása. 1994 óta a televíziós tudományos ismeretterjesztésben is részt vesz, a Magyar Televízió, a Duna TV, majd a Spektrum TV műsoraiban mutatott be látványos fizikai kísérleteket. Számptalan oktatófilmet, videobemutatót készített, amelyek jelentős számban hozzáférhetők a világhálón.

Részt vesz tanulmányi versenyek szervezésében, fizikatanárok továbbképzésében. 2005-ben indította útjára a „Kutatók éjszakája” rendezvényt.

Elismerései közül a legfontosabbak: a „Physics on Stage” European Science Teaching Award kitüntetés (2003), Prométheusz-díj „A fizikai gondolkodás terjesztéséért” (2005), Trefort Ágoston-díj (2017).



Augusztus 20-án, államalapításunk nemzeti ünnepén *Vastagh György*, a balatonfüredi Lóczy Lajos Gimnázium nyugalmazott fizika-matematika szakos tanára vehette át a Balatonfüred Városért – Pro Urbe-díjat.

Vastagh György az augusztus 20-i ünnepi díjátadón.



Fotó: Pesty Márton



Fotó: Tiltócsok György

Härtlein Károly újbudai alpolgármesterek társaságában a júliusi díjátadón.

Vastagh György meggyőződése szerint a természettudományos tantárgyak olyan tudományos gondolkodásmódot alakítanak ki, amely az embert egy életen át elkíséri. Nem csak kiváló szaktanár, hanem odaadó nevelő és gondoskodó osztályfőnök is volt. Számos tanítványa szeretettel és tisztelettel emlékezik rá.

Gimnáziumi tanárként nemzetközi szinten is foglalkozott a fizikatanítás módszertanával és problémáival, valamint az atomenergia és a környezet kapcsolatával. Kezdetektől részt vett az 1970-es évek második felében zajlott MTA Oktatási Kísérletben. Több mint 20 szakmai és módszertani ismeretterjesztő cikke jelent meg országos és megyei szaklapokban, valamint konferenciakiadványokban.

Kiváló kapcsolatot ápolt jeles fizikusokkal, ennek köszönhetően a Tagore sétányon az évek során létrejött a Nobel-díjasok ligete, ahol számos magyar és külföldi Nobel-díjas fizikus, matematikus ültetett emlékfát. Sikerral emelte fel szavát, amikor butikok telepedtek a nemzetközi híru kutatók által ültetett fák területére, közbenjárásának köszönhetően a balatonfüredi önkormányzat helyreállította a rendet, megőrizve a liget méltóságát.

Több országos tudományos-oktatási szakmai társaság tagja. 1996-tól 1998-ig az Eötvös Loránd Fizikai Társulat Veszprém megyei csoportjának elnökségi tagja. 1991–2000 között a Magyar Nukleáris Társaság Tanár Tagozatának elnöke. A kezdetektől aktív tagja volt az Országos Szilárd Leó Fizikaverseny versenybizottságának.

Munkássága során többször részesült elismerésben: az Oktatásügy Kiváló Dolgozója (1976), Veszprém Megyéért Érdemérem (1977), Mikola Sándor-díj (1985), Kiváló Tanár (1986), Balatonfüred kultúrájáért díj (1995), Rátz Tanár Úr Életmű-díj (2008), Tanári Delfin Díj (2015).

Gratulálunk a megérdemelt kitüntetésekhez!



A 2020-AS DUPLASZÁM ELÉ

A nyár végén megjelenő duplaszámunk, már terjedelménél fogva is, a szokásos számoknál általában szélesebb és vegyesebb tartalommal jelenik meg. Így van ez ebben az esetben is. Induló összeállításunk Nagy Elemér professzor emléke előtt tiszteleg születésének 100. évfordulója alkalmából. Az összeállítás cikkeiből talán nem jön le annyira, de akik az ő vezetése alatt, vagy az ő környezetében dolgoztak, tudják, hogy a „nehéz emberek” kategóriájába tartozott, gyors gondolkodása és véleményének megalkuvás nélküli kimondása okán. *Sólyom Jenő* cikkében írja le a Nagy Elemér-féle Kísérleti Fizika Tanszék megalakulásának történetét az ELTE-n. Ezen a tanszéken a hazai szilárdtest-fizikai és anyagtudományi kutatások számos meghatározó egyéniségének tevékenysége bontakozott ki és a tanárképzés kísérleti és szakmódszertani része is itt folyt. Később ebből a tanszékből alakult meg az Általános Fizika és a Szilárdtest-fizika Tanszék, majd ezek újraegyesülése után az Anyagfizikai Tanszék. Így stílszerű, hogy az összeállítást éppen az Anyagfizikai Tanszékről származó cikk követi, amelyben az anyagkutatás egyik igen dinamikus területéről, az amorf fémötvözetek fizikájáról és a még mindig számos nyitott kérdést tartalmazó mechanikai viselkedésükről olvashatunk.

A Tokai-to-Kamiokande (T2K) kísérlet nemrég tette közzé, hogy a neutrínók ízatalakulásaik során (a leptonok közül először) a CP-szimmetriasértés jeleit mutathatják. *Radics Bálint* írásából megérthetjük, hogy az eredmény alapvető jelentőségét az adja, hogy az anyag-antianyag aszimmetria kialakulásának egyik lehetséges magyarázata olyan elemi folyamatok létezése, amelyekben fellép a CP-szimmetriasértés. A T2K eredményei arra utalnak, hogy a neutrínóknál észlelt CP-szimmetriasértés elegendően nagymértékű lehet ahhoz, hogy a nagy méretskálán tapasztalt anyag-antianyag aszimmetriát megmagyarázza. Ez a kísérleti megfigyelés Nobel-díjesélyesnek tűnik, feltéve, hogy további, részben máshol folyó mérések is megerősítik.

A fizika szempontjából fontos eredményeik mellett a lenyűgöző irányítás- és észleléstechnikai csúcsteljesítmények megismerése miatt is nagyon érdekesek a BepiColombo űrmisszióról, illetve az LHC ALICE kísérletről szóló írások.

Az elmúlt néhány héten több olyan írás is érkezett szerkesztőségünkhöz, amelyek a fizikaoktatás nehézségeivel foglalkoznak és javaslatokat tartalmaznak ezek kezelésére. Ezeket a mostani számtól kezdődően a „Vélemények” rovatunkban tervezzük közzétenni. Mint ilyen esetekben szokásos, most is azzal a megjegyzéssel, hogy ezek a vélemények nem feltétlenül, vagy nem teljes mértékben tükrözik a Szerkesztőség álláspontját. Örülnénk, ha – elsősorban tanítási gyakorlattal rendelkező kollégáktól – visszajelzéseket kapnánk ezen írásokra, de természetesen más is kifejtheti véleményét. Elsőként, a beérkezés sorrendjének megfelelően, ebben a számunkban *Radnóti Katalin* írása jelenik meg.

A „Tanítás” területéről szóló cikkek is figyelemreméltóak. A *Bokor Nándor* által ismertetett, videóban is bemutatott bűvészmutatvány és a jelenségekhez adott magyarázat nagyon látványos és tanulságos. *Schramek Anikó* tanárnő középiskolai atomfizika-oktatásról szóló gondolatai és javaslatai számos hasznos ötletet adhatnak. Őt egyik tanítványa, *Matolcsi Dávid* írása követi (bár témájában nem csatlakozik a tanárnő írásához). A cikk érdekesen tükrözi egy tehetséges középiskolás diák sajátos szemlélet- és írásmódját. A Szilárd Leó Fizikaverseny feladatainak ismertetését is minden bizonnyal jól lehet hasznosítani az oktatásban.

Nyári szám lévén több „színes”, vagy viszonylag könnyebb olvasmányt jelentő írásnak is helyt adunk: így ajánljuk a csillagképek anatómiájáról és az Eötvös-kiállításokról szóló cikkeket. A fizika keresztretjvényvel és a tudományos viccekkel pedig reméljük, kellemes szórakozást nyújtunk olvasóinknak.


Lendvai János
főszerkesztő

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

A Matematikai és Természettudományi Értesítőt az Akadémia 1882-ben indította
A Matematikai és Fizikai Lapokat Eötvös Loránd 1891-ben alapította

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat havonta megjelenő folyóirata.

Támogatók: a Magyar Tudományos Akadémia Fizikai Tudományok Osztálya, az Emberi Erőforrások Minisztériuma, a Magyar Biofizikai Társaság, a Magyar Nukleáris Társaság és a Magyar Fizikushallgatók Egyesülete

Főszerkesztő:

Lendvai János

Szerkesztőbizottság:

Biró László Péter, Czitrovszky Aladár, Füstöss László, Gyürky György, Hebling János, Horváth Dezső, Horváth Gábor, Iglói Ferenc, Kiss Ádám, Koppa Pál, Ormos Pál, Papp Katalin, Simon Ferenc, Simon Péter, Sükösd Csaba, Szabados László, Szabó Gábor, Takács Gábor, Trócsányi Zoltán, Ujvári Sándor

Műszaki szerkesztő:

Kármán Tamás

A folyóirat e-mailcíme:

szerkesztok@fizikaiszemle.hu

A lapba szánt írásokat erre a címre kérjük.

A beküldött tudományos, ismeretterjesztő és fizikatanítási cikkek a Szerkesztőbizottság, illetve az általa felkért, a témában elismert szakértő jóváhagyó véleménye után jelenhetnek meg.

A folyóirat honlapja:

<http://www.fizikaiszemle.hu>



A címlapon:

Tömbi fémüvegek szobahőmérsékletű deformációja inhomogén módon megy végbe, a képlékeny deformáció általában nagyon keskeny nyírási sávok formájában lokalizálódik, miközben az anyag térfogatának jelentős része semmilyen átalakuláson sem megy át. Két ilyen egymást metsző deformációs sáv több közel párhuzamos sávot hoz létre, majd ezek a sávok kölcsönhatásuk következtében újra egy sávvá állnak össze. (Lásd az írást a 231. oldalon.)

TARTALOM

<i>Lendvai János:</i> A 2020-as duplaszám elé	217
<i>Radnai Gyula:</i> Nagy Elemér 100	219
<i>Gazda István:</i> Emlékeim Nagy Elemérről	222
<i>Staar Gyula:</i> A tényeket tisztelő professzor	225
<i>Gyulai József:</i> Nagy Elemér (1920–2000)	226
<i>Sólyom Jenő:</i> Nagy Elemér és az ELTE I. számú Kísérleti Fizikai Tanszéke	227
<i>Kovács Zsolt, Révész Ádám:</i> Amorf fémötvözetek	231
<i>Bebesi Zsófia, Dósa Melinda, Jubász Antal, Kecskeméty Károly, Németh Zoltán:</i> A BepiColombo űrmisszió mérföldkövei és tudományos célkitűzései a Merkúr bolygónál	236
<i>Radics Bálint:</i> A CP-szimmetriasértés kísérleti megfigyelése neutrínó-ízoscillációkban	245
<i>Frajna Eszter, Vértesi Róbert:</i> Nehéz kvarkok keletkezése az LHC ALICE kísérleténél	249
<i>Kutrovácz Gábor:</i> A csillagképek anatómiája	255
<i>Körmendi Alpár:</i> Eötvös Loránd emlék-kiállítások, 1970–1998	261

VÉLEMÉNYEK

<i>Radnóti Katalin:</i> A fizikaoktatás kálváriája a rendszerváltás óta	265
---	-----

A FIZIKA TANÍTÁSA

<i>Bokor Nándor:</i> Bűvésztürek labdával	273
<i>Schramek Anikó:</i> Néhány gondolat az atomfizika középiskolai tanításához	277
<i>Matolcsi Dávid:</i> A Lorentz-erő levezetése a speciális relativitáselméletből	283
<i>Sükösd Csaba:</i> A XXII. Országos Szilárd Leó Fizikaverseny – 1. rész	286

SZÓRAKOZTATÓ FIZIKA

<i>Horváth Dezső:</i> Humor a tudományban, tudomány a humorban	291
<i>Kiss Jolán:</i> Rejtélyes fizika	292

HÍREK – ESEMÉNYEK

Pro urbe – fizikával a városért	217
Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat Küldöttgyűlése	244

<i>J. Lendvai:</i> The 2020 double issue	
<i>Gy. Radnai:</i> Elemér Nagy 100	
<i>I. Gazda:</i> My memories of Elemér Nagy	
<i>Gy. Staar:</i> A professor respecting the facts	
<i>J. Gyulai:</i> Elemér Nagy (1920–2000)	
<i>J. Sólyom:</i> Elemér Nagy and the I. Department of Experimental Physics of ELTE	
<i>Zs. Kovács, Á. Révész:</i> Amorphous metallic alloys	
<i>Zs. Bebési, M. Dósa, A. Jubász, K. Kecskeméty, Z. Németh:</i> Milestones and scientific objectives of the BepiColombo space mission at the planet Mercury	
<i>B. Radics:</i> Experimental observation of CP symmetry violation in neutrino flavor oscillations	
<i>E. Frajna, R. Vértesi:</i> Generation of heavy quarks in the LHC ALICE experiment	
<i>G. Kutrovácz:</i> Anatomy of constellations	
<i>A. Körmendi:</i> Roland Eötvös memorial exhibitions, 1970–1998	

OPINIONS

<i>K. Radnóti:</i> The calvary of physics education starting from the change of political system	
--	--

TEACHING PHYSICS

<i>N. Bokor:</i> Magic trick with a ball	
<i>A. Schramek:</i> Some ideas for teaching atomic physics in high school	
<i>D. Matolcsi:</i> Derivation of the Lorentz force from the special theory of relativity	
<i>Cs. Sükösd:</i> The 22 nd Szilárd Leo National Nuclear Study Competition – Part 1	

FUN PHYSICS

<i>D. Horváth:</i> Humor in science, science in humor	
<i>J. Kiss:</i> A physics puzzle	

EVENTS

Fizikai Szemle
MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

megjelenését támogatják:



Száz évvel ezelőtt, 1920. március 30-án született és 2000. február 29-én hunyt el Nagy Elemér professzor, mérnök-fizikus, egyetemi tanár.

A *História Tudósnaptárban* ezt olvashatjuk róla:

„Már Faragó Andor is négy éven át közölte fényképét a *Középiskolai Matematikai és Fizikai Lapokban*. Mérnöki diplomájának megszerzésével párhuzamosan 1943-tól 1956-ig lumineszcencia- és elektrolumineszcencia-kutatásokat végzett az Egyesült Izzóban. Közben 1951-ben kandidátusi, 1956-ban doktori fokozatot szerzett fizikából. 1952-től 1956-ig a Miskolci Nehézipari Egyetemen tanított, 1956-ban az ELTE Kísérleti Fizika tanszékén lett tanszékvezető egyetemi tanár. Itt főleg a szilárdtest-fizikai kutatásokat támogatta, a fizikatanárok egyetemi képzésének koordinálását *Párkányi Lászlóra* bízta. 1974–87 között az MTA Műszaki Fizikai Kutatóintézetének volt az igazgatója. 1973-ban lett az MTA levelező, 1995-ben pedig rendes tagja. Különleges, kreatív gondolkodása, váratlan ötletei nemcsak szorosán vett szakterületén, hanem még szabadalmi jogi területen is szép sikereket hoztak számára. Szenvedélyes bridszjátékos volt.”

Most öten emlékezünk rá: Nagy Elemér két beszédének és diákéveinek felidézése után, *Gazda István* a különleges emberre, *Staar Gyula* a tényeket tisztelő professzorra emlékezik, majd *Gyulai József* húsz évvel ezelőtti búcsúztató szavait idézzük fel a *Magyar Tudomány* 2000. szeptemberi számából. Végül *Sólyom Jenő* Nagy Elemér szerepét idézi fel az ELTE I. Kísérleti Fizika Tanszék létrejöttében.

1950-ben alapította az Eötvös Loránd Fizikai Társulat a Schmied Rezső- és a Bródy Imre-díjat fiatal egyetemi és ipari kutató fizikusok számára. A Schmied Rezső-díjat az akkor 28 éves *Hoffmann Tibor* kapta, a Bródy Imre-díjat az akkor 30 éves Nagy Elemér, aki a díj ünnepélyes átadásakor a következő szavakkal köszönte meg a díjat, amelyek azután az ugyancsak 1950-ben alapított *Fizikai Szemle* 2. számában jelentek meg, 1951 júliusában:

„Tisztelt Elnökség, tisztelt hallgatóság!

Mély megrendüléssel és alázattal veszem át ezt a díjat, amely a mártírhalált halt nagy magyar fizikus, *Bródy Imre* nevét viseli. Alázattal azért, mert munkáim, amelyben a kitartás és a szerencse is szerepet



Radnai Gyula ny. egyetemi docens, a fizikai tudományok kandidátusa, matematika-fizika tanári szakon végzett 1962-ben. Az ELTE Kísérleti Fizika tanszékén kapcsolódott be a tanárképzésbe, a fizika hazai kultúrtörténetének kutatásába pedig *Simonyi Károly* ösztönzésére fogott a '70-es években. *Physics in Budapest* című – *Kunfalvi Rezsővel* közös – könyve, valamint a *Fizikai Szemlében* és a *Természet Világában* megjelent számos, ma már az interneten is elérhető publikációja hitelesíti ezt a tevékenységét.

játszott és ha jelentettek is bizonyos előrehaladást és új tények megállapítását, területük szűk volta és az elméleti kérdések másodsorba állítása miatt is csak kezdetet jelenthetnek. Mélyen megrendülve veszem át a díjat, mert személyesen ismertem Bródy Imrét, számtalanszor volt alkalmam vele beszélni és tanulni tőle, megtanultam tisztelni, mint nagytudású fizikust, becsülni, mint egyenes, meg-nem-alkuvó embert, szeretni, mint jó embert, elbúcsúzni tőle, majd félév múlva meghallani vértanúhaláláról a fasiszta pribékek megsemmisítő táborában. Úgy érzem, nem múlhat el ez a nap anélkül, hogyha nem is teljességgel és kompetencia nélkül, de meg nem emlékeznénk életéről és munkásságáról.

1892-ben született, fizikusi pályafutásának legjellemzőbbje, hogy egy kezdetben olyannyira szövevényesnek látszó problémát mindig le tudott egyszerűsíteni a helyes fizikai alapokra, már fiatal korában megnyilvánult. Az alapkérdéseket kutatta, ezért fordult már középiskolás korában a termodinamika felé, amit 18 éves korára teljesen elsajátított. 1919-ben a Tudományegyetemen oktatott, a Tanácsköztársaság megdöntése után Göttingenben dolgozott, *Max Born* mellett, önálló és Bornnal közösen írt dolgozataiban a termodinamikát alkalmazta szilárd testek statisztikai tárgyalására. Born annyira nagyra becsülte, hogy a *Zeitschrift für Physik* szerkesztői tisztségét teljesen órá bízta. 1923-ban tüdőirritációt kapott és orvosai tanácsára hazajött Magyarországra, ahol az Egyesült Izzó kutatólaboratóriumába lépett be. Itt újfajta problémákkal találkozott, de ezek csak megfogalmazásban voltak újak, megoldására megint a termodinamika mutatta az utat.

Fő munkássága az izzólámpák gázviszonyainak tisztázására irányult. A wolfram-fém párolgási törvényszerűségeit vizsgálva, megvetette az izzólámpák méretezésének fizikai alapjait. Későbbi kutatásaival megállapította, hogy az izzólámpa határfokát több tényező befolyásolja, a töltőgáz hővezetésén kívül az úgynevezett Langmuir–Soret-effektus is, azaz a különböző atomsúlyú gőzök keverékének olyan szétválogatódási tendenciája, hogy a nagyobb súlyú gőz a hidegebb, a kisebb súlyú a melegebb helyen legyen. Megállapította, hogy az eddig ismert argontöltésnél előnyösebb a krypton-töltőgáz használata. Az előkísérletek a számításokat igazolták. Ugyanekkor felmerült egy probléma: miképpen lehet a levegő milliomod részét képező kryptont a levegőből rentábilis módon kinyerni? Ezt a feladatot megoldotta, olyannyira, hogy a körülbelül 4000 pengős literenkénti ár lecsökkent 4 pengőre. Ezen előállítással kapcsolatban pontosan mérte a levegő Kr-tartalmát és eljárást dolgozott ki egyes veszélyt jelentő szénhidrogének adszorpciók eltávolítására.

Sokat foglalkozott a Langmuir-réteg problémájával. Ezen, előtte hipotetikusnak gondolt réteget, mely az izzólámpa izzószálának közvetlen környezetét képezi

és bizonyos mértékben ionizált gázt tartalmaz, kísérlettel kimérte. Szívesen foglalkozott kristálykémiával, több vegyület rácsenergiáját állapította meg. Nem publikált munkájában elméleti alapon rámutatott arra, hogy az oxidkatód alacsony kilépési munkája minden valószínűséggel a BaO sajátsága, ahogyan ezt legutóbbi években megállapították. Az utolsó éveiben egy tervezett magyar fizikakönyv számára írta meg a termodinamikai részeket, mint egyetlen nem egyetemi tanár és mint egyetlen üldözött. Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat évente Bródy Imre-díjjal jutalmaz egy iparban dolgozó fiatal fizikust. Ezen első díjkiosztó ünnepség gyűjtsa fel az emlékezés mécsét Bródy Imre jeltelen sírján és lelkesítse a magyar fizikusokat az ő szellemében további eredményekre.”

Csaknem három évtizeddel később, 1978-ban így búcsúzott el Nagy Elemér egykori főnökétől és jótévőjétől, *Szigeti Györgytől*:

„Harminchat éve ismertelek meg, sorsunk egyszer összekapcsolódott, majd elvált és végtére megint összejöttünk. Tanítottál engem, mint ahogyan sok más is tanítottál, de nem harsány teátrális gesztusokkal alkalmi vizsgákra, hanem csendesen, meggyőződésből fakadó néhány megjegyzéssel, az élet teljességére. Az ilyen tanítás megértésére idő kell, de hatása maradandó. Óriási klasszikus műveltséggel műszaki ember voltál, szeretted ezt a szerény, dolgozó, nem hivalkodó Újpestet, ahol életed legnagyobb részét leélted.

Szeretted a munkát, a hasznos dolgokat előállító embereket, kívántad a jobbat, a műszaki és a társadalmi fejlődést. Szeretted hazádat és dolgoztál érte. A Te feladatod az volt, hogy a gyárban a tudomány és technika legújabb eredményeit honosítsd meg, erősödjön meg a gyár, a világon mindegyikkel egyenlő legyen. Te voltál az első, aki a Magyar Tudományos Akadémián műszaki kutató intézetet szervezett meg, a Műszaki Fizikai Kutató Intézetet. Létrehoztad az alaptudomány és a műszaki alkalmazás megbonthatatlan egységét, Te jelölted ki a kutatóink célját és munkamódszerét; mélyüljenek el a legelvontabbnak tűnő alap kutatásban, ugyanakkor ellenőrizzék ismereteiket, sőt mérítsenek ötleteket is a termelés mindennapos gyakorlatából amely mögött a természeti törvények mozgatóereje áll, de hogy azok részleteikben hogyan működjenek, arra kell a feleletet keresni és ennek alapján jobb és jobb technológiákat, termékeket kidolgozni.

Amikor egy tanító, barát, főnök az élet kéréllhetetlen törvényének engedelmességgel eltávozik körülünk-

ből, egy pillanatra megáll az élet a csapás súlya nyomán. Utána megindul, de akik a munkát tovább viszik, biztosan nagyobb öntudattal és akarattal fogjuk csinálni, mert tudjuk, hogy meg kell kísérelnünk a tanácsaid, tapasztalatod kristálytisztá világnézeted segítségével nélkül az Általad kijelölt úton haladni. Csak a testedtől búcsúzom, szellemed mindörökké köztünk marad, eredményeink a Tied.”

Így fogalmaz egy fizikus? Egy ízig-vérig műszaki ember?

Az igazi, helyes válasz megtalálásához érdemes visszatekintenünk Nagy Elemér ifjú korára, diákéveire, amikor nemcsak matematikai gondolkodása és fizikai érdeklődése, de humán műveltsége is kifejlődött – nagyszerű tanárainak köszönhetően.

Nagy Elemér, a diák

Tíz éves korában Nagy Elemért egy olyan gimnáziumba írták be Budán, amelynek akkoriban készült el gyönyörű, új épülete az 1929-ben új nevet kapott Szent



A gimnazista Nagy Elemér.

Imre herceg úton. Ezt az utat 1953 óta megint Villányi útnak hívják, az iskola pedig ma újra Budai Ciszterci Szent Imre Gimnázium. 1950-től 1997-ig működött itt a József Attila Gimnázium.

A ciszterci rend régi álma volt, hogy Budapesten nyisson gimnáziumot, ez először 1912-ben sikerült *Békefi Remig* apát hathatós közbenjárására – akkor még „albérletben”, a Váli-utcai elemi iskola III. emeletén. *Klebsberg Kuno* kultuszminiszter, egykor maga is ciszterci diák, jelentős állami támogatásról gondoskodott ahhoz, hogy 1927-ben elkezdődhessen az új, korszerű iskolaépület felépítése, s az építkezés két év alatt be is fejeződjön. Az iskola igazgatója már 1912 óta *Bitter Illés*

német-latin szakos cisztercita tanár volt, akit még *Békefi Remig* választott ki erre a tisztségre, és akinek német nyelv és irodalom tankönyveit kiterjedten használták az egész országban. Tudjuk, hogy egy iskola szellemére nagy hatással van az igazgató személyisége, de rajta múlik végső soron az is, kiket vesz fel az iskola tanulói közé.

1930-ban, amikor Nagy Elemér megkezdte első osztályos tanulmányait ebben a nyolc osztályos fiúgimnáziumban, 76 osztálytársa volt! Osztályfőnöke az akkor 40 éves *Brisits Frigyes* ciszterci szerzetes, magyar-latin szakos középiskolai tanár, irodalomtörténész lett, aki már 24 évesen doktorált, majd akit, mint elismert Vörösmarty kutatót, 44 éves korában az MTA



Blahó Miklós



Bodó Zalán



Gáspár Rezső



Harsányi János



Hoffmann Tibor



Nagy Elemér



Somogyi Antal



Somogyi Éva



Szele Tibor



Vargha Tamás

Néhányan a KöMaL legeredményesebb megoldói közül az 1935–1938-cal zárult tanévekből (<http://db.komal.hu/scan/tablo/>).

levelező tagjává választottak. (Nagy Elemér ekkor fejezte be a negyedik osztályt.) Brisits Frigyes végig megtartotta középiskolai tanári állását: nyolc éven át az osztályfőnökük maradt, s a kezdő 77 tanuló közül 45-öt az érettségiig vezetett! Érdeemes belegondolni: 44 olyan osztálytársa volt Nagy Elemérnek, akivel nyolc éven keresztül járt együtt, megosztva velük az iskolai élet minden örömét és bánatát. Eközben végig, minden évben színjeles bizonyítványa volt, ami azért nem semmi.

Kik voltak Nagy Elemér osztálytársai ebben a gimnáziumban? Az osztálynévsorokat az évről évre kiadott értesítők tartalmazzák, amelyek ma már a gimnázium honlapján is elérhetők. Az interneten rákeresve ezekre a nevekre, több mérnökkel, orvossal, jogással, de katonával is találkozhatunk, ami – tekintettel a második világháborúra – persze nem meglepő. Az Országos Traumatológiai Intézet orvosa lett *Szinay Gyula*, vegyészmérnök *Sarkadi János*, élelmiszerkémikus *Törley Dezső*, mezőgazdasági mérnök *Kolossváry Szabolcs*, építészmérnök *Gettstein János*, szociográfus lett *Márkus István*, ügyvéd, jogtanácsos *Szálka Béla*, aki a 70-es években aktívan szervezte a TIT-ben a tudományos fantasztikus irodalmat kedvelők körét, azután 1996-ban még segítette újraindítani a Szent Margit gimnáziumot a szomszédban, a volt Kaffka Margit gimnázium épületében. Amilyen sokféle családból jöttek, olyan sokféle hivatást választottak érettségi után, de az iskolában egyenrangúakként kezelték őket. Egyetlen tantárgy volt csak, amelyben az egyik diák kiugróan jól teljesített, de ezt a tárgyat kiugróan jó tanár is tanította. Ez a tantárgy a matematika volt, a kiugróan jó diák Nagy Elemér, a kiugróan jó tanár pedig *Hadarits Vendel* ciszterci szerzetes.

Hadarits Vendel öt évvel volt fiatalabb Brisits Frigyesnél. 1930-ban, abban az évben alapította a gim-

náziumban a Matematikai és Fizikai Kört, amikor Nagy Elemér az iskola tanulója lett. Ez a kör a VII. és VIII. osztályosok számára kínált lehetőséget a matematika és a fizika elmélyítésére, de Nagy Elemér már V. osztályos korában a Kör tagja, VI. osztályosan pedig a Kör könyvtárosa lehetett. Az 1934/35-ös tanévben ismertette meg Hadarits Vendel Nagy Elemérrel a *Középiskolai Matematikai és Fizikai Lapokat*, amelynek nemsokára szorgalmas olvasója és feladatmegoldója lett. Faragó Andor, a *Lapok* szerkesztője, már az V. osztályos Nagy Elemér fotóját is közzölhette a legtöbb jó megoldást beküldőké között, 1935 májusában, mivel ebben a tanévben már 30 gyakorlat és 2 feladat megoldását kapta meg tőle. Ez a tanévvégi fénykép-összeállítás Faragó Andor saját kezdeményezése volt, sok kiváló diáknak szerzett ezzel olyan örömet, amelyre felnőttként is büszkén emlékeztek vissza.

A VI. osztályos Nagy Elemér 47 gyakorlat és 61 feladat megoldását küldte be, miközben csak idegen nyelvekből heti 5 óra latin, 6 óra görög és 3 óra német volt a 68-as létszámú VI. osztályban... Hadarits tanár úr három hetenként tartotta a Matematikai és Fizikai Kör gyűléseit délután – hol máshol? – a fizikai előadóteremben, mintegy harminc diák számára. Ő maga a tanév során egy alkalommal bemutatásokkal kísért ismeretterjesztő előadást is tartott felnőttek számára *Kísérletek a rádióaktivitás köréből* címmel.

A VII. osztályos Nagy Elemér már a Matematikai és Fizikai Kör jegyzője lett. A könyvtárosi tisztséget osztálytársa, *Mezey Géza* vette át. Ebben a tanévben már minden második pénteken délután 5 órától volt a foglalkozás, amelyen a diákok tartottak előadást izgalmas matematikai vagy fizikai témákból. Nagy érdeklődés nyilvánult meg az atomfizikai témák iránt, Nagy Elemér volt a legszorgalmasabb előadó. Ugyanakkor már csak 3 gyakorlat és 21 feladat megoldását

küldte el Faragó Andornak. Megkezdődött a fizika oktatása is a 66-ra csökkent létszámú osztályban, heti 4 órában. A fizikát azonban nem Hadarits Vendel tanította, hanem hét évvel fiatalabb szerzetes társa, *Lovas Ambró*. Ő vezette az ehhez kapcsolódó laboratóriumi gyakorlatokat is, amely nem volt kötelező. Nagy Elemér nem is járt rá. Hadarits Vendel pedig már nemcsak ismeretterjesztő előadást tartott, most *Aerodinamikai kísérletek forgókészülékkel* címmel, de *Rezonancia-jelenségek vasmagos tekercset tartalmazó rezgőkörökben* címmel cikket is közölt a *Fizikai és Kémiai Lapokban*.

A VIII. osztályos Nagy Elemér lett a Matematikai és Fizikai Kör elnöke! Jegyzővé Mezey Géza lépett elő, aki Lovas Ambró nagy örömeire megnyerte a tanulmányi versenyt fizikából. Lovas Ambró vezette a sakk-kört is az iskolában, amelynek több mint 60 tagja volt. És ki lett a sakk-kör ifjúsági elnöke ebben az évben? Nagy Elemér. Faragó Andor még ezen tanév végén is közölte a fényképét a *Lapokban*, miközben a 65 nyolcadikos diák már javában készült az érettségire. 12-en érettségiztek kitüntetéssel, egyikük volt Nagy Elemér. Görögből már nem kellett, helyette franciából érettségizett. Magyarból az írásbeli érettségi témája: *A magyar nemzet sorsdöntő kérdései irodalmunkban*. 1938-at írtunk, ez volt az eucharisztia éve, ekkor lett kész a katolikus templom a gimnázium mellett.

Érdeemes felidézni, kikkel versenyzett Nagy Elemér a *Középiskolai Matematikai és Fizikai Lapokban*. Kik-

nek a fényképét közölte Faragó Andor a *Középiskolai Matematikai és Fizikai Lapok* tanév végi, májusi számának végén? Kiragadtunk Nagy Elemérről együtt ötöt nevet évenként, álljanak itt abc sorrendben:

1935: *Bodó Zalán, Harsányi János, Nagy Elemér, Szele Tibor, Varga Tamás*.

1936: *Bodó Zalán, Nagy Elemér, Somogyi Antal, Somogyi Éva, Szele Tibor*.

1937: *Blahó Miklós, Bodó Zalán, Harsányi János, Nagy Elemér, Somogyi Antal*.

1938: *Bizám György, Gáspár Rezső, Hoffmann Tibor, Nagy Elemér, Somogyi Antal*.

Bodó Zalán Nagy Elemér jó barátja, brizspartnere lett, akivel együtt diplomázott a Műszaki Egyetem Gépészmérnöki Karán, majd mindketten a Tungstram munkatársaiként érték el első sikereiket a fizikusi pályán. Blahó Miklós a Műegyetemen, Somogyi Antal az egyetemi gyakorlóiskolában, testvére, Somogyi Éva, mint *Tóth Pál Sándorné* az ELTE demonstrációs laborjában lett megbecsült oktatója a fizikának. Hoffmann Tibor Budapestről, Gáspár Rezső Debrecenből publikálta elméleti fizikai cikkeit rangos nemzetközi folyóiratokban. És akik matematikusok lettek? Szele Tibor Szegedről gyakorolt átütő hatást a hazai algebrai kutatásokra, Bizám György izgalmas logikai problémákat tárgyalt meg diákoknak írt munkáiban, Varga Tamás megreformálta a matematika hazai oktatását. Kell még bizonyíték e generáció tehetségére? Harsányi János Nobel-díjas lett, q.e.d.

EMLÉKEIM NAGY ELEMÉRRŐL

Gazda István

Magyar Tudománytörténeti és Egészségtudományi Intézet, Budapest

Nagy Elemért, azaz Elemér bácsit, kissrác korom óta ismertem. 1948-ban születtem, s talán 4 éves korom óta emlékszem rá és családjára, fiára, nevelt lányára, unokájára. Nagyon sok időt töltött nálunk, s mi is náluk.

Hogy miért? Mert édesapámmal, *id. Gazda István*-nal együtt brizzsversenyzők, bélyeggyűjtők és szabadalmi szakértők voltak. És mindegyiket nagyon komolyan művelték. Fiatal koruk óta barátok voltak, s ez Nagy Elemér élete végéig fennmaradt. (Édesapám néhány évvel élte túl őt.)



Gazda István (Budapest, 1948) tudománytörténész, a történelemtudomány kandidátusa, a Magyar Tudománytörténeti Intézet igazgatója. Nagyszámú tudománytörténeti munkát rendezett sajtó alá a *Magyar Tudománytörténeti Szemle Könyvtára* sorozat főszerkesztőjeként. Legismertebb fizikátörténeti kötete: *Einstein és a magyarok. Szakírók, bölcselek, publicisták a relativitáselmélet büvöletében 1905–1945*. Akadémiai Kiadó, Budapest (2004) 734 old.

Elemér bácsi, vagyis a professzor úr, egy budai, nem saját tulajdonú villaépület első emeleti szintjén élt feleségével, fiával és örökbefogadott lányával együtt. (Mellesleg: felesége rokonságban állt *Gerster Bélával*, a korinthoszi csatorna építését irányító magyar mérnökcsapat neves vezetőjével.) Nagyon szerény körülmények között éltek, s nem volt túl jó állapotban az épület sem. Nem akart erre költeni, holott a fűtésrendszer felújításra szorult volna, így inkább cserépkályhával fűtöttek. A földszinten lakó családoknál is voltak srácok, úgyhogy mindnyájan örültünk annak, hogy volt egy udvari rész, ahol focizni lehetett.

Szabadalmi ügyek

Édesapám a Tungstramban a szabadalmi osztályt vezette, vegyészmérnök volt (a Nobel-díjas *Oláb György* osztálytársa a piaristáknál és évfolyamtársa a Műegyetemen) és 1945 után az első hazai szakember, aki szabadalmi ügyvivői vizsgát tett. Nagyon sok mérnök sza-



A Népszabadság 1964. június 13-i számából.

badalmának útját egyengette, a kártyapartnerek bejelentésein túlmenően például *Winter Ernő* szabadalmait. Nagy Elemér is komoly értője volt a találmányi, újítási kérvények megszövegezésének, sokszor azért járt nálunk, hogy egy-egy szabadalmi-újítási beadvánnyal bíbelődjenek. Édesapám egyébként 17 „izzós” szabadalmat nyújtott be, társfelalálókval együtt.

Nagy Elemérnek számos elnyert szabadalma volt. Íme néhány példa:

Villamos üvegolvasztó kemence, 1943 (*Bródy Imrével* és *Szigeti Györggyel*); Villamos üvegolvasztó kemence és a kemencéhez való elektróda, 1944 (*Bródy Imrével* és *Szigeti Györggyel*); Villamos üvegolvasztó kemence, 1944 (*Szigeti Györggyel*); Üzemeljárás villamos üvegolvasztó kemencéhez és hozzávaló kemence, 1944 (*Szigeti Györggyel*); Hordozóra felvitt fluoreszkáló réteg világítási célokra és eljárás annak előállítására, 1952 (*Bodó Zalánnal*, *Szabó Jánossal* és *Szigeti Györggyel*); Üveg, 1952 (*Szabó Jánossal*); ZnS típusú anyagok sugárzás hatására fellépő minőségromlásának megakadályozása, 1953 (*Kárpáti Évával*, *Szabó Jánossal* és *Szigeti Györggyel*); Homogén fluoreszkáló anyag, 1954 (*Mende Lászlóval*, *Kardos Ferencsel* és *id. Gazda Istvánnal*); Elektrolumineszcens fényforrás és eljárás annak előállítására, 1955 (*Szabó Jánossal*); Fényforrás és eljárás annak előállítására, 1956 (*Bauer Györggyel*); Katódsugárcső, 1956 (*Szabó Jánossal*); Eljárás és berendezés vezető anyagú testek minősítésére termofeszültség mérésével, 1973 (*Fogarassy Bálinttal* és *Szentpáli Bélával*); Eljárás és beren-

dezés rétegvastagság mérésére, 1975 (*Szentpáli Bélával*); Eljárás és berendezés anyagok termikus analízisére, 1977 (*Németh Károllyal*, *Bartha Lászlóval* és *Lénárt Csabával*) stb.

Bridzs

Ami a bridszjátékot és a -versenyeket illeti, többnyire a lakásunkban tartották az edzéseket, ami azt jelentette, hogy erőteljes viták kíséretében megfelelő licit-szisztémát dolgoztak ki, ezt sokat finomították, legélték (indigó segítségével sokszorosítva), és a hozzájuk tartozó tagok mindnyájan kaptak ebből egy-egy példányt. Ez közel 20 gépelt oldal lehetett, ami nem kevés. A csapat összetétele bővült az évek során, de arra emlékszem, hogy *Szigeti György*, *Bodó Zalán*, *Nagy Elemér* és idősebb *Gazda István*, tehát az izzósok edzettek együtt, később mások is részt vettek a versengésben.

1957-től kezdve a *Horváth Mihály* téren laktunk, szemben a *Fazekas Gimnáziummal*, egy másfél szobás kedves, kertre néző lakásban. A versenyre való felkészülés nálunk általában este 6 órakor kezdődött és éjjel kettőig tartott, de szerencsére jó alvó voltam, így a licitálással kapcsolatos harcos megbeszéléseknek csak a foszlányai jutottak el a fülemig.

Édesanyám festőművész volt (*Bernáth Aurél* tanítványa volt a főiskolán), ő az edzések alatt többnyire festett, mégpedig faliképeket selyemre. Ezek nagyon szépek voltak, egy hibájuk volt csupán: a festéket kizárólag denaturált szesszel lehetett hígítani, így annak illatát a mai napig is – lényegében már 30 méteres távolságból – felismerem.

Máskor a versenyzők Nagy Eleméرنél találkoztak, *Szigeti Györgyék* ugyanúgy kertes házban laktak, mint *Bodó Zalánék*. Tehát, ha jó idő volt, akkor nem szorultak be a mi másfél szobás lakásunkba, hanem inkább kerti körülmények között folyt a felkészülés, itt voltak a nagy kártyacsaták.

Nagy Elemér – aki egyébként tarokban is erős volt – alelnöke volt a Budapesti Bridzs Egyesületnek, s büszke volt, hogy az egyik bridszlicitjét még a „szakirodalom” is közölte. Az egyesület lapja mindig beszámolt a friss eseményekről, 1967. március 7-én például ezt írták: „A versenyen Nagy Elemér professzor, a Budapesti Bridzs Egyesület alelnöke angol nyelvű beszédében üdvözölte külföldi sportbarátainkat, kifejezte azt a reményt, hogy a soron következő Duna Kupa találkozón, valamint a siófoki nemzetközi és immár hagyományos csapat- és párosversenyen, ismét számos külföldi sportbarát tisztel meg bennünket részvételével.”

Ő maga így nyilatkozott az *Esti Hírlapnak* 1970. június 5-én: „Ha futnék, úsznék vagy hegyet másznék, csak a lábam és karjaim kapcsolódnának ki. Az embernek azonban azokat a szerveit kell pihentetnie, amelyeket legjobban igénybe vesz munka közben. Ezért választottam ezt a játékot. Sajnos, legmagasabb fokozatig – munkám, elfoglaltságom miatt – nem foglal-

kozhatom vele. De így is sikerélményt ad nekem, és erre a fizikusnak is szüksége van. A »hosszú lejáratú« sikerélmények, a kutatások végső eredményei csak évek múlva jelentkeznek. A bridzsbeliek nyolc-tíz percenként...».

A bridzspartnerek a köznapi életben is összetartottak. Nagy Elemér mintegy belesodródott az '56-os eseményekbe (1956-ban került az ELTE-re) és félő volt, hogy emiatt kellemetlenségei lesznek, de Szigeti György el tudott járni annak érdekében, hogy ez utóbbi ne következzen be.

Bélyeggyűjtés

Ami a bélyeggyűjtést illeti, Elemér bácsi elsősorban az egykoron gyarmati országok postabélyegeivel foglalkozott, ez bizony nagy történelmi tudást is igényelt, hiszen pontosan kellett tudni, hogy melyik országtól meddig volt gyarmat, mely ország volt a gyarmattartó, hogyan változtak az uralkodók, milyen csaták folytak a gyarmati időszak alatt, s hogy mely ország felülnyomott postabélyegeit használták az egyes helyeken bérmentesítésre. Előfordult az is, hogy a leveleket és a postai levelezőlapokat cenzúrázzák, s ezt a posta külön bélyegzővel jelezte. És ez mind külön kutatási ágat jelentett a postabélyegeket és futott leveleket gyűjtők számára. Néha nem volt bélyeg a küldeményen, azt helyettesítették portóbélyeggel. Elemér bácsi valóban nagyon jól ismerte a történelmet, fantasztikus tudással bírt például a második világháború történetéről, tehát érdemes volt figyelni arra, ha a társaságban valakinek erről a korszakról magyarázott.

Édesapámmal fiatal koruk óta együtt látogatták a bélyegszövetségi összejöveteleket, cserenapokat, kis kiállításokat. Sokszor elmentek aukciókra is, s jól ismerték a bélyegkereskedőket. Szóval ők afféle tudatos gyűjtők és tudatos cserélők voltak, akik folyamatosan képezték magukat. Valóban komoly szakemberek váltak belőlük, amit az is igazol, hogy édesapámat később a bélyeg-világkiállítások zsűrijébe hívták meg – úgymond rendes tagnak – és hosszú éveken át ő volt az, aki Közép-Európát egyedülként képviselte ebben a nemzetközi zsűriben. A Gondolat Kiadó által 1988-ban kiadott *Bélyeglexikon* egyik prominens szerzője is lett, s ennek több szócikkét Nagy Elemér lektori jóváhagyásával készítették el. Úgy emlékszem, hogy Nagy Elemérnek köszönhető, hogy *Jánossy Lajos* éveken át a Magyar Bélyeggyűjtők Országos Szövetsége elnöke volt.

Szótár, fordítás, hobbi

Van még egy terület, amely Nagy Elemért és édesapámat összekapcsolta, ez pedig az angol szakszövegek fordításának a kérdésköre. Nagy Elemér az angol nyelv legspeciálisabb rétegeinek is nagy tudója volt. Több alkalommal is előfordult, hogy egyikük vállalta egy nagyobb anyag lefordítását, másikuk pedig lektó-

ralta. Így például édesapám írt egy könyvet egy holland kiadó felkérésére a szellemi tulajdonról – ez a könyv lényegében a mai napig érvényes és forgalomban van – és ezt az angol szöveget azután Nagy Elemér lektorálta. Akkoriban közös felkérést kaptak, hogy a *Futász Dezső* főszerkesztésében készülő *Angol–Magyar Üzleti Nagyszótár* szakszavai egy részének elkészítését vállalják el. Elkészítették, de nagy munka volt. (Első kiadása 1994-ben jelent meg, s most a 6. kiadásnál tartanak.)

Nagy Elemér kérésre társfordítóként működött közre az oxfordiak által kiadott *Science and technology* című ismeretterjesztő munka magyar kiadásának elkészítésében 1995-ben.

Nyugdíjas korában sokat foglalkozott valószínűségi számítási kérdésekkel is, s ennek keretében összeállított egy kéziratot a Szerencsejáték Rt. számára, amelynek középpontjában a KENŐ-val kapcsolatos nyerési lehetőségek kiszámítása állt. Sajnos, ez a kézirat még nem jelent meg, de úgy vélem, még nincs minden veszve...

Tudománytörténet

Nagy Elemér nyugdíjas korában szívesen foglalkozott tudománytörténettel. Kérésre például lektorálta a Jedlik Ányos Társaság *Verebély László* által írt angol nyelvű Jedlik-tanulmányának új kiadását. Véleménye szerint Jedlik egyik legfontosabb találmánya osztógépe volt, amelyről sajnos kevés leírás maradt fenn a feltaláló tollából. Végül egy hozzám köthető adat: Nagy Elemér egy alkalommal meghívott az ELFT-be egy *Bródy Imrere* emlékező ülészakra, hogy ássak ki és mondjak el néhány olyan adatot Bródy Imréről, amely kevésbé ismert. A legérdekesebb adat, amit sikerült kiásnom talán az, hogy Bródy Imre és az író *Bródy Sándor* rokonok voltak. Imre több nyarat is töltött Sándoréknál vidéken, Sándor ugyanis a nagybátyja volt (erről a rokonságról egyetlen publikációban sem olvastam), s ennek köszönhető, hogy Imre az 1927-es, *Benedek Marcell* főszerkesztésében készült kiváló *Irodalmi Lexikon* egyik munkatársa lett.

Halála

Magam jóba voltam Elemér bácsi egyetlen fiával, *Lászlóval* is, aki Magyarország legnagyobb autókölcsönző cégét, a Budget magyar leányvállalatát vezette – Elemér is segített neki a nemzetközi szerződések megszövegezésében –, de László, akik kollégái igencsak szerettek és tiszteltek, fiatal korában rákbeteg lett, prosztatarákos. Édesapja mindennap meglátogatta őt a MÁV Kórházban, mindent megpróbáltak, de sajnos nem sikerült őt meggyógyítani. Ez nagyon súlyos traumát okozott Elemér számára. Akkor már felesége sem élt, és nem nagyon távol fia halála időpontjától Ő maga is megbetegedett. Tüdőrákos lett (komoly dohányos volt), és ez okozta a halálát.

Nagy Elemér professzor úr a hatvanas évek első felében tartott nekünk, másodéves matematika-fizika szakos hallgatóknak kísérletfizika-előadásokat a nevezetes XI-es teremben. Az Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kara akkor még a Múzeum körúton volt, a fizikai nagyelődő a második emeleten. Nálam érdekesebbeknek joga megítélni ezeket az előadásokat, mindenestre arra emlékszem, hogy nem voltak szabványosak. A professzor néha fehér köpenyben jött előadni, de ez óra közben szemmel láthatóan zavarta. A kísérleti fizikai tanszéken a professzor oktatómunkáját segítő, a hallgatókkal is jó kapcsolatban álló munkatársai voltak: *Hajdú János*, *Schuszter Ferenc* és



1997-ben a *Természet Világa* szerkesztősége előtt.

Radnai Gyula. (Radnai Gyula később a *XI-es tanterem a Főépületben* címmel megírta e legendás fizikai előadó életteli történetét a *Természet Világa* 2016. évi 9. számában.) A professzor tanszékének titkárságán dolgozott évfolyamtársunk, *Monspart Saci* édesanyja, akinél ügyes-bajos dolgainkat intézhettük.

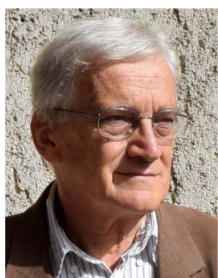
Nagy Elemér professzor úrral újra „munkakapcsolatba” csak évtizedek múltán, 1997-ben kerültem. Az előzményekhez csak annyit, hogy a hetvenes évek közepétől a *Természet Világa* tudományos ismeretterjesztő folyóirat szerkesztője, a rendszerváltás után főszerkesztője lettem. A természettudomány eredményeinek közkinccsé tétele mellett tudatosan küzdöttünk az áltudományos nézetek térhódítása ellen. *Szkeptikus sarok* címmel rovatot indítottunk, *Bencze Gyula* hathatós segítségével, *Szentágothai János* elnökletével megalapítottuk az első hazai szkeptikus mozgalom szervezetét, a Tényeket Tisztelők Társaságát. Később felsőbb szövetségünk is lett az *Ádám György* akadémikus által 1997-ben életre hívott Ismeretterjesztő Bizottság az Akadé-

mián. Ez a bizottság rendezett még abban az évben egy vitaülést a tudomány és az áltudomány viszonyáról. Azon a rendezvényen találkoztam újra egykori professzorommal. Beszélgetésünk során megtudtam, őt is foglalkoztatja, bosszantja az áltudományok burjánzása. Felcsillant a szemem, amikor elmondta, hogy ezzel kapcsolatos gondolatait, morgolódásait írásban is rögzíti, de csak az íróasztala fiókja számára. Több sem kell egy lapkészítő embernek, kiimádkoztam tőle ezeket az írásokat. Így jelenhetett meg azután *A pénzszerzés tudomány ürügyén* című kétrészes írása a *Természet Világa* 1997. évi 9. és 10. számában, a *Dobozos-holisztika* cikke pedig az 1998. évi januári számunkban.

A kiszolgáltatott emberek zsebében kotorászó áltudósok szélhámosága különösképpen bosszantotta. Erről így írt:

„A szélhámos áltudós tipikusan csupa jót ígér az embereknek: pénzt, egészséget, a jövő megismerését. A közvetlen pénzigéretre példa a pilótajáték, a közvetettre a csodálatos találmány (például vákuum nullponti energiával működő perpetuum mobile). Ezek ellen viszonylag könnyű hatékonyan védekezni. Az áltudósok örök és gazdag vadászterülete azonban a gyógyítás, ahol a betegségük következtében kiszolgáltatott helyzetű szerencsétlen embereket fosztanak ki a legaljasabb módon. Néhány különösen visszataszító esettel a nagyközönség is megismerkedhetett nemrég a rádió jóvoltából.

A következőkben a pénzszerzés fő területeit tekintjük át, és igyekszünk majd az olvasót óvatosságra inteni abban a reményben, hogy a mondottakon egy



Staar Gyula tudományos újságíró az ELTE matematika-fizika szakán végzett 1968-ban. 1974-től a *Természet Világa* folyóirat szerkesztője, 1990–2017 között főszerkesztője. Számos jeles matematikussal és fizikussal készített hosszabb interjúkat, egy részük könyv alakban is megjelent: *A megélt matematika*, *Megszállottak*, *De mi az igazság...*, *Matematikusok és teremtett világuk*, *Fizikusok az aranykorból*. A tudományt közkinccsé tevő munkásságáért több díjban, elismerésben részesült.

kicsit eltöprengenek. Talán felismerik majd, hogy minderre maguk is rájöhettek volna, ha kritikusanbban gondolkodnak.”

Írásában ezután példákkal mutatott rá a paratudomány szélhámosainak trükközéseire.

Az említett akadémiai vitaülésen többen elmondták véleményüket a tudományról, áltudományról. Két neves filozófusnő hozzászólása hullámokat vetett. A rendszerváltozás után a talajukat veszteni látszó filozófusaink körében kezdett divattá válni a posztmodern irányzat. A fiatalabb filozófusnő ilyen szemlélettel beszélt a tudományról. Az idősebb pedig egyenesen a tudomány szemére vetette a szögesdrótokba vezethető villanyáramot, és azt, hogy nem képes világgépet formálni. Ez már kiváló matematikusunkat, *Laczkovich Miklóst* is megszólalásra készítette, s bár érzékelhető volt feldúltsága a hallottaktól, mégis kristálytisza logikával mondott ellent, majd határozottan kijelentette: „Mi matematikusok soha nem is akartunk világgépet alkotni, nem ez a dolgunk. Mi problémákat oldunk meg, ez a feladatunk.”

A vitaülést követően, kisebb csoportokra szakadva kötetlen beszélgetés alakult ki. A fiatalabb filozófusnő mosolyogva Nagy Elemérhez lépett: „Professzor úr, én az egyetemen hallgattam az ön előadásait.” A professzor nem mosolygott:

NAGY ELEMÉR (1920–2000)

Gyulai József
Wigner FK

Nagy Elemér különleges színfoltja volt a hazai műszaki fizikának. Hosszú ipari tapasztalat birtokában váltott előbb a felsőoktatás területére, ahonnan kutatóintézeti vezetőnek távozott. Közismerten éles elméjű, sok-sok – nem egyszerűen szakmai – témában professzionális tudású, mély észjárású ember, akinek váratlan asszociációi, ötletei, gyökeresen más stratégiát sugalló kérdései szinte minden vitát új, eleven irányokba tereltek. Kétségtelen, hogy nem minden vitapartnere tudta elfogadni, elismerni gyakori győzelmét – innen a szélsőségekbe hajló megítélése. Talán ebből is ered, hogy nem egy összefüggő életmű dicséri az emlékét, hanem azon eredmények tömege, amelyek nélküle nem, vagy sokkal később, vagy gyengébb minőségben születtek volna meg. Munkatársainak eredményeibe épültek be meghatározó, útmutató ötletei. Megadatott neki, hogy a különleges gondolkodásmódját generációk sorának átadja, de erre is érvényes volt, hogy rezonáns – talán az sem sértő, hiszen sok ragyogó tanítványát ismerem, ha azt mondom: kongeniális – fogadókészség kellett ahhoz, hogy az átadott gondolkodásmód a tanítványokban aktív értéké váljék. Mindezzel együtt Nagy Elemér egyike volt a második félszázadban a hazai

– *Kedvesem, akkor kicsit jobban kellett volna figyelnie!* – válaszolt a maga kissé karcos modorában.

Végezetül hadd idézzek ide még két rövid részt a már említett írásából:

„Tisztában kell lennünk azzal, hogy a tudomány sohasem tekinthető befejezettnek, lezártnak, hiszen egyre nő a megfigyelhető természeti jelenségek sokasága, újabb, hatékonyabb, érzékenyebb, gyorsabb vizsgálati lehetőségek birtokába jutunk, ezáltal nagyobb részletességgel ismerhetjük meg a jelenségeket. Módszerünk nem csupán az intelligens megfigyelés, hanem a kísérlet is, ahol a vizsgálható jelenségek tartományát kibővítve olyan helyzeteket teremtünk, ahol valamilyen természeti törvény döntő súllyal mértekadó, s így a megfigyeléseket – helyesebben akkor már –, a kísérleteket többször is megismételhetjük...”

Célszerű olyan jelenségekre is felhívni a figyelmet, amelyek értelmezése még a tudományos körökben is vitatott. Nézetem szerint ezt azért jó megtenni, mert a tanítás legfőbb eredménye az kellene legyen, hogy meggyőzzük tanítványainkat a természettudományos út és a természettudományos módszerek kizárólagos alkalmasságáról.”

Mindezzel csupán azt akartam elmondani, hogy egykori professzorom, Nagy Elemér tényeket tisztelő ember volt.

fizika, műszaki szakma azon nagyjainak, akihez – legalábbis egy-egy jelentős, gyakran kritikus pillanatban – szinte valamennyiünk élete „súrlódott”. Miként ez az „írás” is szeretne.

1949-ben szerzett oklevelet a Budapesti Műszaki Egyetem villamosmérnöki karán.

1951-ben lett a fizikai tudomány kandidátusa, majd a lumineszcencia és az elektrolumineszcencia kísérleti és elméleti vizsgálata témakörből írt disszertációval megszerezte – ahogy akkor mondták – a fizikai tudományok doktora fokozatot. Ezt követően témát váltott: az ötvözetek egyensúlyi állapotával és az azokra vezető folyamatok kísérleti és elméleti vizsgálatával kezdett foglalkozni. 1973-ban megválasztották a Magyar Tudományos Akadémia tagjai sorába. 1985-ban kérte, hogy a Műszaki Tudományok Osztályára kerülhessen át, ahol a szándékainak, koncepcióinak jobb megvalósulását remélte.

1943-ban kezdett dolgozni az Egyesült Izzó Villamosági Rt.-nél, és ott dolgozott 1956-ig. Közben, 1952-ben egyetemi tanárrá nevezték ki a Miskolci Nehézipari Egyetemre. 1956–1974 között az Eötvös Loránd Tudományegyetem Szilárdtestfizika tanszékének egyetemi tanára, emellett, 1958-tól, az MTA Központi Fizikai Kutatóintézetében is tevékeny. Tudományos és tudományos szervező tevékenysége elismeréseként 1970-ben Állami Díjat, 1973-ban Akadémiai Díjat

A temetésen – az Eötvös Loránd Fizikai Társulat elnökeként – elhangzott beszéd alapján készült írás megjelent a *Magyar Tudomány* 45/9 (2000) szeptemberi számában.

kapott. 1974-ben elvállalta az MTA Műszaki Fizikai Kutatóintézetének igazgatói munkakörét és az 1987-es nyugdíjba vonulásáig ott kamatoztatta széles körű tudását, különlegesen éles problémalátását, stratégiai gondolkodását.

Az intézetben szerteágazó tevékenységet folytatott: kibővítette az intézet hagyományos kutatási profilját. Vezetése alatt tevődött át a hangsúly olyan alkalmazott kutatásokra, ahol a legmélyebb alapkutatási ismereteket is meg kellett szerezni a gyakorlati eredményességhez. A nevéhez fűződik több, jól kiválasztott technológia kiépítése, újszerű műszerek, mérési eljárások sikerre menedzselése. Bevezette, vagy inkább: kivezette az intézetet az igazi sikert bizonyító nemzetközi vizekre. Meglátta az intézet tudásának kamatoztatási lehetőségeit az acélkutatásban is. Személyesen vezette a Dunai Vasművel való magas szintű tudományos együttműködést.

1987-től 1990 júniusáig – mint egyetemi tanár – ismét az Eötvös Loránd Tudományegyetemen tanított.

Életének minden helyzetében segítette az Eötvös Loránd Fizikai Társulatot is, nyolc éven át – ahogy

akkor nevezték – a társulat titkára (ma a főtitkárnak felel meg) volt. Az ott tömörülő szakmai közösség is gýászolja.

Hadd említsek néhány szubjektív élményt is. Bizottsági elnökként ő segített hozzá, hogy életem néhez szakaszára eső doktori védésem simán befejeződjék. Hálát éreztem mindig is ezért. Tanulni azonban egész más területen tanultam tőle a legtöbbet: szabaddalmi jogi ismereteinek rendkívüli tárházába leshettem be. A KFKI Találmányi Bizottságának elnökeként ugyanis, mielőtt más terveit érdekében lemondott volna, vállalkozott arra, hogy engem „betanít”. Hihetetlen leleménnyel, átlátással, professzionális tudással rendelkezett ezen a területen is. Olyannyira, hogy élete későbbi szakaszában ez a terület adta az egyik fő elfoglaltságát is.

Emberi és egyben szomorú is, hogy annak kinyilvánítása: mit és mennyit tanult az ember egy-egy nagy, idősebb kortársától, akkorra esik, amikor az atyai barát, tanár, kolléga a tiszteletet, szeretetet már csak Odaatról érzékelheti. Remélem azonban, hogy a tiszteletem, tiszteletünk egy-egy jelét még életében észrevehette.

NAGY ELEMÉR ÉS AZ ELTE I. SZÁMÚ KÍSÉRLETI FIZIKAI TANSZÉKE

Sólyom Jenő
ELTE és Wigner FK

A száz éve született *Nagy Elemér* 1956 és 1970 között volt az ELTE Kísérleti Fizikai Tanszék vezetője. A tanszék neve három évig, 1956–59 között I. számú Kísérleti Fizikai Tanszék volt. Érdekes felidézni, hogy milyen körülmények között jelent meg a tanszék nevében a sorszámmal való megkülönböztetés, és miért, hogyan tűnt el rövid időn belül. Az alábbiakban rekonstruált történet korabeli dokumentumokon alapszik, ezeket a cikk végén sorolom fel. Mivel abból az időből, éppen az 1956-os és 1957-es évekből sok irat nem volt megtalálható, nem minden lépés dokumentálható teljesen pontosan, de a kialakuló kép helyességében nincs okunk kételkedni.

Előzmények

Az események megértéséhez mintegy tíz évvel korábbra kell visszamennünk. A múlt század negyvenes éveinek közepén, az akkor Pázmány Péter Tudományegyetemnek nevezett intézményben az Elméleti Fizikai Intézet mellett két kísérleti fizikai jellegű tanszék működött. Az egyik az *Eötvös Loránd* által megálmodott, az Eszterházy (ma Puskin) utca 5–7. szám alatti (D) épületben lévő Kísérleti Fizikai Intézet volt, a Múzeum körúti főépület II. emeletén elhelyezkedő másik fizikai intézet a gyakorlati jelzöt viselte a nevében. Az előbbinek 1940 óta *Rybár István*, az utóbbinak a később orvosi Nobel-díjat kapott *Békésy György* volt a vezető-

je, igazgatója nyilvános rendes egyetemi tanárként. Amikor Békésy 1946-ban engedéllyel, fizetetlen szabadságra Svédországba utazott, a Gyakorlati Fizikai Intézet ügyeinek intézését ideiglenesen, helyettesként Rybárra bízták. Békésy egy év múlva – ugyancsak a minisztérium hozzájárulásával – továbbment a Harvardra. 1948 őszén a minisztérium 1949. január 31-ig folytatólagos szabadságot engedélyezett neki, de 1949 elején már nem járultak hozzá a további hosszabbításhoz. Bár korábban hazatérési szándékát jelezte, Békésy ekkor úgy döntött, hogy véglegesen Amerikában marad. A vallás- és közoktatási minisztérium 1949 júliusában közölte az egyetemmel, hogy Békésy „állásáról önként lemondottnak tekintendő”.

1948 nyarán bizonytalanná vált a Kísérleti Fizikai Intézetet vezető Rybár István helyzete is. Az egyetem nyilvános rendes tanára, az Akadémia rendes tagja volt, de az egyeduralomra törő Magyar Kommunista



Sólyom Jenő elméleti szilárdtest-fizikus, az MTA rendes tagja, az ELTE TTK Fizikai Intézet és a Wigner Fizikai Kutatóközpont professor emeritusa. 1964-ben szerzett fizikus oklevelet az ELTE-n. Első munkahelye a KFKI volt, és külföldi, összesen közel tíz éves munkavállalásaitól eltekintve végig ott, illetve annak utódintézményeiben dolgozott. A rendszerváltozás után kapott egyetemi tanári kinevezést az ELTE-re.

Párt már 1947-ben kinyilvánította, hogy elégedetlen a Pázmány Péter Tudományegyetem egyetemi tanárai egy részével, el kívánja őket távolíttatni, az egyetem teljes megreformálására készül. Később a megreformálás, megrostálás szándéka az Akadémiával kapcsolatban is megfogalmazódott. Az eltávolítandók közé tartozott Rybár István is. Rybár 1948 nyarán betöltötte a 62. életévét, nyugdíjazása természetes megoldásként kínálkozott. Ténylegesen 1949 januárjában küldték nyugdíjba az egyetemről, de az 1948/49-es tanév első félévében már nem tartott előadásokat. Szakértelmét a későbbiekben a geofizikusok használták – egyébként is Rybárhoz közelebb állt a geofizika, mint a fizika –, az Eötvös Loránd Geofizikai Intézetben dolgozott még évekig. 1949-ben az akadémiai reform során visszaminősítették tanácskozási jogú taggá, 1952-ben pedig – az új, szovjet típusú minősítési rendszer bevezetésekor – csak a fizikai tudományok kandidátusa fokozatot kapta meg. 1957-ben lett a fizikai tudományok doktora.

Rybár eltávolítása után, Békésy távollétében egyszerre kellett megoldást találni a Gyakorlati és a Kísérleti Fizikai Intézethez tartozó előadások és laboratóriumi foglalkozások ellátására és a két intézet vezetésére. A Kísérleti Fizikai Intézetben volt két olyan személy, *Barnóthy Jenő* intézeti tanár, és felesége, *Forró Magdolna* adjunktus, akik alkalmasak lettek volna a feladatok ellátására, de 1948 nyarán ők is elhagyták az országot, Amerikában folytatták a kozmikus sugárzással kapcsolatos kutatásaikat.

Tudományos munkája alapján szóba jöhetett volna *Selényi Pál*, akinek volt kapcsolata az egyetemmel, 1948-ban egyetemi magántanári fokozatot szerzett, de ő Rybárnál másfél évvel idősebb volt. Később ugyan rendkívüli tanári címmel tüntették ki, és bekapcsolódott az egyetemi életbe, az oktatási feladatok ellátására külső embereket kellett keresni.

A Rybár és Békésy professzorok tanszékeinek helyettesítése 1948. szeptember 23-án került a bölcsészettudományi kar – a természettudományok 1949 májusáig ide tartoztak – tanácsa elé. Az előkészítő bizottság egyhangúlag azt javasolta, hogy „a Kísérleti Fizikai tanszék helyettesi minőségben való ellátásával heti 5 órában *dr. Pócza Jenő* okl. középisk. tanár, az újpesti Egyesült Izzógyár kutatóintézetének tisztviselője, a Gyakorlati Fizikai tanszék teendőinek helyettesi minőségben való ellátásával pedig *Novobáczky Károly* ny. r. tanár mellett heti 2 órában *Faragó Péter* Eötvös-kollégiumi tanár, az újpesti Egyesült Izzó kutató intézetének tisztviselője bízzák meg”.

A bizottság javaslatát a kari tanács, a két személyről külön-külön szavazva, nagy többséggel elfogadta. A határozatban még hozzátették, hogy „a Kar a bizottság javaslatára a Kísérleti Fizikai Intézet igazgatására a tanszék betöltéséig, valamint az egész D-épület – melyben a Kísérleti és Elméleti Fizikai Intézetek vannak elhelyezve – épület-igazgatói teendőinek ellátására *Novobáczky Károly* ny. r. tanárt kéri fel”.

Ennek megfelelően az 1948/49-es tanév fennmaradt tanrendje szerint a tanév mindkét félévében Pó-

cza Jenő tartotta helyettes tanárként a heti ötórás *Kísérleti fizika* előadást, és ő volt felelős a kísérleti fizikai laboratóriumért, valamint a kísérleti fizikához kapcsolódó számolási gyakorlatokért. A gyakorlati intézethez tartozó egy féléves, heti kétórás *Bevezetés a gyakorlati fizikába*, illetve a *Gyakorlati optika* előadást pedig *Faragó Péter* tartotta, szintén helyettes tanárként.

A Bölcsészettudományi Kar tanácsának 1949. április 1-jei ülésén került újra szóba a Kísérleti Fizikai Intézet ügye. A dékán bejelentette, hogy a miniszter Pócza Jenőt intézeti tanárrá nevezte ki. Munkakörét *Novobáczky* ismertette: 1.) kísérleti fizikai előadások tartása a futó félévben heti 5 órában, a következő tanévtől heti 10 órában, 2.) laboratóriumi gyakorlatok vezetése, 3.) szakiskolai előadások tartása. A legérdekesebb az utolsó, 4. pont: szekunder elektronokra vonatkozó kutatások vezetése a Gyakorlati Fizikai Intézetben. Vagyis Pócza munkakörében már ekkor keveredtek a két tanszékhez tartozó feladatok. *Faragó* valamivel később, 1949 szeptemberében kapott intézeti tanári kinevezést a Gyakorlati Fizikai Intézetbe. Az intézeti tanári tisztség az adjunktusi és egyetemi tanári közötti pozíció volt az egyetemi ranglétrán, később mindketten docensként szerepeltek az egyetemi évkönyvekben.

Innen kezdve az iratok hiányosan maradtak fenn. Annyit tudunk, hogy az 1949/50-es tanévben Pócza Jenő tartotta a *Kísérleti fizika* előadásokat az abban a tanévben beindult fizikus évfolyamnak is, *Faragó* pedig a mérésekért, a laboratóriumokért volt felelős. A Fizikai Intézetnek, amely magába foglalta a három korábbi tanszéket, *Novobáczky Károly* volt az igazgatója. Az ő személyén keresztül történtek az intézkedések a kísérleti tanszékeken is.

Több próbálkozás is volt arra, hogy egyetemi tanár vezesse a Kísérleti Fizikai Intézetet. Az Egyetemi Tanács 1950. május 19-i ülésén egyhangúlag elfogadta, hogy „pártolással” terjesszék fel a vallás- és közoktatásügyi miniszterhez a Természettudományi Kar kari tanácsának május 4-i határozatát, amelyben kéri, hogy a „jelenleg üresedésben lévő kísérleti fizikai tanszék” betöltésére *Szigeti Györgyöt* hívják meg egyetemi nyilvános rendes tanári minőségben. Nem találtam nyomát annak, hogy mi lett a felterjesztés további sorsa, csak az tudható, hogy erre a kinevezésre nem került sor. Ahogyan Pócza Jenő egyetemi tanári kinevezésére sem, pedig *Novobáczky*, akinek szemében a szakmai szempontok fontosabbak voltak a politikai megfontolásoknál, többször is felterjesztette őt. Pócza Jenő életrajzában fekete folt lehetett származása. Édesapja evangélikus lelkész volt.

Amikor újra megjelent az addigra már Eötvös Loránd Tudományegyetem nevet viselő intézmény értesítője, az 1954/55-ös tanévről, az Elméleti Fizikai Intézet mellett egyenrangú egységként szerepelt a Kísérleti Fizikai Intézet, amelynek Pócza Jenő docens volt a tanszékvezetője. *Faragó Péter* docensként félállásban dolgozott az intézetben, hiszen ő 1952 márciusá-

tól az Elektromágneses Hullámok Osztályát is vezette az addigra már megalakult KFKI-ban.

Az elméleti intézethez képest az egyetlen kísérleti intézet igen nagy létszámú volt. Docensként volt alkalmazásban *Baintner Géza* és *Cornides István*, adjunktusként dolgozott itt *Erőné Gécs Mária*, *Gémesi József*, *Sándor Endre* és félállásban *Somogyi Antal*. A tanszékhez közel harminc tanársegéd tartozott, többek között *Barna Péter*, *Bodó Zalánné*, *Groma Géza* és felesége, *Nagy Judit*, *Korecz László*, *Sas Elemér*, *Turiné Frank Zsuzsa*, *Zsoldos Lehel*, valamint félállásban *Haiman Ottó* és *Keszthelyi Lajos*.

Nagy Elemér kinevezése

1956 nyarán az Oktatási Minisztérium pályázatot írt ki egy egyetemi tanári állásra az ELTE Kísérleti Fizikai Tanszékre. Az ELTE Matematikai–Fizikai–Kémiai Kar – az 1949-ben a bölcsészettudományi karból önállósodott természettudományi kart 1953-ban két karra vágta szét, így működött 1957-ig – kari tanácsa június 26-i ülésén foglalkozott az állás betöltésének kérdésével. A kinevezési javaslattal egyidejűleg levelet küldtek az oktatásügyi miniszternek. Ebben kifejtették, hogy szükségesnek látják a kísérleti fizika oktatási színvonalának emelését, korszerűbbé tételét, és a tanszéki vezetés megerősítését. „A jelenleg összevontan működő Kísérleti és Gyakorlati Fizikai Tanszék oly sokrétű és nagy mértékű oktatási feladatokat lát el, hogy nem látjuk biztosítva az eredményes tanszékvezetést, amennyiben a két tanszék továbbra is összevontan működik. A Kísérleti és Gyakorlati Fizikai tanszék kettéválasztására most mód nyílik új egyetemi tanár kinevezésével. Ezért kérjük Miniszter Elvtársat, rendelje el 1956. szeptember 1-jei hatállyal a tanszékek különválását – a tanszékek vezetésére Pócza Jenő tanszékvezető docenst, az Intézet jelenlegi vezetőjét, illetve a most kinevezendő egyetemi tanárt javasoljuk.”

A miniszter, *Könya Albert*, aki maga is fizikus volt, az egyetem felterjesztésének megfelelően 1956. szeptember 1-jei hatállyal kinevezte Nagy Elemért a Kísérleti Fizikai Tanszékre egyetemi tanárnak, és egyúttal megbízta a tanszék vezetésével. Nagy Elemér abban az évben védte meg *Elektrolumineszcens jelenségek* című akadémiai doktori értekezését. Ezzel *Gyulai Zoltán* és *Szalay Sándor* után, akik 1952-ben, az új minősítési rendszer bevezetésekor kapták meg a fizikai tudományok doktora címet (Gyulai az akadémiai

reform után is akadémikus maradt, Szalayt 1953-ban levelező taggá választották), ő volt az első kísérleti fizikus, aki ezt a fokozatot védelemmel megszerezte. Az egyetem és a minisztérium részéről nagyon természetes lépés volt, hogy Nagy Elemért a miskolci egyetemről Budapestre hozzák fel.

A tanszék kettéválasztása

Úgy tűnik, a bürokrácia útvesztőiben valahol elkeveredett a kari tanács levele, és a miniszter nem rendelkezett Pócza Jenőről, korábbi tanszékvezetői megbízatása alól sem mentették fel. Ezért a Matematikai–Fizikai–Kémiai Kar dékánja, *Fuchs László* 1956. szeptember 14-én újabb levelet küldött a miniszternek, amelyben megerősíti a kar korábbi állásfoglalását a rendkívül nagy intézet kettévágását illetően. Örömet fejezi ki Nagy Elemér kinevezésével kapcsolatban, ugyanakkor rámutat arra, hogy méltatlan dolog lenne Pócza Jenővel szemben, ha elvonnák tőle a tanszékvezetői megbízást. Ebben a levélben fogalmazódik meg az a javaslat, hogy „a két tanszék ezentúl mint I. Kísérleti Fizikai Tanszék, illetőleg II. Kísérleti Fizikai Tanszék néven működjenek”.

A javaslatot a miniszter elfogadta. Az ELTE rektorának megküldött rendeletével a Kísérleti Fizikai Intézetet szétválasztotta I. és II. számú Kísérleti Fizikai Tanszékre. Nagy Elemér lett az I. számú tanszék vezetője, a II. számú tanszék vezetésével pedig Pócza Jenőt bízta meg a miniszter.

Mindez még október 23. előtt történt, de a forradalom miatt a tanszékek tényleges megalakulása már 1957-re maradt. Addigra a négy docens közül kettő, *Cornides István* és *Faragó Péter* már nem volt az egyetemen. *Cornides* vizsgálati fogságban volt a forradalom alatti szerepvállalásáért, szabadulása után fegyelmivel elbocsátották, *Faragó* pedig Angliába emigrált. Ugyancsak Angliába emigrált *Sándor Endre* adjunktus. Az idősebbek közül *Baintner Géza* docens, *Gémesi József* és *Somogyi Antal* adjunktus a II. számú tanszékre került, *Gécs Mária* pedig a közben, az 1957/58-as tanévben megalakult Atomfizikai Tanszékre ment át. A tanársegédek mintegy fele Nagy Elemér tanszékére került, a másik fele Pócza mellé. Az 1957/58-as tanévben az I. számú Kísérleti Fizikai Tanszék tanársegédje volt *Bodó Zalánné*, *Bráda Ferenc*, *Csordás László*, *Hornyák László*, *Horváth Éva*, *Kedves Ferenc*, *Keglevich László*, *Menczel György*, *Nébli Vendel*, *Tóth Gábor* és *Zsoldos Lehel*. A II. számú Kísérleti Fizikai Tanszéken



dolgozott Barna Péter, Groma Géza, Groma Gézáné Nagy Judit, *Harsányi György, Keszthelyi Lajosné Lándori Sára, Korecz László, Kurucz István, Nagy Lajosné, Sas Elemér, Tóth Lajos, Tóth Lajosné Bitskei Margit és Tóth-Pál Sándorné*. Keszthelyi Lajos az Atomfizikai Tanszék megbízott előadójaként szerepel az évkönyvben.

A II. számú Kísérleti Fizikai Tanszék megszűnése

Ez a felállítás – kisebb változásoktól eltekintve – 1959 nyaráig tartott. 1958 folyamán távozott az egyetemről Bráda Ferenc és Nébli Vendel, és megszűnt Keszthelyi Lajos felállása, a KFKI-s főállása megmaradt. A mélyreható változás 1959 nyarán történt. Ekkor a tanszéki feladatok átszervezésére hivatkozva, de nyílt titok volt, hogy a politikai tisztogatás jegyében, Pócztát eltávolították az egyetemről. Vele együtt küldték el Gémesi József adjunktust, valamint a II. számú Kísérleti Fizikai Tanszék tanársegédeinek többségét, Barna Pétert, Groma Gézát, Groma Gézáné Nagy Juditot, Keszthelyi Lajosné Lándori Sárát, Tóth Lajost és Tóth Lajosné Bitskei Margitot. Néhányuknak általános vagy középiskolai tanári állást kellett elfogadnia, bár közülük többen hamarosan valamelyik kutatóintézetben folytathatták tudományos pályájukat, ott kamatoztatva tudásukat. A tanszéknek az egyetemen maradt munkatársai (Baintner Géza docens, Somogyi Antal adjunktus, Korecz László, Kurucz István, Sas Elemér és Tóth-Pál Sándorné tanársegédek) az Atomfizikai Tanszék keretében folytatták munkájukat.

A TTK 1959. november 26-án tartott tanácsülésének jegyzőkönyvében ezzel kapcsolatban a következő olvasható: „Pócza Jenő tanszékvezető docens kutatómunkájának folytatására egész állásba a Magyar Tudományos Akadémia Fizikai Kutató Intézetébe ment át [valójában az MTA Műszaki Fizikai Kutatóintézetébe, *a szerző*]. Ezzel a Kísérleti Fizika II. tanszékvezetői állása megüresedett. A tanszék vezetésével a Művelődésügyi Minisztérium *Jánosy Lajos* professzort bízta meg azzal, hogy egyelőre a két tanszéket egy egységként kezelje és átszervezze. [...] Az átszervezés folytán néhány állás is feleslegessé vált. Ezekből a Csillagászati Tanszéket, a Meteorológiai Tanszéket és a Földrajzi Intézetet erősítették meg minden egyes esetben olyan emberekkel, akik megfelelő szakmai tudásuk mellett a Kar társadalmi és politikai életét is erősítik.”

Ezeket a személyi változásokat a rendszerváltozás után *Nagy Károly* úgy értékelte, hogy az oktatói gárdának hármas követelménynek kellett eleget tennie: „A tanár legyen szakmailag jó, a rendszer elkötelezettje, és az oktató-nevelő munkában rátermett. Magyarul, legjobban, ha párttag.”

A II. számú Kísérleti Fizikai Tanszék megszűntével okafogyottá vált a sorszám használata az I. számú Kísérleti Fizikai Tanszék nevében. Attól kezdve újra

Kísérleti Fizika Tanszék lett, amíg 1970-ben a tanszék ketté nem vált Szilárdtest-fizikai és Általános Fizikai Tanszékre. Nagy Elemér a Szilárdtest-fizikai Tanszékét vitte tovább.

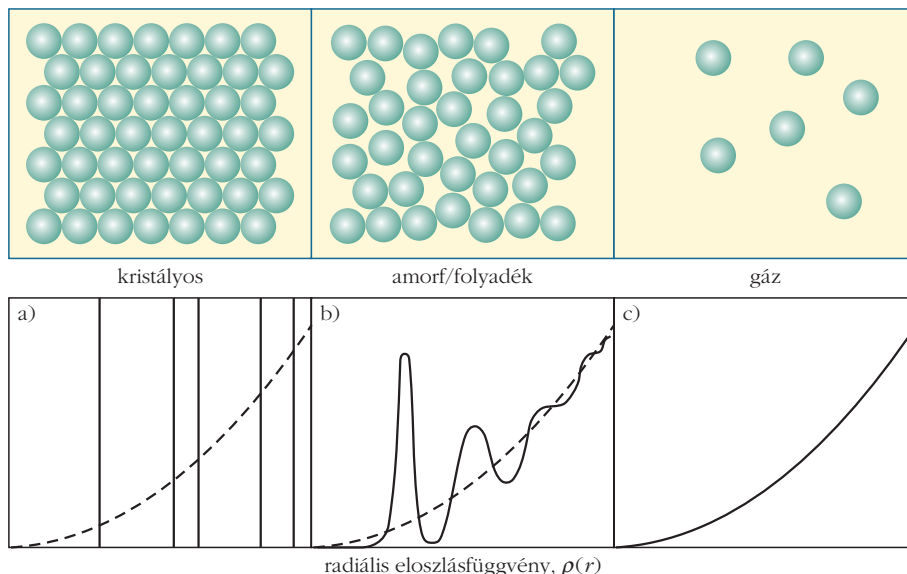
Utószó

Mintegy utóiratként, érdekességként hadd említsek egy mozaikot Nagy Elemérrel kapcsolatban abból az időből. 1959-ben a Természettudományi Kar a Kosuth-díj ezüst fokozatára terjesztette fel őt. Az egyetemi tanács elé ez úgy került, hogy az egyetem Kosuth-díj bizottsága a felterjesztés mellőzését javasolja. A jegyzőkönyvben indoklasként ez áll: „A javaslat nem indokolatlan, de *Ligeti* professzor véleménye szerint korai, figyelembe véve nevezettnek az 1956. évi ellenforradalom alatt tanúsított magatartását.” Nagy Elemér tíz évvel később, 1970-ben kapta meg az Állami díjat.

Dokumentumok

- A Pázmány Péter Tudományegyetem almanachja, 1947–1948. tanév https://adtplus.arcanum.hu/hu/view/ELTE_Almanach_1947/?pg=0&layout=s
- A Pázmány Péter Tudományegyetem tanrendje, 1948–1949. tanév, 1. félév, https://adtplus.arcanum.hu/hu/view/ELTE_Egyetemi_Tanrendek_1948_1/?pg=0&layout=s
- A Pázmány Péter Tudományegyetem tanrendje, 1948–1949. tanév, 2. félév, https://adtplus.arcanum.hu/hu/view/ELTE_Egyetemi_Tanrendek_1948_2/?pg=0&layout=s
- A Pázmány Péter Tudományegyetem tanrendje, 1949–1950. tanév, 2. félév https://adtplus.arcanum.hu/hu/view/ELTE_Egyetemi_Tanrendek_1949_2/?pg=0&layout=s
- Budapesti Pázmány Péter Tudományegyetem Bölcsészettudományi Karának ülései, 1948–1950, https://library.hungaricana.hu/hu/view/ELTE_BTK_KARI_1948_49_1949_50/?pg=2&layout=s
- Budapesti Pázmány Péter Tudományegyetem Egyetemi Tanácsa ülései, 1949–1950, https://library.hungaricana.hu/hu/view/ELTE_ET_1949-50/?pg=0&layout=s
- Az Eötvös Loránd Tudományegyetem értesítője, 1954–1955, https://adtplus.arcanum.hu/hu/view/ELTE_Almanach_1954/?pg=0&layout=s
- Az Eötvös Loránd Tudományegyetem értesítője, 1955–1956, https://adtplus.arcanum.hu/hu/view/ELTE_Almanach_1955/?pg=0&layout=s
- Az Eötvös Loránd Tudományegyetem értesítője, 1957–1958, https://adtplus.arcanum.hu/hu/view/ELTE_Almanach_1957/?pg=0&layout=s
- Az Eötvös Loránd Tudományegyetem értesítője, 1958–1959, https://adtplus.arcanum.hu/hu/view/ELTE_Almanach_1958/?pg=0&layout=s
- Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Karának ülései, 1958–1959, https://library.hungaricana.hu/hu/view/ELTE_TTK_KARI_1958_59/?pg=0&layout=s
- Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Karának ülései, 1959–1960, https://library.hungaricana.hu/hu/view/ELTE_TTK_KARI_1959_60/?pg=0&layout=s
- Eötvös Loránd Tudományegyetem Egyetemi Tanácsának ülései, 1959–1960, https://library.hungaricana.hu/hu/view/ELTE_ET_1959-60/?pg=37&layout=s
- Novobátzky Károly felterjesztése a Karhoz Pócza Jenő egyetemi tanári kinevezése ügyében, 1952. április 8. Pócza Jenő hagyatéka.
- Fuchs László dékán levele az oktatásügyi miniszterhez, 1956. július 20. ELTE Levéltár, A Matematikai, Fizikai és Kémiai Kar iratai, 13.b.
- Fuchs László dékán levele az oktatásügyi miniszterhez, 1956. szeptember 14. ELTE Levéltár, A Matematikai, Fizikai és Kémiai Kar iratai, 13.b.
- Kónya Albert oktatásügyi miniszter levele Pócza Jenőhöz, 1956. október 9. Pócza Jenő hagyatéka.

A szilárd anyagokat az őket alkotó atomok által felépített egységek szerint csoportosíthatjuk. A legtöbb szilárd halmazállapotú rendszer *polikristályos*, amelyek általában mikrométeres szemcséket tartalmaznak. Abban az esetben, ha az átlagos szemcseméret 100 nm alatti, *nanokristályos* anyagokról beszélünk. Az összes kristályos anyagra (a szemcséken belüli) *hosszú távú* rend jellemző, amiben az atomok ideális esetben a megfelelő kristályrács rácspontjaiban helyezkednek el. Az egyes kristályos szemcséket szemcsehatárok választják el egymástól. Nanokristályos anyagokban ezek a szemcsehatárok a teljes anyag térfogatának 10-30%-át is elérhetik. Az ilyen szemcsehatárokból az atomi periodicitás leromlik, a kötések torzulnak.



1. ábra. Sematikus atomi elhelyezkedés különböző halmazállapotú anyagokban, illetve a) szilárd, b) amorf és c) gáz fázisok $\rho(r)$ radiális eloszlásfüggvényei [2].

Amorf szerkezetek

A kondenzált anyagok egy jóval szűkebb csoportja nem rendelkezik translációs szimmetriával. Ezeket a rendszereket nevezünk *amorfnak*, amelyekre a hosszú távú rend teljes hiánya jellemző, az atomok látszólag rendezetlenül kapcsolódnak egymáshoz (1. ábra).

A rendezetlen rendszerek szerkezeti leírására a $\rho(r)$ radiális eloszlásfüggvényt használjuk, amely az atomi elhelyezkedések közt fennálló korreláció kvantitatív jellemzésére szolgál. Ezt a következőképpen definiáljuk: $\rho(r)dr$ annak valószínűsége, hogy

A kutatás az ELTE Felsőoktatási Intézményi Kiválósági Program (1783-3/2018/FEKUTSRAT) keretében valósult meg az Emberi Erőforrások Minisztériuma támogatásával.



Kovács Zsolt fizikus Ph.D. (2002) posztdoktori kutatómunka keretében ismerkedett meg tömbi amorfnak az ELTE-n OTKA posztdoktori ösztöndíjasként. Két évet ezek ipari alkalmazását kutatta az írországi UCD-n, majd idehaza Magyar és Bolyai posztdoktori ösztöndíjat nyert el. Jelenleg az ELTE Anyagfizikai Tanszékének habilitált docense. Fő kutatási területe az amorfnak és nanokristályos anyagok képlekeny tulajdonságainak vizsgálata.



Révész Ádám fizikus, Ph.D. (2000) megszerzése után két éves EU-posztdoktori ösztöndíjasként Barcelonában tömbi amorfnak anyagokkal foglalkozott. Hazatérve adjunktusi státuszt kapott, jelenleg az ELTE Anyagfizikai Tanszékének habilitált docense. 2006-ban HAESF ösztöndíjasként a marylanti egyetemen dolgozott. Révész Ádám az MTA kétszeres Bolyai ösztöndíjasa. Elsősorban nemegyensúlyi anyagok hidrogéntárolásával valamint amorfnak szerkezetek termikus stabilitásával foglalkozik.

egy kiszemelt atomtól r és $r+dr$ távolságok között találunk-e egy másik atomot [1]. Nyilvánvaló, hogy az ideális kristályos anyagra jellemző tökéletesen szabályos atomi elhelyezkedések esetén az adott atomtól csak jól meghatározott irányokban és távolságokban találunk másik atomot, így a radiális eloszlásfüggvény is csak diszkrét helyeken különbözik nullától (1.a ábra). Az 1.b ábra tanúsága szerint az amorfnak (és folyadék) fázisban nagy r távolságokban a $\rho(r)$ függvény négyzetes viselkedést mutat, ami az atomi rend teljes hiányára utal (ez megfelel annak, hogy az r sugarú dr vastagságú gömbhéjban található atomok száma arányos r^2 -tel), teljesen hasonlóan az ideális gázokhoz (1.c ábra). Ezzel szemben kis r távolságok esetén a $\rho(r)$ függvény jól meghatározott maximumokat és minimumokat mutat, ami lokális rendeződésnek a következménye (lásd később). Ez az atomi korreláció néhány atomtávolságig (~2-4 nm) jelentős, ami az első, illetve második koordinációs héjon elhelyezkedő atomok közötti rövid távú rendnek felel meg.

Üvegek

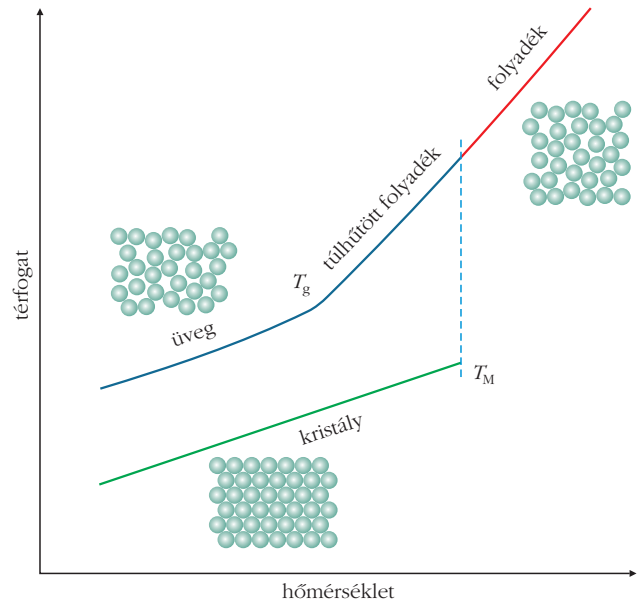
Az anyagok legkisebb szabadenergiájú állapota az olvadáspont alatt a kristályos *egyensúlyi állapot*. Ez az egyensúlyi állapot termodinamikailag stabil. Egy adott termodinamikai rendszernek azonban létezhet egy vagy több ennél magasabb lokális szabadenergia-minimuma, és ehhez tartozó nemegyensúlyi *metastabil állapot* is, ahonnan a rendszer csak valamilyen gerjesztés (hőközlés, mechanikai deformáció) hatására tud az energetikailag legalacsonyabb szabadenergiájú állapotába jutni. A nemegyensúlyi állapotú kondenzált anyagok egyik csoportját alkotják az üvegek.

Az üvegállapot létrejöttékor tulajdonképpen a magasabb hőmérsékletű folyadékállapotot fagyasztjuk be, miközben a rendszert a T_M olvadáspont alá hűtjük (túlhűtés). Ezt a folyamatot szemlélteti a 2. ábra. Hagyományos hűtési eljárások során az olvadékból történő megszilárduláshoz tartozó T_M hőmérsékleten a $V(T)$ térfogat-hőmérséklet függvény szakadást mutat, ami az *elsőrendű fázisátalakulások* sajátossága. Egy bizonyos β_C kritikus hűtési sebesség felett azonban a folyamat jellege drasztikusan megváltozik, a folyadék másképp szilárdul meg. Ekkor – mint látható – a $V(T)$ függvény semmilyen változást nem mutat a T_g hőmérsékleten, a túlhűtöttfolyadék-állapot egészen a T_g üvegátalakulási hőmérsékletig jelen van, ahol a görbe meredekségének folytonos megváltozásával jutunk szilárd fázisba. Azokat a rendszereket nevezzük *üvegeknek*, amelyek rendelkeznek a

karakterisztikus T_g hőmérséklettel. Az üvegátalakulást termodinamikailag a kinetikusan kontrollált *másodrendű fázisátalakulások* körébe soroljuk. Az üvegeket minden esetben az atomi rendezetlenség jellemzi, tehát amorf szerkezetűek. (Itt jegyezzük meg, hogy léteznek olyan amorf szerkezetek, amelyek viszont nem üvegek.) A 2. ábrán azt is észrevehetjük, hogy az üvegátalakulás kisebb térfogatcsökkenést von maga után, mint a klasszikus kristályos megszilárdulás. A két eltérő végállapot közötti térfogatkülönbséget nevezzük *szabad térfogatnak*.

Fémüvegek előállítása

Az olyan többkomponensű üveget, amely fő komponense fém, *fémüvegnek* nevezzük. A hagyományos fémüvegek $\beta_C = 10^4$ – 10^6 K/s kritikus hűtési sebességgel rendelkeznek, így

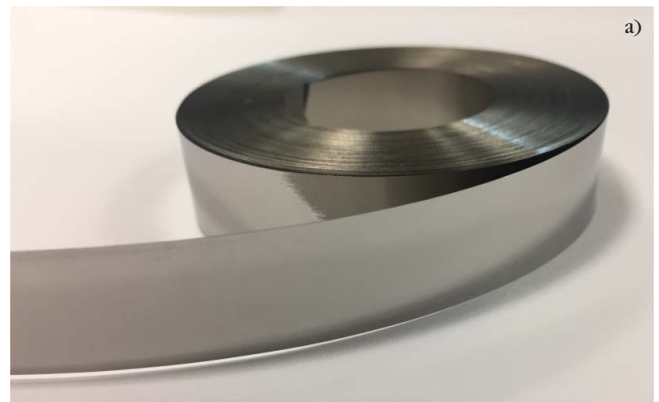
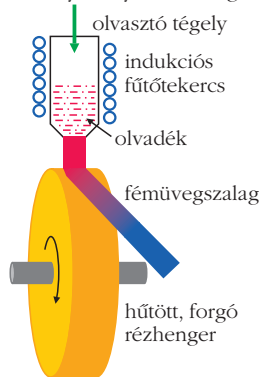


2. ábra. Az anyagot folyadék halmazállapotból szilárd fázisba hűtve két lehetséges utat járhatunk be. Hagyományos hűtés esetén a rendszer kristályos állapotba kerül, míg gyorsítással amorf szerkezetű üveget kapunk [3].

a szükséges nagyon gyors hőelvonás csak korlátozott mintaméret esetében érhető el. Az ilyen amorf fémötvezetek előállításának egyik legelterjedtebb módszere a forgódobos gyorsítás (angolul melt-spinning), lásd a 3.a ábrát. A módszer alkalmazása során nagy tiszta-

3. ábra. (a) Forgódobos gyorsító berendezés vázlatos felépítése és a módszerrel előállított fémüvegszalag. (b) Tömbi fémüveg előállítására alkalmas berendezés vázlatos rajza és a módszerrel előállított BMG minta.

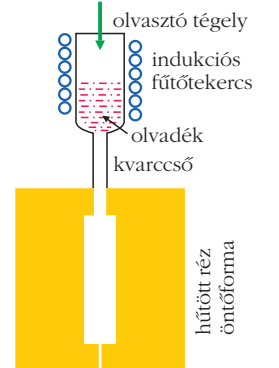
néhány Pa nyomású Ar-gáz

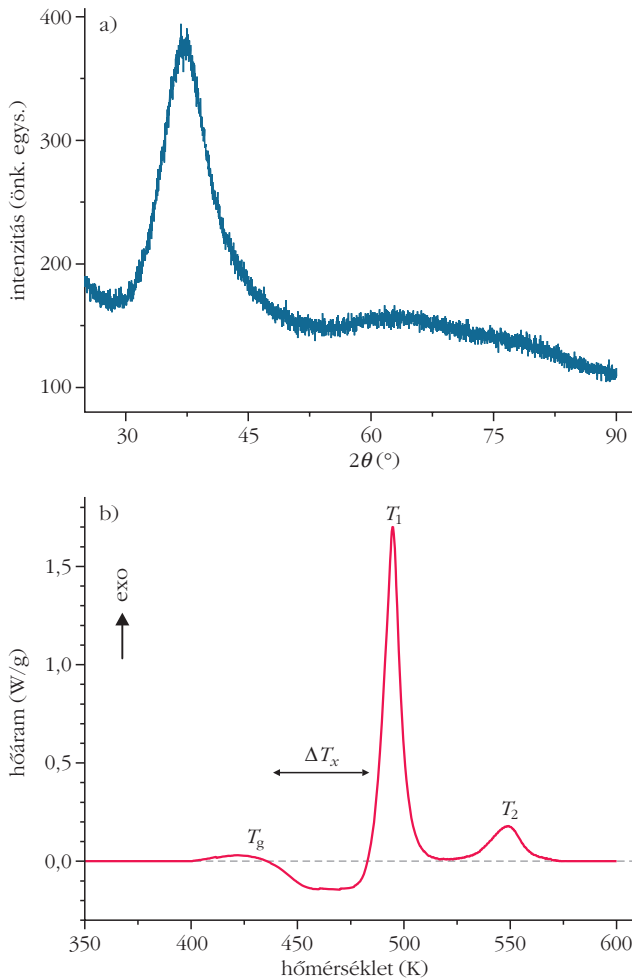


b)



néhány Pa nyomású Ar-gáz





4. ábra. $\text{Mg}_{54}\text{Cu}_{28}\text{Ag}_7\text{Y}_{11}$ összetételű BMG minta (a) röntgendiffrakciogramja és (b) termogramja [6].

ságú összetevőkből készített ötvözetet egy kvarccsőben indukciós módon olvasztanak meg, majd néhány száz mbar túlnyomással egy gyorsan forgó hűthető rézkorong palástjára lőnek. Az eljárással 5-10 mm széles, 10-200 μm vastag amorf szalagok állíthatók elő. Az elmúlt két évtizedben sikerült olyan többkomponensű fémüvegeket kifejleszteni, amelyek jóval alacsonyabb hűtési sebességet igényelnek, mint a forgódobos módszerrel előállított anyagok. Bizonyos esetekben a kritikus hűtési sebességük az $\beta_C = 1-10 \text{ K/s}$ -ot sem haladja meg, amely kristályosodás nélküli jóval lassabb hőelvonást is megenged, így vastagabb, tömbi amorf fémüvegek (BMG [Bulk Metallic Glass]) előállítására van lehetőségünk [4]. Az ilyen minták előállításakor a megfelelő összetételű kristályos öntecsetet először indukciós módszerrel többször megolvastják, majd a kapott olvadékot egy jól hűtött réz öntőformában megdermesztik (3.b ábra).

A tömbi fémüvegek előállítására A. Inoue három félempirikus követelményt támasztott [5]:

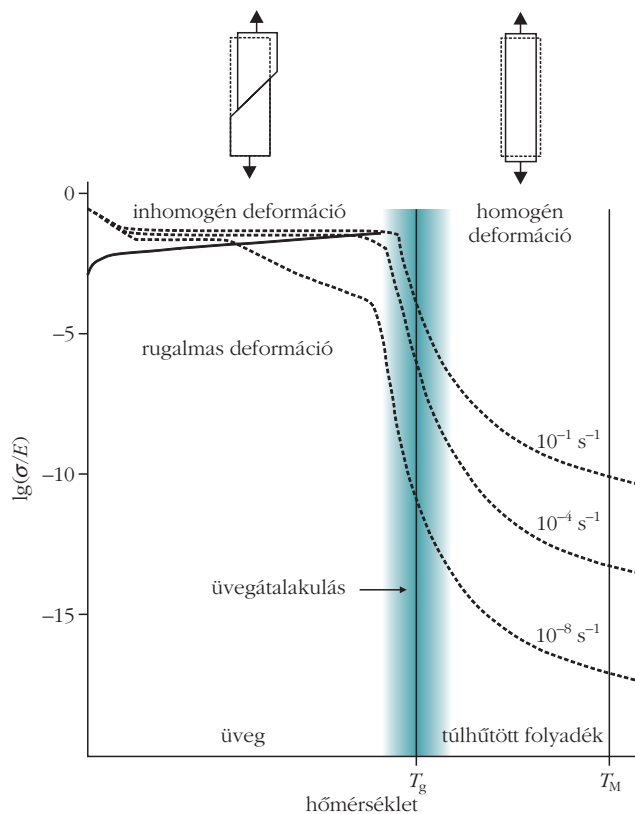
- a rendszer legalább három komponensből álljon;
 - az alkotó atomok között nagy legyen a méretbeli különbség;
 - a páronkénti keveredési entalpia legyen negatív.
- Mindezen kritériumoknak például a $\text{Mg}_{54}\text{Cu}_{28}\text{Ag}_7\text{Y}_{11}$

összetétel megfelel [6]. Az atomi méretek tartományában a nagyobb skálán homogén üvegszerkezet sajátos struktúrát mutat a véges atomi méretek és az atomokból felépülő jellegzetes atomi klaszterek miatt. E szerkezet következtében láthatunk lokális maximumokat az 1. ábrán bemutatott radiális eloszlásfüggvényen. Kísérletileg ez a rövid távú rendeződés a legegyszerűbben röntgen- vagy elektrondiffrakció segítségével mutatható ki. Az üvegszerkezet hosszú távú rendezetlensége miatt éles interferenciamaximumok helyett csak kisebb mértékű intenzitáshullámzás, úgynevezett amorf halók figyelhetők meg az üvegeken végzett diffrakciós mérésekben. A dermesztési eljárással előállított a $\text{Mg}_{54}\text{Cu}_{28}\text{Ag}_7\text{Y}_{11}$ összetételű BMG minta röntgendiffrakciós felvétele is ezt igazolja (4.a ábra). A 4.b ábrán ugyanezen amorf BMG fémüvegminta pásztázó kaloriméterrel, állandó felfűtési sebességgel felvett termogramja látható, amelyen az üvegekre jellemző T_g üvegesedési hőmérsékletet egy kétlépcsős (T_1 és T_2) kristályosodási folyamat követ, mielőtt a rendszer a metastabil üvegállapotból az egyensúlyi kristályos fázisba jut. A T_g feletti, de a kristályosodás alatti hőmérséklet-tartományt hívjuk a túlhűtött folyadék tartományának ($\Delta T_x = T_1 \pm T_g$), ahol a rendszer viszkózus folyadékként viselkedik.

Képlékeny deformáció fémüvegekben

Szilárd anyagokban terhelés hatására mechanikai feszültség alakul ki. Ez a feszültség fémüvegekben, a kristályos szilárd anyagokhoz hasonlóan, kezdetben rugalmas (reverzibilis), majd nagyobb feszültségértékeknél képlékeny (irreverzibilis) deformációt okoz. A rugalmas/képlékeny viselkedés határát az anyag σ_y folyáshatárával jellemezhetjük. A T_g üvegátalakulási hőmérséklet alatt és felett a fémüvegek képlékeny viselkedése jellegében eltérő (5. ábra).

Az üvegátalakulási hőmérséklet alatt a fémüvegek folyáshatára jellemzően magas, eléri a szilárd anyagokra meghatározható elméleti folyásfeszültség maximumát ($\sigma_y \approx 0,02E$), ahol E az anyag rugalmas viselkedését jellemző Young-modulusz. Fémüvegekben a képlékeny deformáció ebben a hőmérséklet-tartományban általában nyírási sávok formájában, lokalizáltan alakul ki és sok esetben az első nyírási sáv megjelenésével a minta töréséhez vezet. Ezért az üvegátalakulás alatti alacsony hőmérsékletek tartományában látszólag rideg viselkedést mutatnak a fémüvegek, mivel képlékeny alakíthatóságuk makroszkopikusan nem mérhető. Ezzel szemben, mint azt korábban említettük, az üvegátalakulási hőmérséklet felett a fémüvegek is viszkózus folyadékként viselkednek. Alacsonyabb és sokszor elhanyagolható folyásfeszültségük mellett η viszkozitásuk jellemzi őket. Az üvegek viszkozitása az üvegátalakulási pont alatt divergál és T_g -ben eléri a folyadékokra jellemző viszkozitás felső határát ($\eta = 10^{12} \text{ Pa}\cdot\text{s}$). Ezért fémüvegekben – az alacsony hőmérsékleti viselkedéssel szemben – T_g felett a képlékeny deformáció az egész min-



5. ábra. Tömbi fémüvegek folyásfeszültsége a Young-modulusszal normálva (σ_y/E) a hőmérséklet függvényében különböző deformációs sebességek mellett. A sematikus ábrán jól elkülöníthető a T_g üvegátalakulási hőmérséklet alatti inhomogén deformációs tartomány és a magas hőmérsékletű, a deformációs sebességtől erősen függő viszkózus viselkedés.

tára kiterjed és sok esetben jellegzetesen homogén marad, ami az üvegek úgynevezett szuperképlékenységre utal.

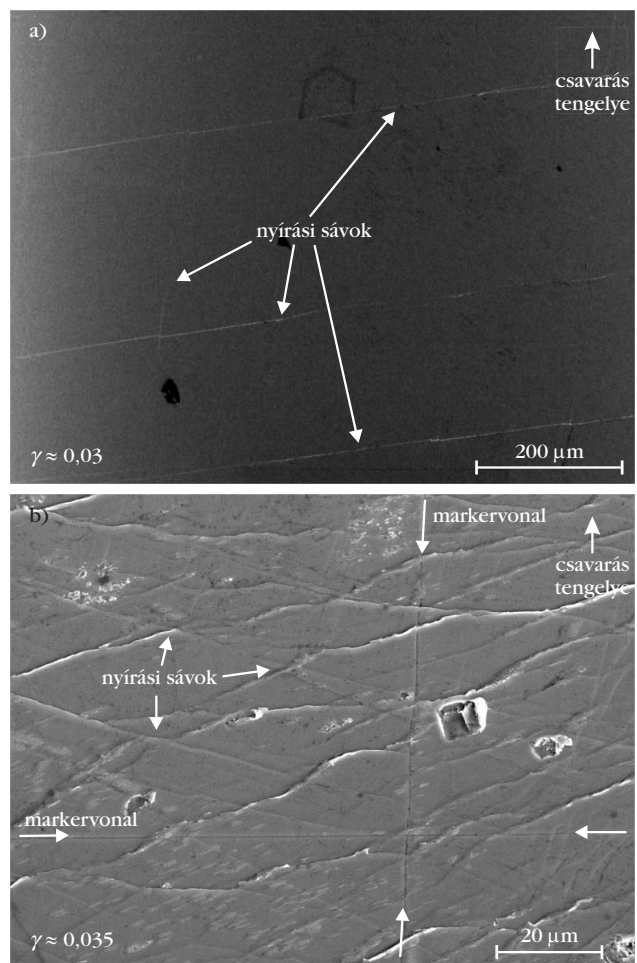
Az üvegek képlékeny deformációjának megértéséhez az amorf szerkezetet atomi skálán kell vizsgálnunk. Az üvegszerkezetben az atomi környezetek, vagy másképp atom *klaszterek*, sokféleséget mutatnak és viszonylag kis energiabefektetésre, vagy feszültség hatására egymásba tudnak alakulni. Ezért például külső feszültség hatására az üvegekben 10-100 atomot magukba foglaló lokális *nyírási transzformációs zónák* alakulnak ki. A nyírási zónák korrelált vagy korrelálatlan viselkedése felel az üvegek rugalmas és képlékeny viselkedésének jellegzetességeiért.

Deformációs sávok fémüvegekben

Fémüvegekben megfigyelhető nyírási sávokban jelentős képlékeny deformáció van jelen, azonban a képlékeny viselkedés extrém módon koncentrálnodik, általában ~ 10 nm vastagságú felületeket, nyírási sávokat hozva létre [7]. A térbeli lokalizációval párhuzamosan a sávok – a T_g alatti hőmérséklet-tartomány ellenére – könnyen alakíthatóvá, kis viszkozitásúvá válnak [8]. Például egyszerű nyújtás vagy összenyomás esetén a viszkozitás lokális csökkenése egy instabil lágyulási

folyamathoz vezet, ennek következtében az első a teljes mintán átérő nyírási sávban a deformáció minden határon túl – amit csak a minta mérete korlátoz – növekedhet. Nagyméretű fémüvegmintákban – a körülbelül állandó sávvastagság miatt – a lokálisan képlékeny deformáció a sáv belsejében a mintamérettel arányosan a $\gamma \approx 10^5$ – 10^6 értéket is elérheti. Ez a képlékeny deformáció mindenféle külső kontroll nélkül, jellegzetesen igen rövid idő alatt (10^{-3} – 10^{-1} s) alakul ki. A kontrolálatlan gyors folyamat közvetve több különböző változást – jelentős sokszerű hőhatást, kristályos kiválásokat és apró üregek megjelenését – is eredményezi a nyírási sávban és a sávot körülvevő néhány tíz nanométer vastag tartományban. A sáv elcsúszásával a nagy lokális képlékeny deformáció következtében kialakuló szerkezeti változások okozzák később a minta törését. Ezért nagyméretű, tömbi fémüvegminták jellemzően nagy rugalmas deformációkat képesek tárolni és így ideálisak olyan alkalmazásokban – például rugalmas sporteszközök – ahol a

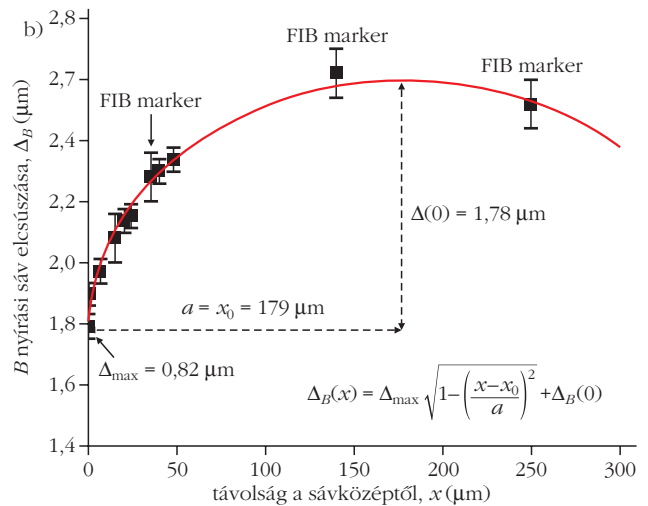
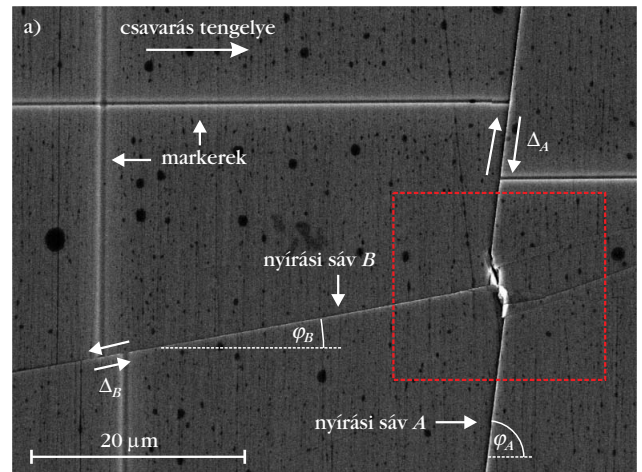
6. ábra. Pászttázó elektronmikroszkópos felvételek deformált Vitreloy 1b fémüvegekben kialakuló nyírási sávokról. A két deformációs állapot körülbelül ugyanakkora nyírási deformációnak felel meg, míg a kialakuló sávmintázat jelentősen függ az alkalmazott hidrosztatikus feszültségtől. Légköri nyomáson (a) a nyírási sávok egyenesek és jellegzetes távolságuk ~ 200 μm , míg 6 GPa hidrosztatikai nyomás mellett a sávok jellegzetes távolsága ~ 10 μm -re csökken és erősen girbe-gurba jelleget mutatnak [11].



reverzibilis rugalmas tulajdonságok meghatározók. Azonban, amint a külső feszültség eléri a fémüveg folyáshatárát a képződő deformációs sáv mentén ezek az eszközök eltörnek és a tárolt rugalmas energia egyrészt mozgási energiává, másrészt hővé alakul. Az ilyen hirtelen hő- és mozgásienergia-felszabadulással járó viselkedés sok alkalmazás esetében kerülendő, ezért a továbbiakban részletesen foglalkozunk a fémüvegek üvegátalakulási hőmérséklet alatti makroszkopikus képlékenységének kialakíthatóságával, és a képlékeny deformációt hordozó deformációs sávok viselkedésével, kölcsönhatásával.

Fémüveg mintákban makroszkopikus képlékenység kialakulásához a nyírási sávokat szabályozni, a bennük kialakuló képlékeny deformációt diszpergálni kell; elősegítve nagyszámú deformációs sáv képződését és a sávok által elválasztott két rugalmas tartomány közötti elmozdulás csökkentését. A sávok kontrollálása általában úgy lehetséges, hogy a sávokat hajtó feszültséget a minta egyes részeiben korlátozzuk. Erre alkalmas például a homogén fémüvegben kialakuló kiválási szerkezet, vagy olyan feszültségállapot létrehozása, amiben a minta egy része a folyásfeszültségnél kisebb feszültségnek van kitéve. Kutatómunkánk során a fémüvegben kialakuló deformációs sávok vizsgálatához ez utóbbi lehetőséget választottuk, és olyan deformációs technikákat (például szabadvégű csavarást [9] vagy nagynyomású csavarást [10]) alkalmaztunk, amelyekben a fémüveg minta inhomogén feszültségállapotban van. Így jelentős képlékeny deformációt alakítottunk ki makroszkopikus mintákban nagyszámú nyírási sáv létrehozásával (6. ábra).

Felmerült a kérdés, hogy a makroszkopikus minták alakítására alkalmas deformációs technikák esetében a mikroszkopikus (nanométeres) és a makroszkopikus (milliméteres) mérettartomány között mennyire tekinthető homogénnek a deformáció, vagyis a nyírási sávok milyen eloszlást és egyéb jellegzetességeket mutatnak ebben a köztes, mezoszkopikus (mikrométeres) mérettartományban. Ezért a képlékeny alakítás során kialakuló nyírási sáv szerkezetet részletesen vizsgáltuk mind szabadvégű csavarás (6.a ábra), mind nagynyomású csavarás (6.b ábra) esetén. A két deformációs állapot közötti jelentős különbséget az eltérő hidrosztatikus feszültség okozta. A hidrosztatikus feszültség általában nem játszik szerepet kristályos anyagok képlékeny alakításában, azonban az üveges szerkezetben kialakuló nyírási sávokra a 6. ábrán láthatóan jelentős hatást gyakorolt és a sávok sűrűségét, rendezettségét, kölcsönhatását, görbületét és a sávokban kialakuló elcsúszás mértékét is nagyban meghatározza. A nyírási sávokban létrejövő elcsúszások mérésére a szabadvégű csavaró minták felületén és a nagynyomású csavarásnak alávetett mintákon belül kialakított felületen fókuszált ionnyaláb (FIB) segítségével az alakítás előtt markereket hoztunk létre és ezen markerek deformációt követő elmozdulásából határoztuk meg a nyírási sávokban kialakuló elmozdulásokat. Szabadvégű csavarás esetében a sávok nagyobb távolsága (100-200 μm) miatt a markerekkel mért elmozdu-



7. ábra. (a) Pásztázó elektronmikroszkópos felvétel csavarással deformált Vitreloy 1b fémüvegek felületéről. A felületen a deformációt megelőzően fókuszált ionnyalábbal létrehozott markerek a sávok Δ_A és Δ_B elcsúszását mutatják. (b) A diszpergált B sáv elcsúszása kölcsönhatási ponttól mérve a sáv mentén a távolság függvényében és a mért értékekre illesztett analitikus kifejezés [12].

lások részletes analízisével két egymást metsző nyírási sáv kölcsönhatásának megértése is lehetővé vált.

A 7.a ábrán a markerekkel jelölt tartományban két egymást metsző nyírási sáv és kölcsönhatásuk következtében a metszéspont jobb oldalán kialakult diszpergált sáv szerkezet látható [12]. A sávok eloszlása alapján megállapíthatjuk, hogy még folytonos sávmozgás esetén is a képlékeny deformáció diszkrét sávokba áll össze, azonban ezek a sávok a két ekvivalens feszültséggel leírható irányban aszimmetrikus viselkedést mutatnak [12]. A folytonos sávelcsúszás során, a nagyobb elcsúszással rendelkező (A jelű) sáv megtartja eredeti nyomvonalát és a sávelcsúszás mértéke az egyes markereken állandó, míg a kisebb elcsúszással rendelkező (B jelű) sáv elcsúszása jelentősen változik a sáv mentén (7.b ábra) és a kölcsönhatás következtében sávokra diszpergálódik (7.a ábra). A sávelcsúszás változása alapján megállapítottuk, hogy a deformáció hatására a sávban külső feszültség hiányában is marad egy befagyott feszültségtér, ami a görbére illesztett jellegzetes függvény alapján egy, a

repedésekre jellemző feszültséglokalizációval írható le (7.b ábra). A sávok által kialakuló feszültségtér modellezésére alkotott szimuláció eredményeiből arra a következtetésre jutottunk, hogy a fémüvegekben kialakuló sávok diszkrét viselkedésének egyik fő oka az üvegszerkezetben végbemenő diffúzió.

Irodalom

1. R. Zallen: *The Physics of Amorphous Solids*. Wiley, New York (1983).
2. Baranyi A., Pusztai L.: Rendezetlenség kondenzált fázisokban. In *A kémia legújabb eredményei* sorozat. Akadémiai Kiadó, Budapest (1995).
3. S. Napolitano, E. Glynos, N. B. Tito, *Reports on Progress in Physics* 80 (2007) 036602.

4. N. Van Steenberge, S. Hóbor, S. Surinach, A. P. Zhilyaev, F. Houdellier, F. Mompiau, M. D. Baró, Á. Révész, J. Sort, *J. Alloys and Compounds* 500 (2010) 61–67.
5. A. Inoue, *Acta Mater.* 48 (2000) 279–306.
6. Á. Révész, Á. Kis-Tóth, L. K. Varga, J. L. Lábár, T. Spassov, *Int. J. Hydrogen Energy* 39 (2014) 9230–9240.
7. J. J. Lewandowski, A. L. Greer, *Nature Mater.* 5 (2006) 15–18.
8. J. Schroers, W. L. Johnson, *Phys. Rev. Lett.* 93 (2004) 255506.
9. Zs. Kovács, M. Ezzeldien, K. Máthi, P. Ispánovity, F. Chmelík, J. Lendvai, *Acta Mater.* 70 (2014) 113–122.
10. Zs. Kovács, E. Schafner, P. Szommer, Á. Révész, *J. Alloys and Compounds* 593 (2014) 207–212.
11. Á. Révész, Zs. Kovács: Severe Plastic Deformation of Amorphous Alloys (Review). *Materials Transactions* 66 (2019) 1283–1293.
12. Zs. Kovács, Á. Révész, M. Ezzeldien, J. Lendvai, *J. Alloys and Compounds* 817 (2020) 153327

A BEPICOLOMBO ŪRMISZIÓ MÉRFÖLDKÖVEI ÉS TUDOMÁNYOS CÉLKITŪZÉSEI A MERKŪR BOLYGÓNÁL

Bebesi Zsófia, Dósa Melinda, Juhász Antal,
Kecskeméty Károly, Németh Zoltán
Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest

A BepiColombo ūrmisszió az Európai Ūrügynökség (European Space Agency; ESA) és a Japán Ūrügynökség (Japan Aerospace Exploration Agency; JAXA) közötti együttműködés keretében jött létre. A kivitelezésben az ESA első számú szerződött partnere az Airbus vállalat védelmi és világűr (Defence and Space) szegmense volt. A küldetés célja a Merkúr bolygó minden korábbinál részletesebb megismerése, mágneses terének, valamint a környezetében zajló fizikai folyamatok monitorozása, de a kutatómunka ki fog

terjedni az égitest belső szerkezetének felderítésére is (1. ábra). A szonda a hordozó platformon és a napárnyékoló pajzsán kívül két tudományos keringő egységből áll: a bolygó felszínét vizsgáló Mercury Planetary Orbiterből (MPO) és a mágneses teret feltérképező Mercury Magnetospheric Orbiterből (Mio, korábbi nevén MMO). A két keringő egység összehangolt mérései új távlatokat nyitnak a bolygó környezetének kutatásában. A BepiColombo missziót az ESA Horizon 2000+ programjának részeként 2009 novemberében



Bebesi Zsófia okleveles csillagász (2003) és fizikus (2005) – Szegei Tudományegyetem, Ph.D. (2008, ELTE). 2003 óta az MTA KFKI RMKI munkatársa, 2012-től a Wigner FK Ūrfizikai és Ūrtechnikai Osztályának tudományos főmunkatársa. Elemezte a Cassini és a Venus Express ūrszondák adatait. Kutatói érdeklődése a bolygók mágneses tere és a napszél, illetve az interplanetáris mágneses tér közötti kölcsönhatás, a Titán plazmakörnyezetének és felső atmoszférája ionizációs folyamatainak vizsgálata.



Dósa Melinda 2014-ben végzett az ELTE geofizika mesterszakán, ūrkutatás szakirányon. 2014 óta a Wigner Fizikai Kutatóközpont doktorandusza, majd 2019-től poszt-doktor kutatója. Kutatási területe a belső helioszféra ūridőjárása, különös tekintettel a napszél folyamataira és a napszél-Merkúr kölcsönhatásokra. A Merkúr exoszférájának dinamikus változásait az olasz INAF intézet munkatársaival együttműködve kutatja. A BepiColombo ūrszonda PICAM műszerének társkutatója.



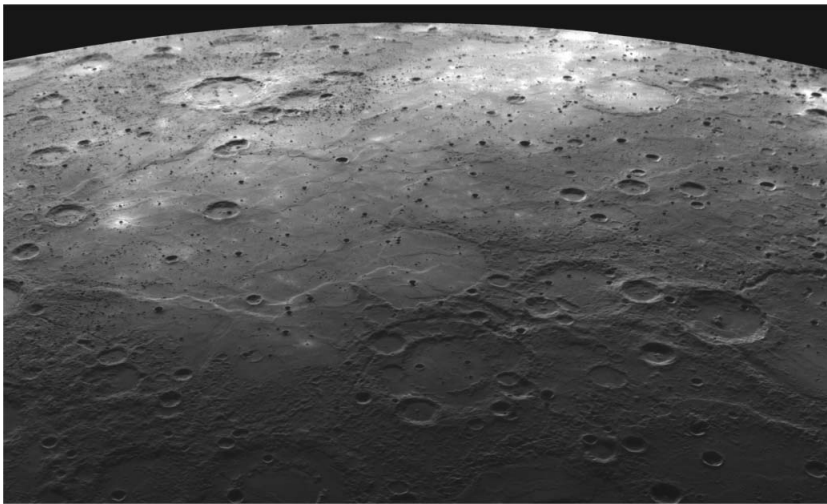
Juhász Antal 1988-ban végzett az ELTE fizikus szakán, 1989 óta dolgozik a KFKI Ūrfizikai osztályán. Doktori fokozatát 1993-ban szerezte meg. Jelenleg a Wigner FK Részecske és Magfizikai Intézetének tudományos főmunkatársa. Szakterülete a Naprendszerben található kozmikus por (bolygóközi, bolygók, holdak, üstökösök körüli por-plazma-elektromágneses tér kölcsönhatása) dinamikájának, térbeli eloszlásának modellezése a különböző ūrszondák poméréseinek értelmezéséhez, előrejelzéséhez.



Kecskeméty Károly 1974-ben fizikusként végzett az ELTE-n, a Wigner Fizikai Kutatóközpont tudományos tanácsadója. Kutatási területe az ūridőjárás, szoláris kozmikus sugárzás, az üstökösök plazmakörnyezete. Társkutató többek között a SOHO, STEREO, Cluster és a BepiColombo ūrmissziókban.



1. ábra. A BepiColombo megérkezik a Merkúr bolygóhoz, fantáziarajz (forrás: airbus.com).



2. ábra. A Merkúr felszíne a Messenger fényképén (forrás: NASA).

hagyták jóvá. Az indításra 2018. október 20-án került sor a Guyana Űrközpontból, és a szondapár a tervek szerint 2025. december 5-én fog pályára állni a Merkúr körül. A Merkúrt mostanáig csak két NASA űrszonda, a Mariner-10 (1974. szeptember 21.) és a MESSENGER (2011. március 18. – 2015. április 30.) tudta megközelíteni.

Az űrmissziót a Padovai Egyetemen dolgozó *Giuseppe „Bepi” Colombo* (1920–1984) mérnök-matematikusról nevezték el. Ő volt az, aki elsőként javasolta a hintamanőver alkalmazását az űrszondáknál, amelyet legelőször 1974-ben, a Mariner-10 esetében használtak ki – a módszer mára széles körben elterjedt. A



Németh Zoltán 1995-ben végzett az ELTE fizikus szakán, doktori fokozatát 2000-ben szerezte meg. 1998-tól az MTA KFKI RMKI munkatársa, jelenleg a Wigner FK Űrfizikai és Űrtechnikai Osztályának vezetője. Kutatói érdeklődése a helioszférikus mágneses tér szerkezetének, valamint a kozmikus sugárzásnak a bolygóközi térben történő terjedési folyamataira, annak elméleti hátterére és numerikus modellezésére terjed ki. Részt vett a Cassini és a Rosetta űrmissziók tudományos adatainak elemzésében is.

mágneses teret vizsgáló keringő egység, az MMO másik nevét, a Mio-t pedig a japán lakosság által javasolt több ezer név közül választották ki. Jelentése vízi út, amely a JAXA szerint többek között azt szimbolizálja, hogy az űrszonda úgy siklik a napszél közegeiben, mint a hajók a vízen.

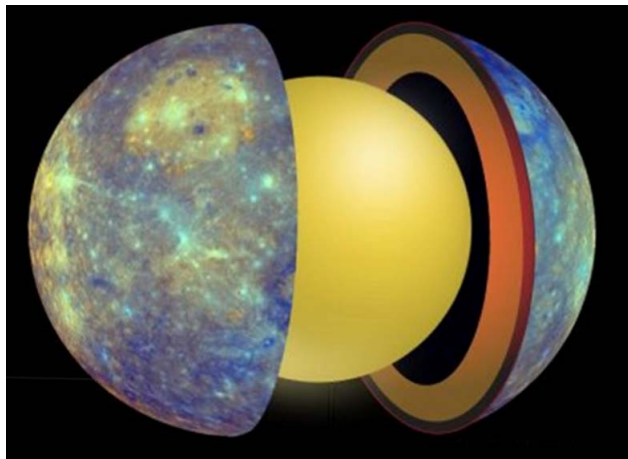
Az űrmisszió létrehozásában, egyes műszerek megépítésében magyar mérnökök is részt vettek, ennek kapcsán az érintett berendezések által mért tudományos adatokhoz a közreműködő magyar kutatóintézetek is hozzáférnek. Ezek egyike egy iontömeg-spektrométer, a Planetary Ion Camera (PICAM) [1], amelynek alacsony feszültségű tápegységét, valamint egy, a BepiColombo környezetét szimuláló szoftvert a Wigner Fizikai Kutatóközpont Űrfizikai és Űrtechnikai Osztályának mérnökei az SGF Kft. közreműködésével fejlesztették ki.

Ugyancsak magyar hozzájárulással készült a plazmahullámok vizsgálatára tervezett Plasma Wave Instrument (PWD), amihez az Eötvös Loránd Tudományegyetem (ELTE) Űrkutató Csoportja a BL Electronics Kft.-vel közösen dolgozta ki az intelligens jelfelismerő modul (ISDM) fedélzeti szoftverét.

Mit tudunk ma a Merkúrról?

A Merkúr (2. ábra) Naprendszerünk legbelső, a Naphoz legközelebb keringő bolygója, pályájának fél nagytengelye körülbelül 58 millió km, keringési periódusa mintegy 88 nap. A bolygó átlagos átmérője 4880 km, kisebb, mint például a Jupiter Ganymedes nevű holdja, vagy a Szaturnusz Titanja.

A Merkúr felszíne erősen kráterezett, mivel nem sokkal kialakulása után, ~4,6 milliárd éve már intenzíven bombázták a Naprendszer belsejében keringő üstökösök, kisbolygók, törmelékdarabok és a napszél. A felszíni morfológiáról az űrszondás megfigyeléseket megelőzően egyáltalán nem volt információnk, a bolygó forgásának ütemét sem ismertük. Elsőként a Mariner-10 közelítette meg a Merkúrt, és összesen három alkalommal (mindig a pálya naptávpontjában [*aphéliumban*]), ezek során a felszín 45%-át fotózta le. A MESSENGER már a teljes felszínt feltérképezte, valamint az északi féltekét lézeresen letapogatta, ezáltal részletes topográfiai térképekhez jutottunk. A Merkúr felszínén nincsenek jelentős magasságbeli eltérések (mint például a Hold vagy a Mars esetében), de számtalan becsapódási kráter borítja



3. ábra. A Merkúr átlagsűrűsége méretéhez képest kiugróan magas, feltételezhetően nagy, a térfogat mintegy 2/3-át kitöltő fém (vas-nikkel) magja van (forrás: space.com).

(amelyek közül hatot magyar származású művészekről neveztek el). Korábban a Merkúr vulkanikusan aktív volt, ennek jelei napjainkban is láthatók. Egyes térségekben hosszanti irányú repedéseket fedeztek fel, amelyek feltehetően idősebb felszíni alakzatok, és az égitest kihűlése, globális összehúzódása következtében jöhettek létre. Nemrégiben pedig olyan bemélyedésszerű felszíni alakzatokat fedeztek fel, amelyeknek – a becsapódási kráterekkel ellentétben – nincs peremük, a keletkezésükre vonatkozó elméletek jelenleg forró tudományos témának számítanak.

A bolygó felszíne fémek (Na, K, Mg) mellett illóanyagokban (víz, S, SO₂, HS) gazdag, ami meglepő, hiszen feltételezhetjük, hogy egy égitest minél közelebb kering a csillagához, annál hamarabb elveszíti az illékony összetevőket. Jelenleg nem ismeretes, hogy csak a felszínen található-e ilyen anyagok, vagy a bolygóttest belső részei is tartalmazzák. Ez a megfigyelés is azt sejteti, hogy a bolygókeletkezési modellek, amelyek a kialakulás idejére magas hőmérsékletekkel számolnak, talán nem helytállóak. Az illóanyagok jelenléte a vulkanizmus folyamatait is befolyásolja. A Merkúr átlagsűrűsége 5,427 g/cm³, ezáltal a Föld után a második legsűrűbb objektum a Naprendszerben (3. ábra). A jelenlegi bolygókeletkezési elméleteink szerint ez meglepő, de egy óriási, a bolygó térfogatának több mint felét kitevő vasmag jelenléte esetleg magyarázatot nyújthat rá – a Föld esetében a mag a bolygó térfogatának csupán 17%-át teszi ki. Számos kérdésre keressük tehát a választ a Merkúr keletkezésével kapcsolatban is.

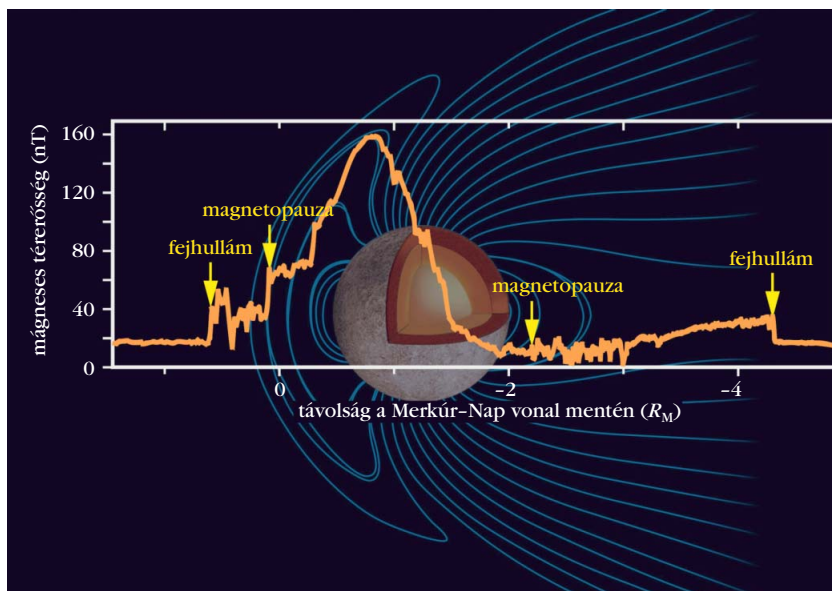
A Merkúr Nap körüli pályája igen különleges, mivel az égitest keringési és forgási periódusa pontosan 3:2 arányú, tehát két Nap körüli kerin-

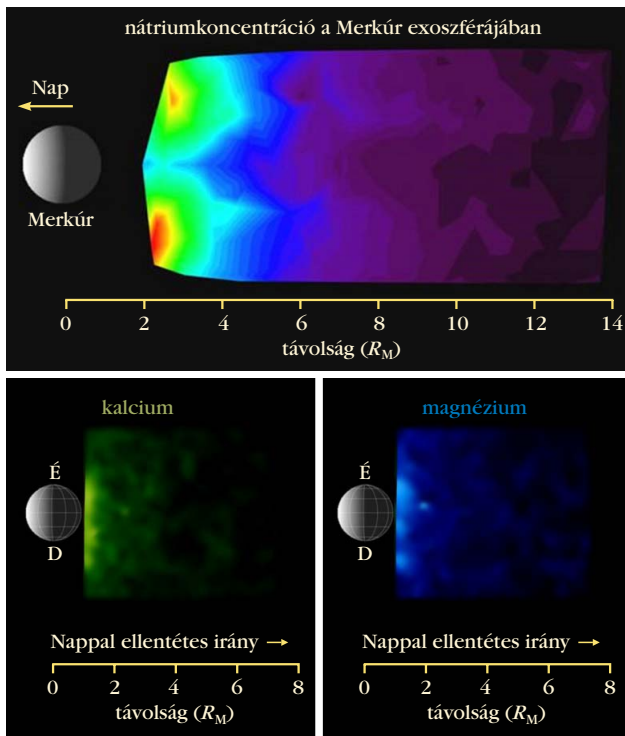
gés során a Merkúr háromszor fordul meg a tengelye körül. Ez ugyan nem a kötött keringés esetében megszokott 1:1-es rezonancia, de ez is stabil állapot, amely a Merkúr pályájának nagy excentricitása miatt alakulhatott ki. A pálya elnyúltsága folytán a Naptól mért távolság 46 millió és 70 millió km között váltakozik. A bolygókeletkezési elméletek szerint azonban a csillagukhoz közel keletkezett égitestek pályaeccentricitásának alacsonynak kellene lennie. Ebből adódóan azt is felvetették, hogy a Merkúr nem a Naprendszer belsejében, hanem távolabb, esetleg a Vénusz holdjaként jött létre, és később került át a belső, Nap körüli pályára. A Merkúr pályája az ekliptika síkjával 7°-os szöget zár be, valamint további érdekes tény, hogy a Merkúr tengelyhajlása mindössze 2°-os, emiatt évszakok nem alakulhatnak ki. A lassú forgás miatt azonban a felszínen mégis kialakultak adott helyszínekre jellemző klimatikus viszonyok, forróbb és hűvösebb területek.

A Merkúr felszínén, az egyenlítő Nap felé eső tartományában mért napállandó a Földön mért 1,370 W/m²-nek 4,59–10,61-szerese, a felszíni hőmérséklet pedig 100 K (árnyékban) és 700 K (a nappali oldalon) között mozog. A pólusok közelében és az árnyékos oldal krátereinek mélyén általában rendkívüli hideg jellemző, és ezekben a tartományokban akár vízjeget is találhatunk, ezt a MESSENGER űrszonda radarészlelései igazolták is. A jeget általában regolitréteg borítja, ami meggátolja a víz elpárolgását. A Merkúron jelen lévő víz becsült mennyisége 10¹⁴–10¹⁵ kg. A víz eredete egyelőre nem ismert, de a víz egyaránt származhat a belső tartományok kigázosodásából, vagy akár a Naprendszer belsejébe látogató üstökösöktől is.

A Mariner-10 annak idején már felfedezte a Merkúr kiterjedt, globális mágneses terét, ennek szerkezetét illusztrálja a 4. ábra. A planetáris magnetoszférák akadályt képeznek a napszél számára, és nem enge-

4. ábra. A Merkúr mágneses tere erősségének változása a távolság függvényében és a különböző plazmatartományok (forrás: NASA).





5. ábra. A nátrium, a kalcium és a magnézium elemek MESSENGER által megfigyelt szökési folyamatai a bolygó éjszakai oldalán – a csóvában (forrás: NASA).

dik a bolygófelszín közelébe hatolni a napszélbe befagyott interplanetáris mágneses teret. A Merkúr esetében például a földihez képest gyenge és kevésbé kiterjedt magnetoszféráról lehet szó, ami azt jelenti, hogy a napszél nagyobb energiájú részecskéi bizonyos mértékben eljutnak a felszínhez, és hozzájárulnak az erózióhoz. A Földhöz hasonlóan a Nap felőli oldalon kialakul egy lökéshullám (fejhullám), mivel a Naptól folyamatosan érkező napszélplazma áramlási sebessége szuperszonikus. A magnetopauza az a határfelület, ahol a mágneses nyomás és a napszél dinamikus nyomása egyensúlyba kerül.

Mivel a Merkúr aránylag kis méretű, és nagyon lassan forog a tengelye körül, a stabil, saját magnetoszféra jelenlétét meglepőnek találták, mivel a dinamóhatás létrejöttéhez, azaz a mag körüli fémes folyékony réteg mozgásban tartásához gyors forgás szükséges. A felszíni mágneses térerősség a Merkúr egyenlítője mentén ~ 300 nT, a földi mágneses térnek mindössze $\sim 1\%$ -a. A földtől eltérően a Merkúr mágneses tengelye és forgástengelye nagyon kis eltéréssel egybeesik, a dipólmomentum azonban nem a központban, hanem attól északra (~ 480 km-re, ami $0,2$ Merkúr-sugárnak felel meg) helyezkedik el. Ennek következtében a mágneses tér az északi sarkon nagyjából háromszor erősebb, mint a délin, valamint a déli sarkon nagyobb területen figyelhetünk meg nyitott erővonalakat. A Merkúr belsejében működő mágneses dinamót feltehetően az excentrikus pálya miatt fennálló erőteljes árapályhatások tartják fenn.

A MESSENGER korábbi mérései arra utalnak, hogy a Merkúr magnetoszférája és az interplanetáris tér

között gyakran jönnek létre fluxustransfer-események, amikor a napszél részecskéi elérhetik a felszínt [2]. Az ezt megvalósító mágneses „örvények” átmérője akár 800 km-es is lehet, ami jelentős egy ilyen kis méretű bolygó esetében. A jelenség a Földnél már ismeretes rekonnekció (a mágneses erővonalak átkötődése) révén zajlik, amikor a planetáris és az interplanetáris erővonalak összekapcsolódnak. A mérések arra utalnak, hogy a rekonnekció a Merkúr esetében sokkal gyakrabban következik be, mint Földünkönél. Erős napszélnyomás esetén előfordul az is, hogy a Nap felőli oldalon a magnetoszféra annyira összenyomódik, hogy a magnetopauza eléri a felszínt. További érdekesség, hogy mivel a dipóltér nem szimmetrikus, ezért a déli féltekén nagyobb arányban szökhetnek el részecskék a Merkúr exoszférájából.

Viszonylag sűrű, kiterjedt atmoszféra fenntartásához a Merkúr környezete túlságosan forró, és folyamatosan intenzív hatásoknak van kitéve a napszél által. Annak idején a Mariner-10 műszerei kimutatták egy nagyon ritka légkör jelenlétét, amelynek akkor feltételezett összetevői a hidrogén, a hélium és az oxigén voltak [3]. A MESSENGER méréseinek köszönhetően ma már tudjuk, hogy a Merkúrnek nincs stabil atmoszférája, csak exoszférája, ahol a részecskék közepes szabadúthossza összemérhető a réteg vastagságával [4]. A MESSENGER űrszonda adatainak segítségével lehetőség nyílt az exoszféra és a napszél közötti dinamikus kölcsönhatás vizsgálatára is. Az exoszférában tartózkodó részecskék könnyen elszökhetnek az interplanetáris térbe, elsősorban töltéscsere révén, amikor például egy beérkező, nagy energiájú napszél eredetű proton ionizál egy semleges, exoszférikus részecskét. Ekkor az újonnan keletkezett ion az interplanetáris mágneses tér hatására együtt kezd mozogni a napszéllel, és eltávozik a bolygó környezetéből. A Merkúr esetében az exoszférába folyamatosan érkeznek részecskék, mind a felszínről (a napszél és a sugárzás hatására), mind a magnetoszféra más tartományjaiból. Az atmoszféra/exoszféra nyomása rendkívül alacsony, kevesebb, mint 1 nPa. A részecskék szökése elsősorban a nátrium D-vonalában figyelhető meg, kiterjedt, akár 2000 Merkúr-sugárnyi hosszúságú csóva formájában (5. ábra).

A bolygóközi mikrometeoroidok (IDP) folyamatosan bombázzák (20 km/s) a Merkúr felszínét, és ezek becsapódásakor a kráterképződés során jelentős mennyiségű porszemcse lökődik ki a Merkúr felszínéről (az egy részecske által kiváltott porfelhő teljes tömege a beérkező porszemcse tömegének akár több ezerszerese is lehet). Az ütközés során hő is keletkezik, ami megolvaszthatja, vagy elpárologtathatja a felszíni anyag egy részét (ilyenkor lehetséges a Na-képződés). A kilökött/elpárologtatott anyag ezután az atmoszférába kerül [5], ahonnan ballisztikus pályán visszahullik a felszínre, ezáltal folyamatosan alakítva a Merkúr felszíni tulajdonságait. A Na-atomok a felszínen pattogva, bolyongva vándorolnak, hat rájuk a fénynyomás, ennek következtében az atomok nagyobb sebességre tehetnek szert, és csóvát alakíthatnak ki a Merkúr mögött, illetve akár el is szökhetnek

a bolygóról. Ezen atomok alkotják a Merkúr exoszférajának egy részét. Kis mennyiségben por is elszökhet a Merkúr gravitációs teréből, ha a kilökődési sebesség nagyobb a Merkúr szökési sebességénél. A Merkúr pályájának 7° -os inklinációja miatt az IDP-fluxus időfüggő [6]: akkor a legnagyobb, amikor a Merkúr az ekliptika síkjának (egyben az IDP szimmetriasíkja) közelében van, és lecsökken, amikor a Merkúr az ekliptika síkjától távolabb (fölötte/alatta) kering. Ezáltal a bolygó felszínén a mikrometeoroidok hatására keletkező Na mennyisége időben változó lesz.

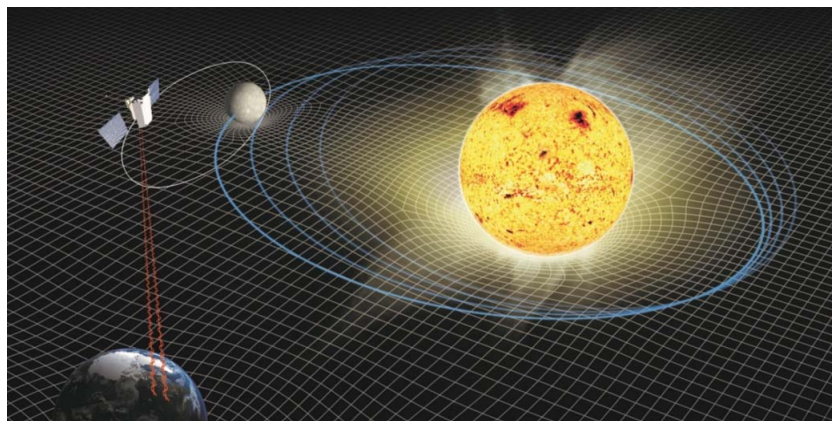
Urban Le Verrier, 19. századi francia csillagász és matematikus észrevette, hogy a Merkúr pályájának lassú precesszióját a newtoni mechanikával nem lehet megmagyarázni. Ekkor a probléma feloldására többek között egy, a Naphoz még közelebb keringő égitest jelenléte is felmerült, azonban a megoldást Einstein általános relativitáselmélete hozta meg. A precesszió értéke nagyon kicsi ugyan, azonban a mért eltérést a relativitáselméletből adódó hatással jól lehet magyarázni. Az elmélet ezen konkrét alkalmazása nagymértékben hozzájárult az elv szélesebb körű elfogadásához. A MESSENGER szonda által szolgáltatott adatok alapján már végeztek ilyen jellegű vizsgálatokat (6. ábra), de a BepiColombo méréseiből a Merkúrnál érvényesülő relativisztikus hatásokról is minden korábbiánál pontosabb képet kaphatunk majd.

Mivel még számos nyitott kérdés maradt, ezek megválaszolására az egyre jobb felbontású és nagyobb adatmennyiség továbbítására alkalmas, korszerű űreszközök használatával a jövőben számos lehetőségünk nyílik majd. A következőkben a jelenleg a Merkúr bolygóhoz tartó BepiColombo űrmisszió részletesebb ismertetésére kerül sor.

A BepiColombo fontosabb technikai paraméterei

Az űrmisszióknak¹ három komponense van, amelyek a Merkúrhoz való megérkezést követően különválnak, és önálló űrszondákként keringenek tovább a bolygó körül. Ezek egyike az ESA által létrehozott, és a szondák meghajtását végző Merkúr Transzfer Modul (Mercury Transfer Module; MTM). A másik kettő pedig a korábban már említett, Merkúr körül kerin-

¹A BepiColombo űrmisszió hivatalos honlapja az ESA-nál: www.sci.esa.int/web/bepicolombo és a JAXA-nál: www.global.jaxa.jp/projects/sas/bepi

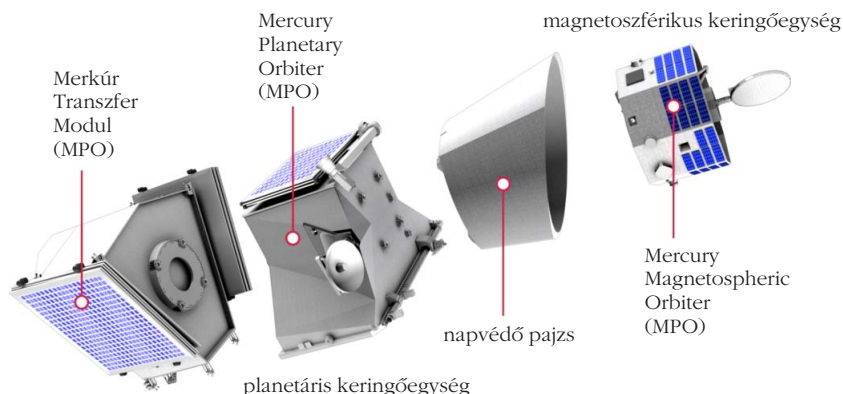


6. ábra. A MESSENGER űrmisszió keretében a NASA és az MIT kutatói közösen tanulmányozták a Nap Merkúr pályájára gyakorolt közvetlen hatását (forrás: NASA/GSFC).

gő egység (Mercury Planetary Orbiter; MPO – ESA), valamint a magnetoszférikus keringő egység (Mercury Magnetospheric Orbiter; MMO, azaz Mio – JAXA). A három egység, valamint a Mio napvédő pajzsa az indítás és a Merkúrhoz vezető út során össze van csatlakoztatva, ezáltal jelenleg még egyetlen űrobjektumot (Mercury Cruise System; MCS) alkotnak (7. ábra).

A transzfermodul (MTM) feladata a hozzá rögzített két tudományos űrszonda eljuttatása a Merkúrhoz. Meghajtása szoláris elektromos hajtóműrendszerrel valósul meg, ami napelemek és manőverező ionrakéták kombinációját jelenti. Az ionhajtómű négy komponense egyenként 145 mN tolóerő kifejtésére képes, ezáltal jelenleg ez a világűrben valaha alkalmazott legnagyobb teljesítményű meghajtórendszer. Az utazóegység két 14 méter hosszú napelemtáblával is fel van szerelve. Ugyancsak az MTM látja el energiával az odaút időtartamára részlegesen hibernált két keringő szondát is (az MPO tartja a rádiókapcsolatot a Földdel, az MMO alvó üzemmódban van). A Naptól való távolság függvényében a napelemtáblák 7 és 14 kW közötti teljesítményt termelnek, a rakéták pedig egyenként 2,5–4,5 kW-ot vesznek fel, az igénybevétel függvényében. A Naprendszerből kifelé tartó űrmissziókkal ellentétben a BepiColombo fokozatos fékezésére van szükség már jóval a Merkúr körüli pályára állítást megelőzően. Közvetlenül a pályára állítást megelőzően az MTM leválik, majd a két keringő egy-

7. ábra. A BepiColombo űrmisszió technikai egységei (forrás: ESA).



1. táblázat

Az MPO űrszonda tudományos műszerei

az MPO tudományos berendezései	funkcióik
BepiColombo Laser Altimeter (BELA)	lézeres magasságmérő
Italian Spring Accelerometer (ISA)	gyorsulásmérő
Mercury Magnetometer (MPO-MAG, MERMAG)	mágneses tér (nagyság, irány) mérése
Mercury Radiometer and Thermal Infrared Spectrometer (MERTIS)	sugárzásmérő és IR spektrométer
Mercury Gamma-ray and Neutron Spectrometer (MGNS)	gamma-sugárzás és neutron-spektrométer
Mercury Imaging X-ray Spectrometer (MIXS)	képkalkító röntgenspektrométer
Mercury Orbiter Radio-science Experiment (MORE)	rádióhullámok vizsgálata
Probing of Hermean Exosphere by Ultraviolet Spectroscopy (PHEBUS)	UV spektrométer az exoszféra vizsgálatára
Search for Exosphere Refilling and Emitted Neutral Abundances (SERENA) <ul style="list-style-type: none"> • ELENA (Emitted Low-Energy Neutral Atoms) • STROFIO (STart from a ROTating Field mass spectrometer) • MIPA (Miniature Ion Precipitation Analyser) • PICAM (Planetary Ion CAMera) 	az exoszférát újratermelő és az onnan kilépő semleges részecskék kutatása (kis energiájú semleges atomok, tömegspektrométer, csapódó ionok vizsgálata, ionkamera)
Spectrometers and Imagers for MPO BepiColombo Integrated Observatory System (SIMBIO-SYS)	spektrométerek és képkalkító berendezések rendszere
Solar Intensity X-ray and Particle Spectrometer (SIXS)	szoláris röntgenintenzitás-mérő és részecskespektrométer

ség együtt halad tovább, míg az MPO közreműködésével a Mio is a tervezett pályájára kerül majd.

Az MPO tömege 1150 kg, és az energiaellátását nap-elemrendszerrel valósítja majd meg, valamint a nap-elemtáblák egyben arról is gondoskodnak, hogy a szonda hőmérséklete 200 °C alatt maradjon. A nap-elemrendszert folyamatosan forgatni kell ahhoz, hogy

merőleges. Poláris pályán fog keringeni, ellipszispályájának közelpontja (perihermium) 590 km, legtávolabbi pontja (apohermium) pedig a tervek szerint 11 640 km-re lesz a bolygó felszínétől. A Mio oldalai 90 W-os nap-elemtáblákkal vannak beborítva, a szonda alsó és felső felületei pedig a hőmérséklet szabályozásában vesznek részt, emellett a Merkúrig vezető úton egy napárnyékoló pajzs veszi körül a szonda-

még képes legyen a megfelelő energia előállítására, de hűtő funkcióját is el tudja látni. Az MPO-nak 11 fedélzeti berendezése van, ezeket az 1. táblázatban foglaltuk össze. A műszerek többségét – a túlhevülés elkerülése végett – a szonda nadírpontjának közelében helyezték el, amely a szondához rögzített koordináta-rendszerben a –z irányt jelenti, és a keringés során mindig a bolygó felszíne felé néz majd. 1 méteres átmérőjű rádióantennája a szonda zenit felőli oldalára, egy rövid rúd végére került, a sáv szélesség éves szinten 1550 Gbit adat lehozatalát teszi lehetővé.

A Merkúr mágneses terének átfogó vizsgálatára tervezett Mio (MMO) szondát Japánban fejlesztették és építették, a hasáb alapja szabályos nyolcszög (oldallapjainak mérete: 180 cm × 90 cm), tömege 285 kg. Fedélzetén 5 műszercsoport kapott helyet, közülük négy plazma- és pordetektor, valamint egy magnetométer. Az űrszonda forgásstabilizált, forgástengelye a Merkúr egyenlítőjére

testet. A szondáról évente 160 Gbnyi adat hozható le a Földre. A Mio tudományos berendezéseit a 2. táblázat tartalmazza. A misszió részeként tervbe volt véve egy kisméretű (44 kg) leszállógység (Mercury Surface Element) is, ezt azonban még 2003-ban levették a tervezett berendezések listájáról. Az 1 méteresnél kisebb átmérőjű, korong alakú berendezés körülbelül egy héten keresztül működött volna a Merkúr felszínén, tervezett leszállóhelyén, 85°-os szélességen, a terminátor közelében. Műszercsomagja kamerákból, spektrométerekből, egy környezeti paramétereket mérő berendezésrendszerekből, egy szeizmométerből, talajvizsgáló egységből és egy apró roverből állt volna.

2. táblázat

A Mio űrszonda tudományos műszerei

a Mio tudományos berendezései	funkcióik
Mercury Plasma Particle Experiment (MPPE) <ul style="list-style-type: none"> • Mercury Electron Analyzers (MEA1, MEA2) • Mercury Ion Analyzer (MIA) • Mass Spectrum Analyzer (MSA) • High-Energy Particle instrument for electrons (HEP-ele) • High-Energy Particle instrument for Ions (HEP-ion) • Energetic Neutrals Analyzer (ENA) 	a Merkúr környezetében lévő plazma vizsgálata (elektronok, ionok), tömegspektrométer, nagy energiájú ionok, nagy energiájú semleges részecskék detektálása
Mercury Magnetometer (MMO-MGF)	a Merkúr-magnetoszféra és a napszél vizsgálata
Plasma Wave Investigation (PWI)	plazmahullámok észlelése, elektromos tér, elektromágneses hullámok a magnetoszférában és a napszélben
Mercury Sodium Atmosphere Spectral Imager (MSASI)	a bolygó nátriumatmoszférájának spektrális vizsgálata
Mercury Dust Monitor (MDM)	a Merkúrról és az interplanetáris térből érkező por vizsgálata

3. táblázat

A BepiColombo interplanetáris útjának fontosabb mérföldkövei

dátum	esemény
2018. október 20.	indítás
2020. április 6.	a Föld megközelítése
2020. október 12.	1. Vénusz-megközelítés
2021. augusztus 11.	2. Vénusz-megközelítés
2021. október 2.	1. Merkúr-megközelítés
2022. június 23.	2. Merkúr-megközelítés
2023. június 20.	3. Merkúr-megközelítés
2024. szeptember 5.	4. Merkúr-megközelítés
2024. december 2.	5. Merkúr-megközelítés
2025. január 9.	6. Merkúr-megközelítés
2025. december 5.	pályára állás
2026. március 14.	az MPO eléri végleges pályáját

A BepiColombo hosszú útja a Merkúrhez, és a bolygó körül tervezett manőverei

A szondacsomag hét évig utazik az interplanetáris térben, míg a szétváló, individuális űreszközök 2025 decemberében várhatóan pályára állnak a Merkúr körül. Az út során több alkalommal hajt végre gravitációs hintamanővert a Föld, a Vénusz, illetve még a Merkúr mellett is. Az ESA 35 méteres átmérőjű Cebreros teleszkópja lesz az adatok elsődleges földi átvevője a szondáktól, valamint a parancsokat is ezen az állomáson keresztül adják majd le. A tervezett manővereket a pályára állításra és az azt megelőző időszakra vonatkozóan a 3. táblázat tartalmazza. Az űrmisziónévleges szakasza 2027. május elsejéig tart, ezután egyéves hosszabbítás várható.

A hat Merkúr-megközelítésnek az a célja, hogy a szonda bolygóhoz viszonyított sebességét fokozatosan (1,76-ról 1,09 km/s-ra) csökkentse. A negyedik Merkúr-megközelítést követően a BepiColombo már a Merkúréhoz hasonló pályán fog keringeni a Nap körül, és ekkor már a bolygó közelében marad. Egy következő manőverrel végül olyannyira lecsökkentik a relatív sebességet, hogy a Merkúr 2025. december 5-én képes lesz befogni az űrszondát, ami ezáltal poláris pályára kerül majd. Ekkor már csak egy kis beavatkozásra lesz szükség, és a szonda átkerül a végső pályájára, 178 ezer km-es apohermiummal. Itt a két keringő

egység leválik a transzfermodulról, majd kémiai üzemelésű meghajtó rakétákkal módosítják pályáikat, és felpörgetik a Mio szondát (8. ábra).

A Merkúr körüli keringésük során az MPO és az MMO is poláris pályán fognak mozogni. Az MPO a Nap felőli oldalon 400 km-re közelíti meg, a csóvában pedig maximálisan 1500 km-re fog eltávolodni a bolygó felszínétől, 2,3 órás keringési periódussal. Az MMO pályájának Merkúr-közeli pontja szintén a nap-pali oldalon lesz, 400 km-es magasságban, legtávolabbi pontja pedig a csóvában, a felszíntől 12 000 km-re. Az MMO keringési periódusát 9,3 órára tervezik.

Milyen tudományos eredmények várhatók a BepiColombo űrmissziótól?

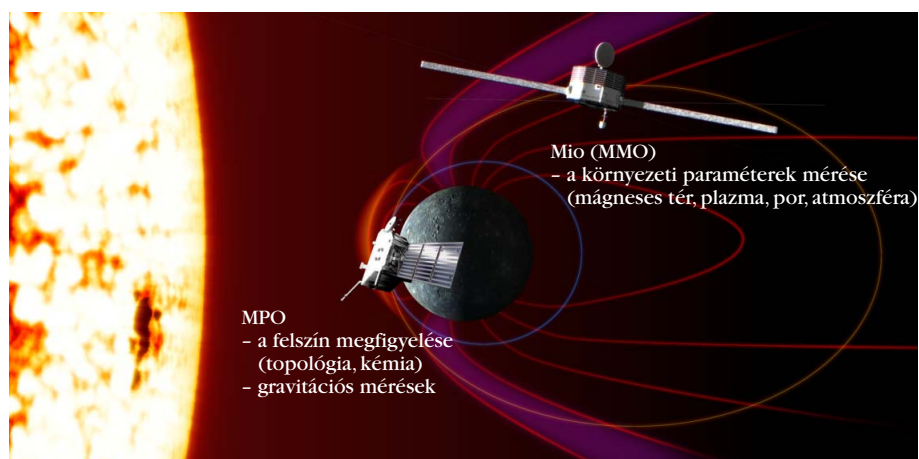
A BepiColombo elsődleges céljai között szerepel annak alaposabb megismerése, hogy miként alakulhattott ki, és hogyan fejlődött az idők során egy, a központi csillagához közel keringő bolygó. Ugyancsak fontos annak megértése is, hogy milyen alkotóelemekből, milyen struktúrával, geológiával, külső hatásokkal jött létre a napjainkban megfigyelhető égitest (9. ábra).

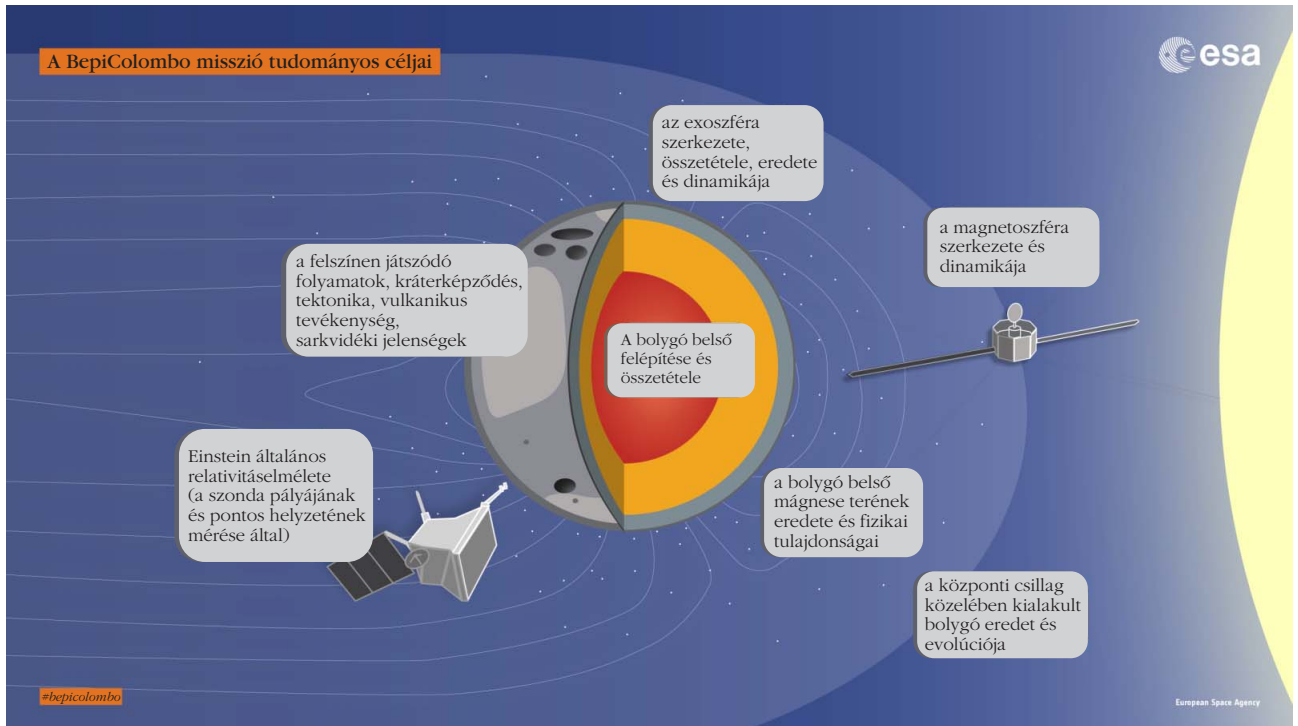
A plazmavizsgáló berendezések méréseinek feldolgozásából meghatározható az atmoszféra felső rétegeinek összetétele, dinamikája, valamint a Merkúr eredetű részecskék szökési folyamatai és azok sebessége. Tanulmányozhatjuk a magnetoszféra szerkezetét, dinamikáját, a benne zajló folyamatokat, a mágneses tér eredetét.

Az űrmisszió időtartama alatt vizsgálatokat végeznek majd annak megállapítására is, hogy milyen lehet a bolygómag szilárd és cseppfolyós tartománya, valamint meghatározzák méretüket. Feltérképezik a gravitációs és a mágneses teret. Az orosz hozzájárulásnak köszönhetően gamma-sugárzás- és neutronspektrométerekkel lehetőség nyílik a poláris tartományok víz(jég) tartalmának vizsgálatára is azon kráterek mélyén, ahová sohasem jut el a napfény.

A BepiColombo űrmisszió MPO és MMO űrszondái a MESSENGER-nél közelebbi pályákon fognak kerin-

8. ábra. Az MPO és az MMO keringési pályái az űrmisszió időtartama alatt (forrás: JAXA, ESA).





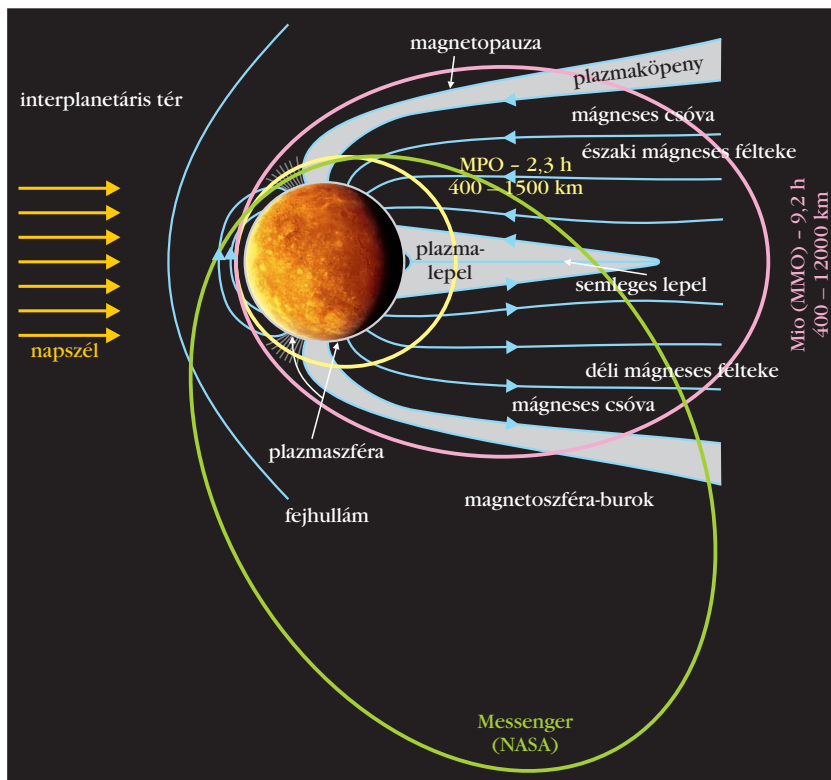
9. ábra. A BepiColombo űrmisszió tudományos célkitűzései (forrás: ESA).

geni a Merkúrhoz. A két űrmisszió szondáinak trajektóriáit a 10. ábra mutatja. A BepiColombo szondák minden korábbinál közelebbi, folyamatos megfigyélést tesznek majd lehetővé a Merkúr plazmakörnyezetében. A két szonda egyidejű keringése, ezáltal a mé-

rési adatok korreláltatása révén a fizikai folyamatok szélesebb spektrumú, nagyobb térbeli felbontású vizsgálatát teszi lehetővé.

Az MPO szonda fedélzetén található két alacsony energiájú töltőtérzszecke-detektor egyike, a Planetary

10. ábra. A Merkúr mágneses terének tartományai és a korábban odalátogató MESSENGER, valamint a BepiColombo MPO és MMO szondáinak pályái (forrás: MPS).



Ion Camera (PICAM) kifejlesztésében a Wigner Fizikai Kutatóközpont mérnökei és fizikusai is részt vettek. A PICAM iontömeg-spektrométer, amelynek elsődleges feladata azon folyamat vizsgálata, amely során a Merkúr talajából kilökődő semleges részecskék ionizálódnak, majd a külső és belső eredetű elektromágneses terek hatására áthaladnak a Merkúr plazmakörnyezetén, és végül a napszél hatására végleg eltávoznak a bolygó közeléből. A PICAM mérései által információhoz jutunk az ionok összetételéről, energiájáról, valamint térbeli és irányeloszlásáról. A vizsgált energiatartomány felső határa 3 keV lesz, valamint egészen a Xe-ig képes lesz azonosítani az általa érzékelt ionokat.

Ezek a megfigyelések egyedülálló lehetőséget nyújtanak majd a felszíneredetű, alacsony energiájú részecskék tanulmányozására, származási régióik beazonosítására, összetételükre, a kilökődés mechanizmusára vonatkozóan, valamint egyidejűleg a felszíni erózióért, a részecskék felszínről való eltávolításáért fe-

lelős napszél monitorozására is. Mindezek nagyban hozzásegítenek majd bennünket annak megértéséhez, hogy milyen folyamatok révén jött létre a Merkúr napjainkban is megfigyelhető ritka exoszféra.

A BepiColombo űrmisszió MMO űrszondáján található por-detektorral (Mercury Dust Monitor – MDM) kisméretű porszemcséket ($m > 10^{-13}$ g) lehet detektálni a Merkúr körüli térségben [7]. Az MMO elliptikus pályájának pericentruma 400 km, ahol elsődlegesen a Merkúr felszínéről – a nagy sebességű bolygóközi mikrometeoroidok folyamatos bombázása következtében – kilökődött porfelhő részecskéit észlelheti, míg az apocentrum távolságban (12 000 km) főként bolygóközi porszemcsék (IDP-k) becsapódását lehet mérni. Az MMO lesz az első olyan űrszonda, ami in-situ porméréseket végez majd a Merkúr körül. Az MDM négy piezoelektromos elven működő érzékelő lappal (teljes 64 cm^2 érzékelő felülettel) ellátott detektor, ami a beeső porszemcsék impulzusát méri.

A porszemcsék impulzusát a piezoelektromos feszültséggel hullámformájából lehet meghatározni, a porszemcsék eredetét pedig azok pályáinak tulajdonságaiból – a detektálási pozícióból és az érzézési irányból – lehet kikövetkeztetni. Az MDM adatok értékes információval szolgálhatnak a bolygóra érkező por fluxusáról, ami nagy részben befolyásolja a Merkúr-felszíni regolit tulajdonságait, és kapcsolatban van a bolygó híg atmoszférájában (exoszférájában) elsődlegesen megtalálható Na mennyiségével. Becslések szerint az MDM 1 év alatt nagyságrendileg 200 IDP szemcsé ($m > 10^{-13}$ g, $v = 30 \text{ km/s}$ feltételezéssel) beütökését detektálhatja. Ahogy korábban már említettük, az IDP-fluxus és a Merkúr atmoszférájában mért Na fluxusának időfüggése között gyenge korreláció áll fenn, amely a bolygó pályájának 7° -os inklinációjával hozható kapcsolatba. Egy ilyen gyenge korrelációt már sikerült kimutatni földi megfigyelésekkel, azonban az MDM mérései egyedülálló adatokat szolgáltathatnak azokról a tényleges fizikai folyamatokról, amelyek a bolygó ritka exoszféráját alakítják. Az MDM mérései pontosabb képet adhatnak Nap-

rendszerünk Merkúr környéki tartományában az IDP-k eloszlásáról és térbeli sűrűségéről, ami jelenleg csak az 1 CSE-nél mért értékek extrapolációjából, illetve elméleti modellezésekből ismert.

A 3 vevőből álló és 2 sor elektromos és kétféle mágneses érzékelőhöz kapcsolódó PWI (Plasma Wave Investigation) elnevezésű plazma- és rádióhullám-megfigyelő rendszer első alkalommal végez in-situ és távérzékelési méréseket a bolygó magneto- és exoszférájában. A megfigyelésekből az unikális, nem MHD dominált és ionoszféra nélküli magnetoszféra szerkezetére, dinamikájára és energiacsere-folyamataira, illetve a nagy dinamikus nyomású napszél és a bolygó gyenge mágneses tere kölcsönhatására kapunk információt. A berendezés emellett alapvető plazmadiagnosztikát is végez az elektronsűrűség és -hőmérséklet mérésével.

Számos érdekes és fontos tudományos vizsgálatra lesz majd tehát lehetőség, korábbi ismereteink kibővítésére, a modellek pontosítására, valamint az űrmisszió megvalósítása során felmerült technológiai problémák megoldásai is utat nyitnak a gyorsabb, hatékonyabb űreszközök kifejlesztése felé.

Irodalom

1. Orsini, S. et al.: SERENA: A suite of four instruments (ELENA, STROFIO, PICAM and MIPA) on board BepiColombo-MPO for particle detection in the Hermean environment. *Planetary and Space Science* 58/1–2 (2010) 166–181.
2. Steigerwald, B.: Magnetic Tornadoes Could Liberate Mercury's Tenuous Atmosphere. *NASA Goddard Space Flight Center* (2009).
3. Broadfoot, A. L. et al.: Mercury's Atmosphere from Mariner 10: Preliminary Results. *Science* 185 (1974) No. 4146, 166–169.
4. Domingue, D. L. et al.: Mercury's Atmosphere: a Surface-Bounded Exosphere. *Space Science Reviews* 131 (2007) 161–186.
5. Kameda, S., et al.: Interplanetary dust distribution and temporal variability of Mercury's atmospheric Na. *GRL* 36 (2009) L15201, doi:10.1029/2009GL039036
6. Müller, M. et al.: Estimation of the dust flux near Mercury. *Planetary and Space Science* 50 (2002) 1101–1115.
7. Nogami, K., et al.: Development of the Mercury dust monitor (MDM) onboard the BepiColombo mission. *Planetary and Space Science* 58 (2010) 108–115.



Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat Küldöttgyűlése
2020. szeptember 12-én, szombaton 10:00 órai kezdettel
az Eötvös Egyetem Északi Tömb -1.75 Konferenciateremben lesz.

A hagyományos napirend előtti szakmai előadás:
Pernecky László: Eötvös Loránd, a fotográfus nyomában
a Dolomitokban (2003, 2008)

A CP-SZIMMETRIASÉRTÉS KÍSÉRLETI MEGFIGYELÉSE NEUTRÍNÓÍZ-OSZCILLÁCIÓKBAN

Radics Bálint

Institute for Particle Physics and Astrophysics
ETH Zürich, Svájc

A *Tokai-to-Kamiokande* (T2K) kísérlet nemrég tette közzé azokat az eredményeket, amelyek alapján a neutrínók ízátalakulásai során [1] (a leptonok közül először) a CP-szimmetriasértés [2, 3] jeleit mutathatják. Az elemi részecskék világában a szimmetriasértés jelensége ma már nem meglepő. Azonban a gyenge kölcsönhatásban résztvevő neutrínóknak mindig is különleges szerepük volt a természet alapvető építőköveinek megismerésében. A neutrínók egy sor különleges kölcsönhatási és szimmetriasértési tulajdonsággal rendelkeznek. Bár az anyaggal csak a gyenge kölcsönhatáson keresztül lépnek kapcsolatba, az Univerzumban a fotonok után a második legsűrűbben előforduló elemi részecskék. Már csak ezért is fontos kérdés, hogyan mérték meg ezt a jelenséget, milyen újabb tulajdonságaikra kezd fény derengeni a kísérletekben, illetve tágabb összefüggésben ezeknek milyen jelentőségük van.

Szimmetriák, szimmetriasértés, neutrínók

A makroszkopikus, emberi méretskálán megszokott, főleg vizuálisan elképzelt világunkban a szimmetria jelensége intuitív: tükrözéshez, elforgatáshoz vagy hasonló geometriai transzformációhoz kötődik. Beszélhetünk diszkrét (például tükrözés), illetve folytonos (elforgatás, eltolás) szimmetriatranszformációkról, amelyek az adott tárgyat vagy a geometriai alakzatot önmagába viszik át. Bár a geometriai szimmetria jelensége több ezer éve ismert a matematikában, az absztrakt szimmetriatranszformációk területe (a *Csoportelmélet* keretében) a tudomány viszonylag fiatal területe. Ennek ellenére a mikroszkopikus világban az elmúlt száz évben felfedezett kvantummechanikai jelenségek, a relativitáselmélet vagy az elemi részecskék és kölcsönhatásaik osztályozása absztrakt szimmetriák felismerése mentén történt. Léteznek elemi kölcsönhatások, amelyek pontos szimmetriatulajdonságokkal rendelkeznek és ez alapján tárgyalhatók. De



Radics Bálint az ETH Zürich kutatója. Kutatási területe a részecskefizikai standard modellen túli jelenségek tanulmányozása neutrínóoszillációkban, antianyagot létrehozó, illetve sötét anyagot direkt és indirekt módon kereső kísérletekben.

léteznek olyan kölcsönhatások is, amelyek éppen ellenkezőleg, inkább bizonyos szimmetriák megsértése révén nyernek fontos szerepet az osztályozásban (például a tértükrözési szimmetria vagy szakszóval *paritásértés* a gyenge kölcsönhatás esetén). A szimmetriák megléte, részleges vagy teljes hiánya a természetben (legalábbis ameddig nincs egy alapvetőbb elmélet) csak kísérleti úton állapítható meg.

Nem csak a mikroszkopikus, hanem a nagy méretskálán is megjelenik egyfajta szimmetriasérülés. A fizika egyik nagy rejtélye az Univerzumban megfigyelhető anyag-antianyag aszimmetria jelensége: amíg Világegyetemünkben alig van antianyag, addig anyag van bőven. Bár nem értjük a jelenség okát, hálásak lehetünk neki; ha ez a szimmetria nem sérülne az anyag és az antianyag egyenlő mennyiségben lenne jelen, és az élet sosem alakulhatott volna ki. *Andrei Sakharov* orosz fizikus javaslata alapján [4] néhány szükséges feltétel teljesülése esetén kialakulhat olyan Világegyetem, amelyben az anyag-antianyag szimmetria ilyen mértékben sérülhet. Ezen feltételek egyike olyan elemi folyamat léte, amelyben a CP-transzformációval szembeni szimmetria nem teljesül. Ezért van fontos jelentősége, hogy a neutrínók esetén is nem csupán fennáll ez a további szimmetriasérülés, de arra utaló kezdeti jelek is vannak, hogy a szimmetriasérülés elegendően nagy lehet, hogy a nagy méretskálákon tapasztalt anyag-antianyag aszimmetriát megmagyarázza [5].

Bármely elemi részecskét az antirészecskéjévé változtat, ha a töltésének előjelét megfordítjuk (töltés-, vagy C-tükrözés). Részecskék időben-térben lezajló szórási folyamatait áttranszformálhatjuk antirészecskék azonos szórási folyamataira, ha egyszerre elvégezzük a töltéstükrözést és időben, térben tükrözzük a koordinátarendszerünket (T- és P-tükrözések). Mikroszkopikus méretskálán minden folyamat szimmetriát mutat ezzel a kombinált (CPT) transzformációval szemben [6]. A P- és CP-szimmetriasértés jelenségét már megfigyelték részecskefizikai kísérletekben [7].

A CP-sértést mind a semleges Kaon, B- és D-mezon részecskék esetén megtalálták. A CP-sértést a kvarkszektorban a gyenge kölcsönhatási folyamatok magyarázzák. Azonban a kvarkoknál a szimmetriasérülés mértéke nem elegendően nagy ahhoz, hogy a Sakharov-feltételeken keresztül az Univerzumban megjelenő anyag-antianyag aszimmetria fokát helyesen megjósolja. Mindenesetre egy fontos mintául szolgál ahhoz, hogy feltételezzük: a CP-szimmetriasértés máshol is megjelenhet, és talán egyszer magyarázatot adhat az Univerzumban megfigyelhető anyag-antianyag

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_{23} & \sin\theta_{23} \\ 0 & -\sin\theta_{23} & \cos\theta_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta_{13} & 0 & \sin\theta_{13} \exp(-i\delta_{CP}) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_{13} \exp(i\delta_{CP}) & 0 & \cos\theta_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta_{12} & \sin\theta_{12} & 0 \\ -\sin\theta_{12} & \cos\theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

1. táblázat			
Az $A \rightarrow B$ átalakulási folyamat és diszkrét szimmetriatranszformált verziói			
szimmetria-transzformáció	folyamat	szimmetria-transzformált folyamat	Természetben sérül-e?
T	$A \rightarrow B$	$B \rightarrow A$	sérül
CP	$A \rightarrow B$	$\bar{A} \rightarrow \bar{B}$	sérül
CPT	$A \rightarrow B$	$\bar{B} \rightarrow \bar{A}$	nem sérül

aszimmetriára. A P- és a CP-szimmetriákkal szemben a CPT-szimmetria sérülésére eddig még nem találtak kísérleti bizonyítékot. Ez azt is jelenti, hogy ha a CPT-szimmetria megmarad, de a CP-szimmetria sérül, akkor a T-szimmetriának is sérülnie kell.

A neutrínók a tértükrözési szimmetriát sértik: csak balkezes neutrínók, illetve jobbkezes antineutrínók léteznek. Azt is tudjuk, hogy a töltéstükrözési szimmetriát is sértik: egy balkezes neutrínót a töltéskonjugálási¹ transzformáció egy balkezes antineutrínóba transzformálna, de mindeddig csak jobbkezes antineutrínókat találtak a kísérletekben. A kombinált CP-transzformáció viszont egy balkezes neutrínót a megfelelő, fizikailag létező jobbkezes antineutrínóba viszi át. Ezért a neutrínók elvileg ideális részecskék a CP-transzformált folyamatok vizsgálatára. Sakharov CP-szimmetriasértési tesztjét oly módon lehet (például a neutrínókkal) kísérletileg elvégezni, hogy A kezdeti állapoti részecske valamely $A \rightarrow B$ átalakulási folyamatát összehasonlítjuk az \bar{A} antirészecske $\bar{A} \rightarrow \bar{B}$ folyamatával. Az 1. táblázat mutatja be a lehetséges folyamatokat és szimmetriatranszformált változatukat.

A szimmetriatulajdonságaikon kívül még egy érdekes tulajdonságuk is kiemeli a neutrínókat a többi részecske közül: a *neutrínóíz-oszcilláció* (magyar szakszóval *neutrínóíz-rezgés*) jelensége [8].

Neutrínók ízoscillációja

Az elmúlt 30 évben kísérletek sora erősítette meg a neutrínóíz-rezgés jelenségét [9–11]. A neutrínók között (a kvarkokhoz hasonlóan) megjelenik a keveredés jelensége: a neutrínók egymással összekeveredve vesznek részt a gyenge kölcsönhatásban. A keveredés miatt a tömeg-sajátállapotuk (ami alapján egy szabad neutrínó mozgásegyenletét fel lehetne írni, \mathbf{v}_m) nem egyezik az ízsajátállapotukkal (ami alapján egy neutrínó

¹Bár a neutrínóknak elektromos töltése nincs, de fermion, és fermionokra a töltéskonjugálási transzformáció pontosan definiálható.

kölsönhatását le lehetne írni, \mathbf{v}). A kísérletekben a hozzájuk tartozó töltött leptonokkal a gyengetöltött-áram-kölcsönhatásokban azonosított neutrínók (neutrínóíz szerint ν_e : elektronneutrínó, ν_μ : müonneutrínó, ν_τ : tau-neutrínó) a különböző tömegű szabad neutrínók valamilyen szuperpozíciójából tevődnek össze. A tömeg- és ízsajátállapotok bázisai közötti transzformációt egy 3×3 -as mátrix, U adja meg, amelynek elemeit jelenleg csak kísérletileg tudjuk meghatározni. Ezt a mátrixot *Pontecorvo–Maki–Nakagawa–Sakata* (PMNS) mátrixnak nevezi a tudomány. A kvarkszektorban egy azonos szerepű mátrix, a *Cabibbo–Kobayashi–Maskawa* (CKM) mátrix [12, 13] adja meg a keveredés mértékét. Azonban az elmúlt évtizedek kísérletei azt mutatják meg, hogy a neutrínószektorban a kvarkokhoz képest a keveredés mértéke sokkal nagyobb, ami nagyobb CP-szimmetriasértést is megengedhet.

A PMNS-mátrix elemeit elméletileg nem tudják megmagyarázni, viszont létezik rá egy parametrizáció, amelynek segítségével a kísérletileg fontos változókat vizsgálni lehet. A PMNS-mátrix (lásd az 1. egyenletet az oldal tetején) három különböző mátrix szorzatára bontható, amelyek mindegyike saját keveredési szöggekkel rendelkezik (θ_{13} , θ_{23} , θ_{12} , az indexek a tömeg-sajátállapotot jelölik), illetve egy komplex fázis adja meg a CP-szimmetriasértés nagyságát, δ_{CP} .²

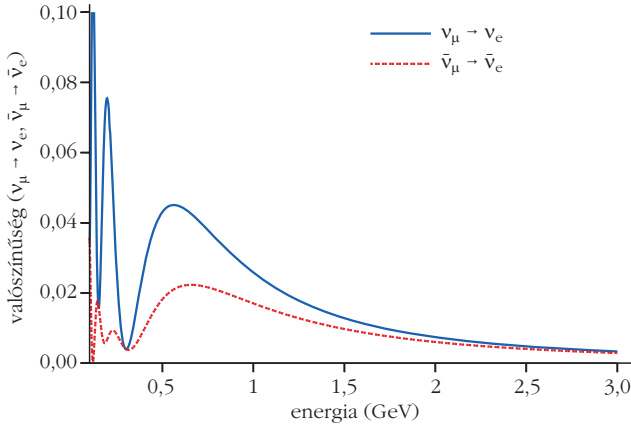
Ezek alapján egy neutrínó tömeg-sajátállapot terjedését üres térben a következő közönséges differenciálegyenlet-rendszerrel írhatjuk le az ízsajátállapotban:

$$i \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{1}{2E} U \begin{pmatrix} m_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & m_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3^2 \end{pmatrix} U^+ \mathbf{v}, \quad (2)$$

ahol $\mathbf{v} = (\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau)$ az ízbázisban kifejezett állapotvektor, E a neutrínó energiája, U a PMNS-mátrix, m_1^2 , m_2^2 és m_3^2 a három neutrínócsalád tömegsajátértékeinek négyzetei,³ i pedig a komplex képzetes egység. Az egyenletet a komplex számok terén kell számolni, mert a 3×3 -as PMNS-mátrix általában komplex értékekkel rendelkezhet. Ahogy a példában is láthatjuk, ha a két bázis egybeesne, akkor a tömegmátrix csak diagonális tagokkal rendelkezne, minden neutrínóíz egymástól függetlenül terjedne a térben. Az U PMNS-

²Ezt a fázisszöveget Dirac-fázisnak is nevezik, szemben a Majorana-fázisszögekkel, amelyekről ebben a cikkben nem lesz szó.

³Neutrínóoszcillációt tanulmányozó kísérletekben csak a tömegnégyzetek különbségeit lehet megmérni. Ezért a három tömegnégyzet különbségét kétféleképpen is lehet jelölni. A két jelölést normál, illetve invertált tömeghierarchiának nevezik. Léteznek kísérletek, például radioaktív izotópok β -bomlási mérései, amelyekkel a neutrínók tömegét próbálják megbecsülni.



1. ábra. Müon-neutrínók elektron-neutrínókká ($\nu_\mu \rightarrow \nu_e$, folytonos görbe), illetve müon-antineutrínók elektron-antineutrínókká ($\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$, szaggatott görbe) való átalakulási valószínűsége az energiájuk függvényében 300 kilométeres távon, $\delta_{CP} = -\pi/2$ értékkel számolva.

mátrix azonban keveredést visz a rendszerbe, ezért nem-diagonális elemek is megjelennek a neutrínók térbeli-időbeli mozgása során. Ha a *Particle Data Group* [14] kiadványából a keveredési szögeket és egy tetszőleges δ_{CP} fázis értékét behelyettesítjük az egyenletbe, majd ezt a kezdetiérték-problémát megoldjuk például egy tisztán müon-neutrínó (vagy müon-antineutrínó) kiinduló ízállapotból ($\nu(t=0) = (0, 1, 0)$) különböző energiákra, akkor egy íztérben rezgő megoldást kapunk; terjedésük során megváltozhat a neutrínók íze. Egy konkrét $L \approx 300$ km hosszúságú terjedési távolságot feltételezve (feltesszük, hogy a neutrínók közel fénysebességgel terjednek), az 1. ábrán annak valószínűségét ábrázoljuk, hogy egy kezdeti müon-neutrínó elektron-neutrínóvá (illetve egy müon-antineutrínó elektron-antineutrínóvá) alakult át a körülbelül 300 kilométeres táv megtétele után, $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = |\langle \nu_e | \nu(t=0) \rangle|^2$ ($P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e) = |\langle \bar{\nu}_e | \bar{\nu}(t=0) \rangle|^2$). Az ábrán látható, hogy az első ízrezgési maximum (jobbról tekintve) 0,6 GeV energia körül található. Látható, hogy az antineutrínók esetén más görbét kapunk. Itt válik fontossá, hogy az egyenletben a 3×3 -as U mátrix komplex lehet. Ezt a már fentebb említett δ_{CP} fázis segítségével parametrizálják, amelyet a kísérletben szabadon hagynak és a mért adatokra illesztik. Az ábrán a $\delta_{CP} = -\pi/2$ értékhez tartozó görbék láthatók. Ha a természetben ez az érték valósulna meg, akkor egy olyan kísérlet, amely mind létrehozni, mind észlelni is tudna 0,6 GeV energiájú (anti)neutrínókat, várhatóan különbséget látna a két folyamat között csupán az elektron-neutrínók és az elektron-antineutrínók számát figyelembe véve (a megfelelő müon-neutrínó és müon-antineutrínó kezdeti ízállapotokra normálva). Ezt a jelenséget használják ki a neutrínóíz-átalakulását mérő kísérletek a δ_{CP} paraméter becslésénél. Egy részecskegyorsító berendezés segítségével (anti-)neutrínónyalábot állítanak elő. A nyaláb forrásához közeli berendezésben detektálják és regisztrálják a kezdeti (többnyire müon-neutrínó) ízállapotbeli neutrínók típusát, majd egy távolabbi detektorban az ízátalakulás utáni neutrínókat észlelik. A két észlelésben az egyes neutrínófajták számait összevetve lehet

megbecsülni nem csak a δ_{CP} paraméter, de néhány további PMNS-mátrixparaméter értékét is.

Közelítő képletekkel is ki lehet számolni az neutrínók átalakulási valószínűségét két tetszőleges neutrínóíz között a neutrínók energiájának és a távolság függvényében:

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sum_{j,k} U_{\alpha j}^* U_{\beta j} U_{\alpha k} U_{\beta k}^* \exp\left(-i \frac{\Delta m_{jk}^2 L}{2 E}\right), \quad (3)$$

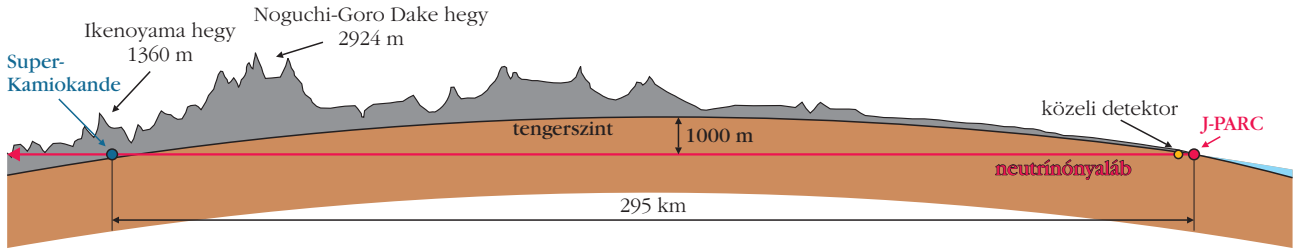
ahol U a már említett PMNS-mátrix, α, β jelöli a neutrínóíz-, j és k a neutrínó tömeg-sajátállapotot, L a távolságot, Δm_{jk}^2 pedig a tömeg-sajátállapotok négyzetei közötti különbséget. Azonban ez a képlet csak az üres térbeli terjedésre helyes ebben a formában. A kísérletekben használt neutrínónyalábok a Föld felszíne alatt haladnak a közeli és távolabbi detektorok között. Ezért egy több száz kilométeres táv megtétele közben a neutrínók nem teljesen elhanyagolható valószínűséggel kölcsönhatnak a Földkéregben levő anyaggal is. Egy tetszőleges anyagsűrűség-eloszlás esetén azonban már egyszerű képlettel nem fejezhető ki a neutrínóíz-rezgés valószínűsége két pont között. Ebben az esetben a (2) egyenlet egy taggal kiegészül, amely figyelembe veszi a neutrínók terjedésük közbeni kölcsönhatását is az anyaggal:

$$i \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{1}{2 E} U \begin{pmatrix} m_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & m_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3^2 \end{pmatrix} U^\dagger + 2\sqrt{2} G_F N_e(t) E \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \mathbf{v}, \quad (4)$$

ahol N_e a hely- vagy időfüggő elektronsűrűség a Föld kérgében, ahol a neutrínó halad, és G_F a Fermi csatlóási állandó [15–17]. A jelenleg futó kísérletekben ez a járulékos tag elhanyagolható. Azonban a neutrínóoszillációs kísérletek következő generációja esetén, amelyek több mint 1000 kilométeres távolságon mérik az ízátalakulás valószínűségét, ezt a járulékos tagot figyelembe kell venni.

A CP-szimmetriasértés mérése neutrínóíz-oszcillációkban

Jelenleg két kísérlet méri a neutrínók oszcillációját gyorsítókkal előállított neutrínónyaláb segítségével: a Japánban található, 295 km távolságon mérő T2K mellett (2. ábra) az Észak-Amerikában futó *NuMI Off-Axis ν_e Appearance* (NOVA, 810 km távolságon) [18], a *Fermilab* közelében. A neutrínókísérletek jellegzetessége, hogy nem tudják közvetlenül detektálni a neutrínókat.



2. ábra. A Japánban futó T2K kísérletben a neutrínókat a J-PARC kutatóintézetben hozzák létre, Tokaiban. A neutrínónyaláb forrásától a közelebbi detektor (ND280) 280 méterre található, míg a távolabbi detektor (Super-Kamiokande) 295 km-re található (forrás: [19]).

Azonban a detektort felépítő anyagokban lévő atommagokon szóródnak,⁴ és a neutrínó-atommag kölcsönhatások végállapotában egy töltött lepton, valamint egyéb mezonok és barionok keletkezhetnek, amelyeket már észlelni lehet. Másik érdekesség, hogy a neutrínónyaláb forrásának közelében elhelyezett detektorban a neutrínó-kölcsönhatások hozama még elég nagy ahhoz, hogy az átalakulás előtti nyaláb tulajdonságait (neutrínóíz-összetétel) pontosan megmérjék. Ebben a detektorban a neutrínó-kölcsönhatások végállapotában keletkezett részecskék fajtájából, energiájából, irányából, illetve az atommagok (főleg szén és oxigén) szerkezetének és eloszlásának ismeretében osztályozni tudják a neutrínóeseményeket. A forrástól több száz kilométerre elhelyezett detektorban azonban a neutrínók hozama már rendkívül alacsony. Éppen ezért ez a távolabbi detektor mindig óriási méretekkel rendelkezik. Az alacsony kölcsönhatási hozamot nagy méretekkel lehet kompenzálni.

A legfontosabb szórási folyamat, amellyel a neutrínókat észlelik (a fent említett 0,6 GeV energián) a töltött áram kvázieleasztikus szórás (CCQE) egy nukleonon



ahol „n” a neutron, „p” pedig a proton. Ebben a példában a végállapotú müon detektálásából és a detektorban lévő atommagok eloszlásának ismeretéből elvileg ki lehet számolni a kezdeti állapotú neutrínó energiáját (lásd 1. ábra):

$$E_{\nu} = \frac{m_f^2 - (m_i - E_b)^2 - m_l^2 + 2(m_i - E_b)E_l}{2(m_i - E_b - E_l + p_l \cos \theta_l)}, \quad (6)$$

ahol m_f a végállapotbeli nukleon tömege, m_i a kezdeti állapotú nukleon tömege, m_l a töltött lepton tömege, E_b a nukleon kötési energiája az atommagban, p_l , E_l és θ_l a lepton impulzusa, energiája és a neutrínónyalábbal bezárt szöge (külön detektorok feladata a neutrínónyaláb irányának pontos monitorozása). Azonban – több okból is – a neutrínóenergia meghatározása bonyolultabb. A valódi nyalábban a neutrínók energiája alacsonyabb és magasabb is lehet. 1 GeV ütközési energia körül keletkezhet egy töltött π -mezon is a kölcsönhatás végállapotában, $\nu_{\mu} + n/p \rightarrow \mu^{-} + \pi^{+} + p/n$. Ennél még magasabb energián pedig több töltött π -mezon is kelet-

kezhet, vagy mélyen rugalmatlan szórási folyamat is végbemehet, amelyben a nukleon teljesen felbomlik. E folyamatokban a végállapot pontos detektálása és osztályozása kísérletileg már nehezebb. Ezért a nehezen rekonstruálható folyamatokat közelítő módszerekkel modellezzük, és járulékaikat az adatokból becsülik meg. Jelenleg a neutrínó-atommag kölcsönhatás pontos modellezése a legnagyobb szisztematikusan bizonytalanság a neutrínóoszillációs kísérletekben [20].

A T2K kísérlet által közölt eredmények szerint a CP-szimmetriasértési δ_{CP} paraméterre kapott intervallum $3\text{-}\sigma$ (99,7%-os) bizonyossággal kizárja a 0 és π értékeket (az intervallum ciklikus) a normál tömeghierarchiában. Az adatok szerinti legvalószínűbb becsült érték -108° , közel a maximális szimmetriasértés $\delta_{CP} = -\pi/2$ értékéhez. A részecskefizikában elfogadott bizonyosság 99,999% ($5\text{-}\sigma$ szintű kizárás) lenne, de erre még várnunk kell. Azonban, a CP-sértésre utaló jelek elegendően megalapozzák a várakozást a további neutrínóoszillációs kísérletek eredményeire. Két, ebben az évtizedben induló kísérlet kifejezett célja elegendő adatot gyűjteni a jövőben a CP-sértés felfedezéséhez, és a δ_{CP} fázis pontos megméréséhez, amely hatalmas lépés lenne az elemi részecskék tudományában. Az egyik közülük a Super-Kamiokande következő generációja, a *Hyper-Kamiokande* [21]. A másik pedig Észak-Amerikában a *Deep Underground Neutrino Experiment* (DUNE) kísérlet [22]. Ezek az új kísérletek azonban nem csak a neutrínóíz-oscilláció paramétereinek mérésére lesznek hivatottak, hanem egyebek mellett a proton bomlási folyamatának keresésére, vagy szupernóvák robbanásából származó neutrínók detektálására is tervezték őket.

A neutrínók 1956-ban történt felfedezésük óta mindig is nagy mértékben járultak hozzá a mikroszkopikus világban érvényes részecskefizikai modellek kialakításához. A következő évtizedben talán arra is választ kapunk, hogy mekkora szerepet játszhatnak az Univerzum történetének formálásában.

Irodalom

1. Y. Fukuda et al. (Super-Kamiokande Collaboration): Evidence for Oscillation of Atmospheric Neutrinos. *Phys. Rev. Lett.* 81 (1998) 1562.
2. K. Abe et al. (T2K collaboration): Constraint on the Matter-Antimatter Symmetry-Violating Phase in Neutrino Oscillations. *Nature* 580 (2020) 339.
3. K. Abe et al. (T2K collaboration): Search for CP Violation in Neutrino and Antineutrino Oscillations by the T2K Experiment with 2.2×10^{21} Protons on Target. *Phys. Rev. Lett.* 121 (2018) 171802.

⁴A neutrínók az elektronhéjon is szóródnak, de sokkal kisebb valószínűséggel.

4. A. D. Sakharov: Violation of CP invariance, C asymmetry, and baryon asymmetry of the Universe. *Pis'ma Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 5 (1967) 32.
5. G. C. Branco, R. G. Felipe, F. R. Joaquim: Leptonic CP violation. *Rev. Mod. Phys.* 84 (2012) 515.
6. Horváth Dezső: Szimmetriák az elemi részecskék világában. *Fizikai Szemle* 53 (2003) 122.
7. Trócsányi Zoltán: Az eltűnt szimmetria nyomában – a 2008.évi fizikai Nobel-díj. *Fizikai Szemle* 58 (2008) 417.
8. Trócsányi Zoltán: Hogyan tegyük láthatóvá a láthatatlant? *Magyar Tudomány* 187 (2016) 478.
9. B. Pontecorvo: Mesonium and anti-mesonium. *Zh. Eks. Teor. Fiz.* 33 (1957) 549.
10. B. Pontecorvo: Inverse beta processes and nonconservation of lepton charge. *Zh. Eks. Teor. Fiz.* 34 (1957) 247.
11. Z. Maki, M. Nakagawa, S. Sakata: Remarks on the Unified Model of Elementary Particles. *Progr. Theoret. Phys.* 28 (1962) 870.
12. N. Cabibbo: Unitary Symmetry and Leptonic Decays. *Phys. Rev. Lett.* 10 (1963) 531.
13. M. Kobayashi, T. Maskawa: CP-Violation in the Renormalizable Theory of Weak Interaction. *Progr. Theoret. Phys.* 49 (1973) 652.
14. M. Tanabashi et al. (Particle Data Group): Review of Particle Physics. *Phys. Rev. D* 98 (2018) 030001.
15. L. Wolfenstein: Neutrino oscillations in matter. *Phys. Rev. D* 17 (1978) 2369.
16. L. Wolfenstein: Neutrino oscillations and stellar collapse. *Phys. Rev. D* 20 (1979) 2634.
17. S. P. Mikheyev, A. Yu. Smirnov: 3ν oscillations in matter and solar neutrino data. *Physics Letters B* 200 (1988) 560–564.
18. P. Adamson et al. (NOvA Collaboration): Constraints on Oscillation Parameters from ν_e Appearance and ν_μ Disappearance in NOvA. *Phys. Rev. Lett.* 118 (2017) 231801.
19. C. V. C. Wret: *Minimising systematic uncertainties in the T2K experiment using near-detector and external data.* Imperial College London (2018).
20. J. A. Formaggio, G. P. Zeller: From eV to EeV: Neutrino cross sections across energy scales. *Rev. Mod. Phys.* 84 (2012) 1307.
21. K. Abe et al. (Hyper-Kamiokande): Hyper-Kamiokande Design Report. (2018) arXiv: 1805.04163 [physics.ins-det].
22. R. Acciarri et al. (DUNE): Long-Baseline Neutrino Facility (LBNF) and Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE): Conceptual Design Report, Vol. 1: The LBNF and DUNE Projects. FERMI-LAB-DESIGN-2016-01 (2016) arXiv: 1601.05471 [physics.ins-det].

NEHÉZ KVARKOK KELETKEZÉSE AZ LHC ALICE KÍSÉRLETÉNÉL

Frajna Eszter,^{1,2} Vértesi Róbert¹

¹Wigner Fizikai Kutatóközpont – MTA kiváló kutatóhely

²Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Nehéz kvarkok szerepe a nagyenergiás magfizikában

A Világegyetem keletkezése utáni töredék másodpercben a világot egy forró, erősen kölcsönható anyag, a *kvark-gluon plazma* töltötte ki. Napjaink nagyenergiás részecskegyorsítóiban ultrarelativisztikus nehézion-ütközések segítségével létre tudjuk hozni ezt a közeget, és az elmúlt mintegy két évtized során megismertük alapvető tulajdonságait. A CERN *Nagy Hadronütköztetője* (LHC, Large Hadron Collider) segítségével az utóbbi években gyűjtött rendkívül nagy adatmennyiség lehetővé teszi számunkra,

hogy célirányos próbákkal részletesen feltérképezhessük a kvark-gluon plazma tulajdonságait. Ez hozzásegít minket az erős kölcsönhatás működésének mélyebb megértéséhez. Az erősen kölcsönható *kvarkok* és *gluonok* úgynevezett *színtöltéssel* rendelkeznek, a valóságban azonban csak színsemleges állapotok fordulnak elő.¹ Ez jelenti az erős kölcsönhatás tanulmányozásának fő nehézségét is: a térelméleti modellek perturbációszámításon alapuló analitikus megoldásai csak a nagy impulzuscserés szórási folyamatok esetében használhatók, a reakció során létrejött kvarkok és gluonok viszont csak közvetetten, részecskékbe zárva figyelhetők meg, így a folyamatok teljes leírásához szükségünk van közelítő (például

A kutatást az NKFIH/OTKA K 120660 és FK 131979 témaszámú pályázata támogatta.

¹A színek értékei megegyezéssel alapon *piros, zöld és kék*, illetve ezek *antiszínei*. A színsemleges (*fehér*) állapot előállhat szín-antiszín párként, vagy a három (anti)szín együttes jelenlétével.



Frajna Eszter a Budapesti Műszaki Egyetem végzős mesterszakos fizikus hallgatója. Kutatási területe a nehéz kvarkok korrelációinak kísérleti és fenomenológiai vizsgálata. Tagja a nemzetközi ALICE kollaborációnak.



Vértesi Róbert a Debreceni Egyetemen doktorált 2011-ben a kvark-gluon plazma kísérleti kutatásából. A Wigner FK Hadronfizika csoportjának vezetője, az ALICE nehézkvarkjet és -korrelációs munkacsoportjának koordinátora. Szakterülete a kis rendszerek fenomenológiája, valamint a nehéz kvarkok vizsgálata nagyenergiás ütközésekben.

fenomenológiai) modellekre. A kvark-gluon plazma keletkezése után hamar lehűl, és *hadronokká* alakul: kvark-antikvark párokból álló *mezonokká* vagy három kvarkból álló *barionokká*. Ez utóbbiak közé tartozik a proton és a neutron. A hadronokat alkotó kvarkokat a gluonok közvetítette erős kölcsönhatás tartja össze. A hadronok felépítését az 1. ábra szemlélteti.

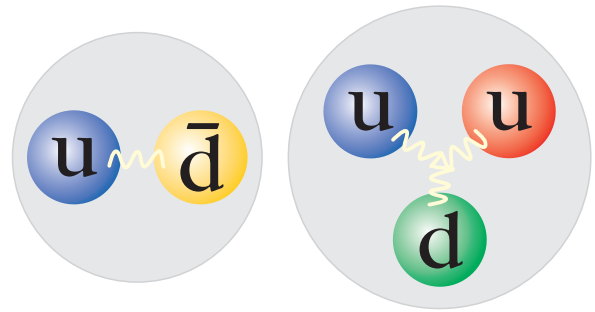
Bár a világban jelen lévő stabil anyagot a két könnyű (u , *up* és d , *down*) kvark alkotja, a nagyenergiás ütközésekben ennél nehezebb kvarkok is létrejönnek. Ezek közül a c (*charm*, $m_c = 1,27 \text{ GeV}/c^2$) és a b (*beauty*, $m_b = 4,2 \text{ GeV}/c^2$) kvarkok² egyedülálló lehetőséget nyújtanak az erős kölcsönhatás nemperturbatív tartományának megértéséhez: nagy tömegük folytán legtöbbször nagy impulzuscserevel járó szórásokban jönnek létre, amilyenek csak az ütközés kezdeti állapotaiban történnek.³ Mivel a nehéz kvarkok annihilációs hatáskeresztmetszete elhanyagolható, a reakció későbbi lépései során számuk közel változatlan marad. Élettartamuk során azonban kölcsönhatnak a forró és hideg maganyaggal, így alkalmasak arra, hogy velük az erősen kölcsönható közeget tomográfiai módon megismerjük. A nehéz kvarkokat tartalmazó részecskék, a nehéz hadronok végül gyenge bomlással alakulnak könnyű részecskékké. A kísérletben ezen bomlástermékek kinematikai paramétereiből tudjuk a nehéz hadronok tulajdonságait rekonstruálni. A könnyű és nehéz kvarkok hozamait összehasonlítva a *partonok* (kvarkok vagy gluonok) keletkezési és hadronizációs folyamatainak, valamint a közzeggel való kölcsönhatásuknak a színtöltéstől, illetve a partontömegtől való függését érthetjük meg. A nehéz kvarkok kollektív mozgásban való részvétele pedig a plazma termikus viselkedéséről hordoz információt [1, 2].

Az LHC és az ALICE

Az LHC az Európai Nukleáris Kutatási Szervezet, a CERN kutatóközpontjában, Franciaország és Svájc határán található. A körülbelül 100 m-es mélységben lévő alagútban egy 27 kilométer kerületű szinkrotrongyűrű húzódik, amely változó elektromos tér segítségével közel fénysebességre gyorsít fel protonokat vagy nehéz ionokat. A töltött részecskék nyalábját szupravezető mágnesek tartják pályán és fókuszálják. A pálya mentén négy nagy detektor található, amelyekkel a részecskék ütközéseit vizsgálják. A detektorok különböző jelenségek tanulmányozására jöttek létre. Míg az ATLAS és a CMS elsősorban a proton-proton ütközésekre – a Higgs-bozon tulajdonságainak

²A részecskék tömegét a tömeg-energia ekvivalencia alapján elektronvoltban célszerű kifejezni. Összehasonlításként, a proton tömege $m_p \approx 0,931 \text{ MeV}/c^2$, amelyből a protont alkotó könnyű kvarkok nyugalmi tömege elhanyagolható.

³Az LHC ütközéseiben kis számban t (*top*) kvarkok is keletkeznek, de ezek rendkívül nagy, $m_t = 173 \text{ GeV}/c^2$ tömegük miatt még a hadronizáció előtt elbomlanak b kvarkokra, a belőlük származó járulékot nem különítjük el.

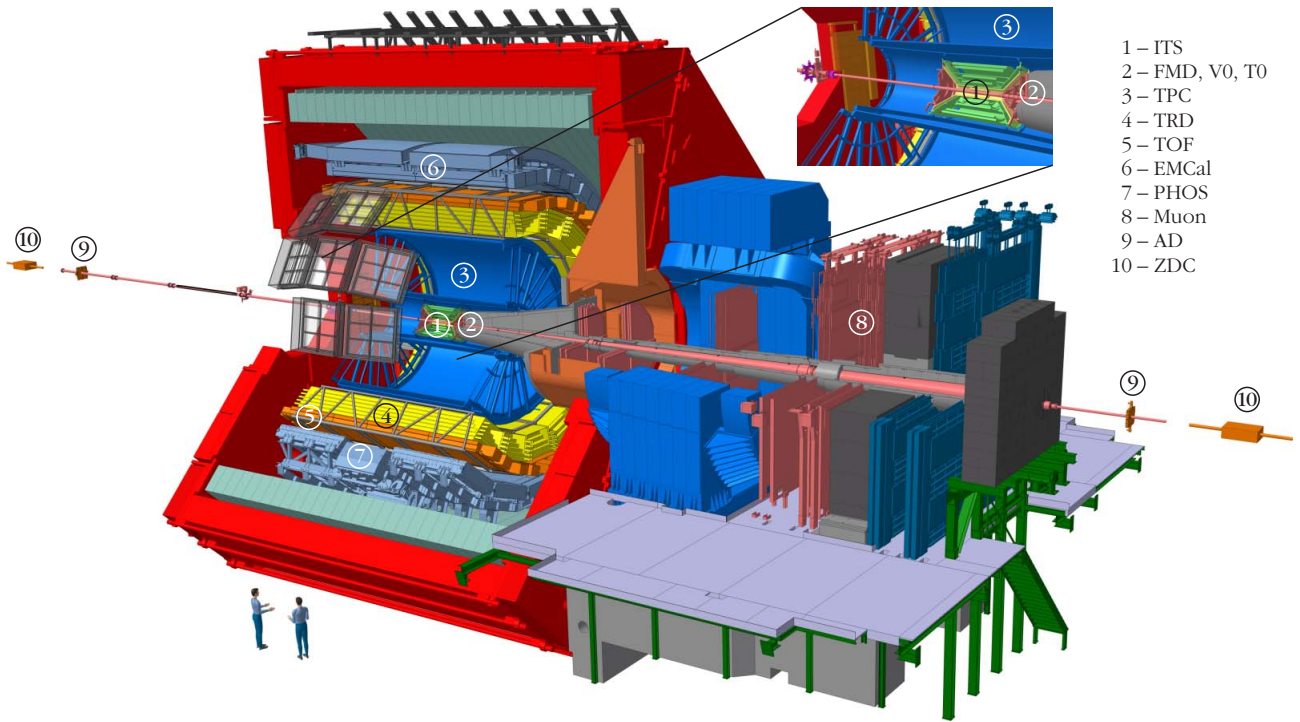


1. ábra. A hadronok kvarkszerkezete: mezon (π^+) és barion (proton). (Forrás: Horváth Árpád, CC BY-SA 2.5 licenc, via Wikimedia Commons.)

mérésére, a részecskefizika standard modelljének pontosabb megismerésére, illetve az ezen túli fizika keresésére – összpontosít, az LHCb pedig elsősorban az elektromos szektor megértésére (mint a CP-sértés pontos kimérése) fókuszál, az ALICE kísérlet kifejezetten nehézion-ütközések megfigyelésére építették (2. ábra) [3].

Az ALICE-ban zajló kölcsönhatások vizsgálata és értelmezése érdekében nyomon kell követnünk a részecskék pályáját a térben. Az e célra elsődlegesen használt detektorok a *belső nyomkövetőrendszer* (Inner Tracking System, ITS) és az *időprojekciós kamra* (Time Projection Chamber, TPC). Az ITS egy félvezető detektor, a részecskék pályájának pontos meghatározásával lehetővé teszi a késői gyenge bomlások helyének megtalálását, az úgynevezett *másodlagos vertex* rekonstrukcióját. E a módszerrel a c , illetve b kvarkból származó hadronokat nagy pontossággal tudjuk azonosítani. A TPC sokszálas gáztöltésű kamra neon, szén-dioxid és nitrogén gázból álló keverékén keresztülhaladva a töltött részecskék ionizálják a gázmolekulákat, elektronok nyomvonalát hagyva maguk után. A töltött részecskék impulzusát a szolenoidmágnes terében leírt pálya sugara alapján tudjuk meghatározni, az EMCal *elektromágneses kaloriméter* az elektronok és fotonok energiáját méri. A TPC a töltött részecskéket fajlagos energiavesztésük alapján képes azonosítani, a semleges részecskék repülési idő alapján azonosíthatók. Az instabil részecskéket invariánstömeg-eloszlásaik alapján rekonstruáljuk a bomlástermékekből.

Az ALICE kísérlet segítségével megvizsgálhatjuk, hogy miként viselkedett az anyag közvetlenül az Ősrobbanás után, ezzel betekintést nyerhetünk az erős kölcsönhatást leíró *kvantum-színdinamika* (QCD) tulajdonságaiba, feltérképezhetjük a maganyag fázisdiagramjának hiányzó szegmenseit. Az LHC kísérletek a 2015–2020 közötti (úgynevezett Run-2) időszakában a korábbiaknál jóval nagyobb mennyiségű adatot gyűjtöttek, jellemzően a korábbinál magasabb ütközésienergia-tartományokban proton-proton (pp), proton-atommag (p-A) és atommag-atommag (A-A) ütközésekben [4], kiértékeléseik precíziós nehézkvark-méréseket tesznek lehetővé. Az alábbiakban ezek közül mutatunk be néhány példát az ALICE eredményei közül.

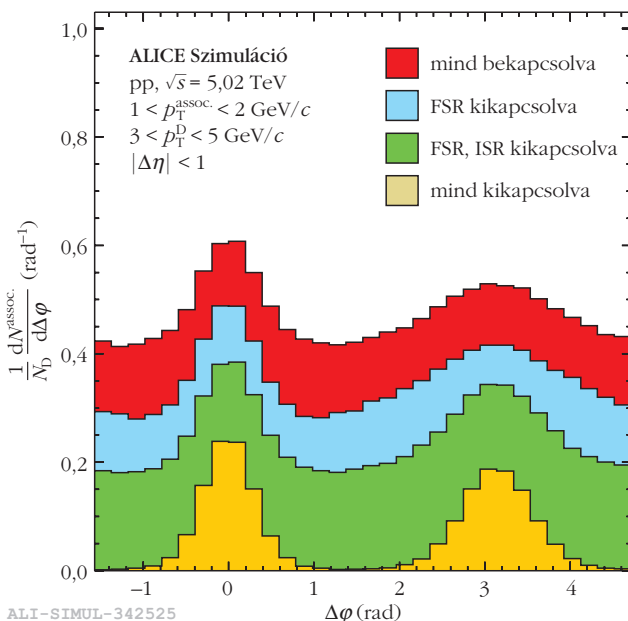


2. ábra. Az ALICE detektor sematikus ábrája az egyes alrendszer megjelölésével.

A QCD tesztje nehéz kvarkokkal

Jelenlegi ismereteink szerint a pp ütközésekben nem jön létre kvark-gluon plazma. Így ezen ütközések egyfelől a vákuumbeli kvantum-szindinamikai modellek elsődleges tesztjeként szolgálnak, másfelől pedig referenciának használhatók a p-A és A-A ütközésekben történő maganyag-módosulások megértéséhez. A nehéz kvarkok differenciális keletkezési hatáskeresztmetszetét az ALICE nagy pontosságú mérésekben

3. ábra. Partonszintű folyamatok járuléka az ALICE D-h korrelációs csúcsaihoz $\sqrt{s} = 5,02$ TeV ütközési energián, PYTHIA 8 szimulációk alapján (ISR és FSR: kezdeti és végállapotú sugárzás).



határozta meg számos csatornában, többek közt a c kvarkot tartalmazó D- és a b-t tartalmazó B-mezonok közvetlen rekonstrukciójából, valamint a nehéz mezonok szemileptonos bomlási csatornáiból származó elektronok és müonok spektrumának méréséből [5, 6]. Az általános tapasztalat szerint a perturbatív QCD-re alapuló modellek jól leírják a mérési adatokat, azonban ezen modellek bizonytalansága jóval magasabb a ma elérhető mérési pontosságnál. Ezért a kísérletek egyre inkább a ritkább, részletesebb, differenciáltabb próbák felé fordulnak.

A nagyenergiás ütközésekben keletkező nagy impulzusú partonok közvetlenül nem figyelhetők meg, azonban a detektorokban kollimált hadronnyalábként, az úgynevezett *jetek* formájában megjelennek. A jetképződés folyamatát *fragmentációnak* nevezzük. Míg a nehéz kvarkok hozamának mérése az ízfüggő partonképződés perturbatíván számolható folyamataiba nyújt betekintést, a jetek szerkezetének vizsgálata az analitikusan nem számolható fragmentációs folyamatokról is hordoz információt. A D-mezonok könnyű töltött hadronokkal való azimutális korrelációja (D-h korreláció) a jetszerkezet kialakulásának részleteit tárja fel. Az ALICE együttműködés elvégezte a D-mezonok hadronokkal való korrelációinak méréseit a $\sqrt{s} = 5,02$ TeV energiájú pp és p-Pb ütközésekben [7]. A kapott eredményeket az ütközési események részletes szimulációjával [8, 9] és a detektorválasz modellezésével jól le tudjuk írni, és segítségükkel elkülöníthetjük a végső korrelációs kép reakció különböző lépéseiből származó összetevőit. A 3. ábrán⁴ látható az egyes partonszintű folyamatok korrelációs

⁴A továbbiakban az ALICE szigorú ábrakonvencióit használjuk.

csúcshoz adott járuléka. Megfigyelhető, hogy a kétjet-eseményeknek megfelelő csúcsok (a D és a könnyű hadron által bezárt azimutuszög $\Delta\varphi \approx 0$ és $\approx \pi$ értéknél) már a kezdeti folyamatokban kialakulnak, ettől eltérő irányban pedig a későbbi partonsugárzások és sokpartonszórásos folyamatok adnak járulékat.

A nehéz kvarkok hadronizációjába további betekintést nyerhetünk a barionos szektor vizsgálatával. Bár nehéz kvarkot tartalmazó barionok kis hatáske- resztmetszettel jönnek létre, a Run-2 periódusban elég adat állt rendelkezésre ilyen mérések elvégzéséhez is. A 4. ábrán a Λ_c^+ nehéz barion és a D^0 -mezon aránya figyelhető meg $\sqrt{s} = 7$ TeV energiájú pp ütközésekben, különböző szimulációkkal összehasonlítva. Látható, hogy a korábban alkalmazott, elektron-elektron ütközéseken alapuló modellek nem jól írják le az adatokat: alulbecsülik a barion-mezon arányt, nem adják vissza a kis impulzusoknál észlelt növekményt. Minde- ez arra utal, hogy a hadronizációs folyamatok füg- ghetnek az ütköző rendszertől. Bár az észlelt növe- kményt néhány modell új jelenségek figyelembe véte- lével képes kvalitatívan leírni [10, 11], a kvantitatív megértéshez szükséges adatokat a folyamatban lévő kísérletek fogják szolgáltatni.

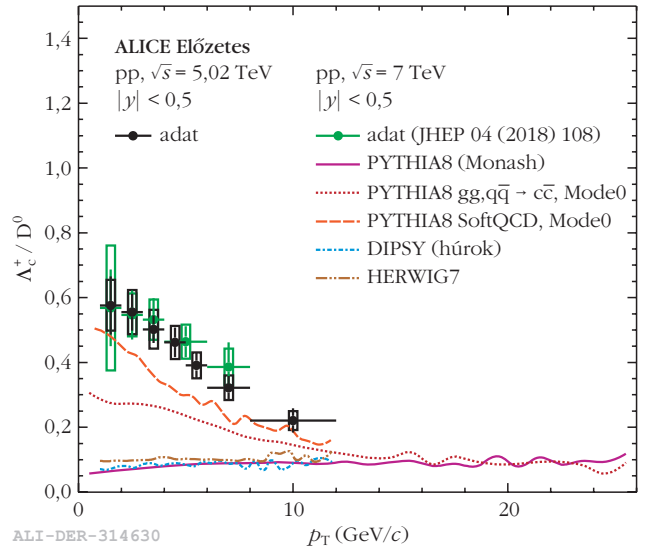
A hideg maganyag hatásai

A proton-atommag (p-A) ütközések elengedhetle- nek a hideg nukleáris anyagban bekövetkező válto- zások – amelyek alapot képeznek az atommag-atom- mag ütközésekben végzett mérésekhez – megértésé- hez. A p-A ütközésekben számolnunk kell kezdeti és végállapotú hatásokkal is, mint például a beérkező atommagon belüli partoneloszlás hatása (partonár- nyékolás), transzverzális impulzusok kiszélesedése sokszoros szórások hatására, illetve energiavesztés a hideg maganyagban [12]. Emellett nem zárható ki teljesen az sem, hogy egy kicsiny térfogatban kvark- gluon plazma is keletkezhet centrális p-A ütközések- ben [13]. A maganyag módosító hatását legegyszer- rűbben a *nukleáris módosulási tényezővel* fejezhet- jük ki:

$$R_{pA}(p_T) = \frac{1}{\langle N_{\text{coll}} \rangle} \frac{dN_{pA}(p_T)/dp_T}{dN_{pp}(p_T) dp_T}, \quad (1)$$

ahol N_{pA} , illetve N_{pp} a keresett folyamat (például D-mezon keltése) egyetlen ütközésre jutó hozama pp, illetve p-A ütközésben, $\langle N_{\text{coll}} \rangle$ pedig a p-A ütközé- sekben előforduló, szimulációkból számolható bináris nukleon-nukleon ütközések átlagos száma. Az R_{pA} egységnyi értéke tehát azt jelenti, hogy a fizikai folya- matok a pp ütközésekhez képest nem módosulnak, egységnyinél kisebb érték a folyamat elnyomódását, annál nagyobb pedig a feldúsulását jelenti.⁵

⁵A nagyenergiás fizikában impulzus helyett rendszerint annak a – folyamatra jellemzőbb – nyalábtengelyre merőleges részét, a p_T transzverzális impulzust használjuk.



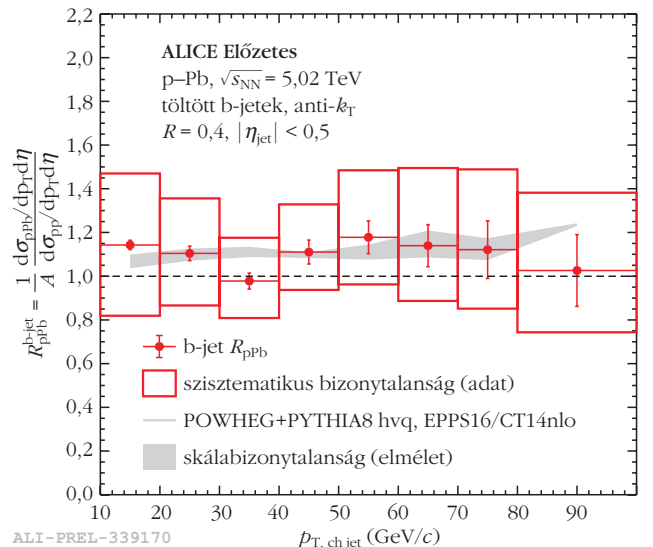
4. ábra. Λ_c^+ és D^0 aránya $\sqrt{s} = 7$ TeV energiájú pp ütközésekben, kü- lönböző modellszámításokkal összehasonlítva.

Az 5. ábrán b-kvarkot tartalmazó jetek nukleáris módosulási tényezője figyelhető meg $\sqrt{s_{NN}} = 5,02$ TeV energiájú p-Pb ütközésekben. Látható, hogy a hideg maganyagban a b-kvarkok nem szenvednek el jelentős módosulást [14], bár a kísérleti bizonytalanság elsősorban a b-jetek azonosításának technikai nehézségei miatt nagy. Az ALICE közeljövőben elérhetővé váló mérései ezt a bizonytalanságot jelentősen csök- kenten fogják.

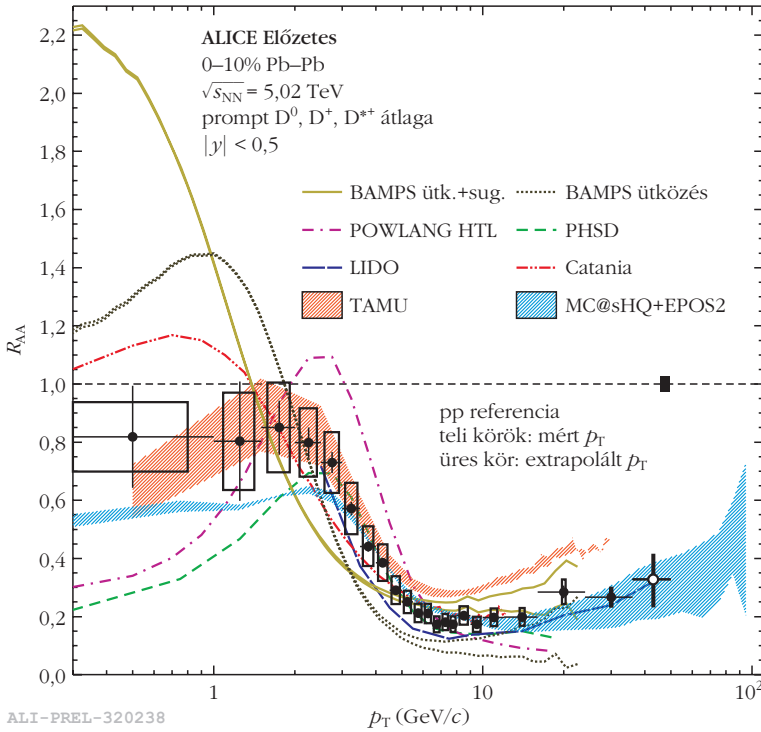
Nehéz kvarkok kölcsönhatása a kvark-gluon plazmával

Az atommag-atommag (A-A) ütközésekben keletke- ző sűrű és forró, erősen kölcsönható közeg csökkenti a rajta átfutó, szintöltéssel rendelkező részecskék energiáját – egyrészt ütközéseken, másrészt indukált

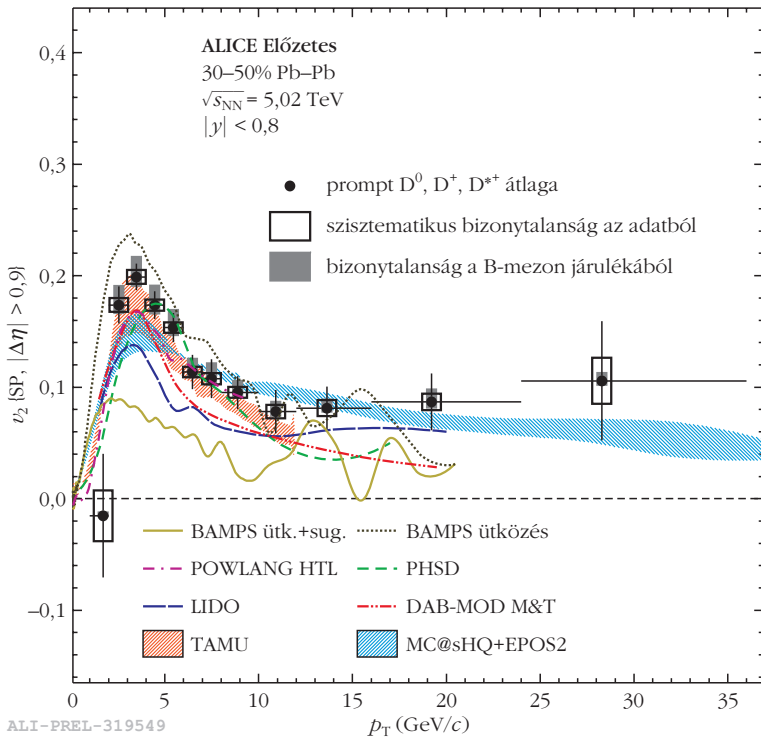
5. ábra. A b-jetek nukleáris módosulási tényezője $\sqrt{s_{NN}} = 5,02$ TeV energiájú p-Pb ütközésekben.



ALICE-PREL-339170



ALI-PREL-320238



ALI-PREL-319549

6. ábra. D-mezonok R_{AA} nukleáris módosulási tényezője (fölül) és v_2 azimutális anizotrópiája (alul) Pb-Pb ütközésekben $\sqrt{s_{NN}} = 5,02$ TeV energián, modellszámításokkal összehasonlítva.

gluonsugárzáson keresztül [15]. A nagy impulzusú részecskék elnyomódása így jelentős lesz: ahogyan az a 6. ábrán fölül megfigyelhető, a nehéz D-mezonok (D^\pm , D^0 és \bar{D}^0) nukleáris módosulási tényezője centrális Pb-Pb ütközésekben a $p_T \approx 10$ GeV/c tartományban a könnyű részecskékéhez hasonló [16] $R_{AA} \approx 0,2$ értéket vesz fel. Alacsonyabb p_T értékek-

nél azonban elnyomódás nem vagy jóval kevésbé figyelhető meg. Ennek okait jobban megérthetjük az azimutális aszimmetria vizsgálatával.

Kísérleti tapasztalat, hogy a kvark-gluon plazma erősen csatolt folyadékként viselkedik, viszkozitásmentes hidrodinamikai modellekkel jól leírható [18]. A nem centrális ütközésekben kezdetben jelen levő térbeli anizotrópia a kollektív tágulás során impulzustérbeli anizotrópiává alakul. Ennek paraméterezésére leggyakrabban az azimutimpulzus-eloszlás második Fourier-komponensét, az úgynevezett *eliptikus folyás* (v_2) mennyiségét használjuk [19]:

$$\frac{dN(p_T)}{d\phi} \approx 2 v_2(p_T) [\phi - \phi_{RP}], \quad (2)$$

ahol N a létrejövő részecskék száma, ϕ_{RP} pedig az adott ütközésben a bejövő részecskék párhuzamos egyenesi által kifejlesztett reakció sík azimut szöge. A név annak köszönhető, hogy ez a mennyiség mutatja meg, a tágulás mennyire tér el a kör-szimmetriktól, milyen mértékben elliptikus. A 6. ábra alsó felén a D-mezonok v_2 paraméterét láthatjuk a p_T függvényében, $\sqrt{s_{NN}} = 5,02$ TeV energiájú szemicentrális Pb-Pb ütközésekben. Az alacsony impulzustartományokban megfigyelhető $v_2 \approx 0,2$ érték közel esik a könnyű hadronokra jellemző értékekhez [20]. Különböző transportmodellekkel való összehasonlítás arra utal, hogy a nehéz kvarkok a kollektív mozgásba a könnyű kvarkokkal való *koaleszcencia* (klaszterformálódás) révén bekapcsolódnak [17]. Ugyanezen modellek szerint szintén a koaleszcencia ad magyarázatot arra, hogy a 6. ábra felső részén a kisebb p_T értékeknél nem tapasztalható jelentős elnyomódás.

Összefoglalás és kitekintés

A CERN-ben elhelyezkedő Nagy Hadronütköztető ALICE kísérlete az ultrarelativisztikus nehézion-ütközések során létrejövő kvark-gluon plazma tulajdonságait tanulmányozza a rajta keresztülhaladó részecskék kölcsönhatásainak vizsgálatával. Az LHC Run-2 adatgyűjtési periódusa lehetőséget kínált a ritkább, nehézkvarkpróbakkal történő pontos mérésekre is. A nehéz kvarkok elsősorban az ütközés kezdetén keletkeznek, és az ütközésben létrejövő közeg időfejlődése során mindvégig megmaradnak, így észlelésükkel a reakció összes fázisából nyerhetünk információt. A nehéz hadronok a bomlástermék-

keikből rekonstruálhatók, és tér- valamint impulzusbeli eloszlásaik alapján meghatározhatjuk a keletkezési folyamatokat, illetve a közeggel való kölcsönhatásukat.

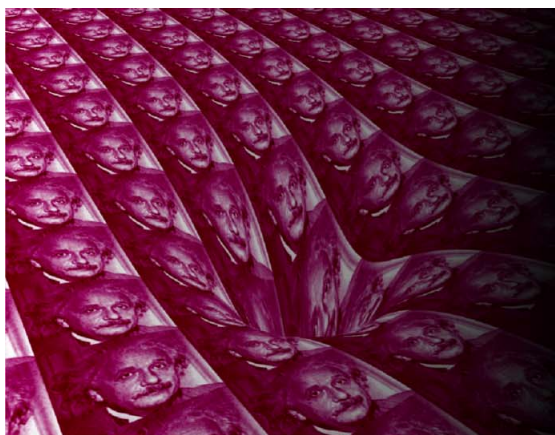
A nehéz kvarkok pp folyamatokban való keletkezését a perturbatív kvantum-szindinamikai modellek jól leírják, így a pp ütközések jól használhatóak referenciának a p–A és A–A ütközésekhez. Azonban a jetkeletkezés és a hadronizációs folyamatok jobb megértéséhez további, differenciált vizsgálatokra van szükség. A p–A ütközésekben létrejövő hideg maganyag nem módosítja jelentősen a nehéz kvarkok hozamát (de itt nem zárhatjuk ki a forró maganyag keletkezését sem). Az A–A ütközésekben megfigyelt nagy transzverzális impulzus esetén a nehéz kvarkok jelentős elnyomódását tapasztaljuk. Alacsonyabb impulzusoknál – a nukleáris módosulási tényező és az azimutális anizotrópia együttes tanulmányozásából – a nehéz kvarkok közeggel való erős koaleszcenciájára következtethetünk.

A budapesti Wigner Fizikai Kutatóközpont ALICE csoportja számos, elsősorban a nehéz hadronokhoz kapcsolódó (részben itt is bemutatott) ALICE mérésben vállalt és vállal jelentős szerepet. A meglévő mérések kiértékelésével párhuzamosan az LHC a 2021-ben induló Run-3 adatgyűjtési periódusára készül: az elkövetkező években az eddigi ütközésszámnál két nagyságrenddel többet fogunk felvenni. Ez a hatalmas adatmennyiség minden korábbinál részletesebb és pontosabb nehézkvarkméréseket tesz lehetővé, fogadásához azonban mind a gyorsítót, mind a detektorrendszereket alkalmassá kell tenni [4]. Kutatócsoportunk kulcsfeladatot lát el a TPC detektor, valamint az adatgyűjtő rendszer fejlesztésében [21, 22], és részt vett az ITS fejlesztésében is. Erőfeszítéseink végső soron a természet alapvető erőinek, azon belül az erős kölcsönhatás mélyebb megértését szolgálják.

Irodalom

1. A. Andronic et al.: Heavy-flavour and quarkonium production in the LHC era: from proton–proton to heavy-ion collisions. *Eur. Phys. J. C* 76/3 (2016) 107.
2. X. Dong, Y. Lee, R. Rapp: Open Heavy-Flavor Production in Heavy-Ion Collisions. *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* 69 (2019) 417.

3. B. B. Abelev et al. [ALICE]: Performance of the ALICE Experiment at the CERN LHC. *Int. J. Mod. Phys. A* 29 (2014) 1430044.
4. F. Noferini [ALICE]: ALICE results from Run-1 and Run-2 and perspectives for Run-3 and Run-4. *J. Phys. Conf. Ser.* 1014/1 (2018) 012010.
5. S. Acharya et al. [ALICE]: Production of muons from heavy-flavour hadron decays in pp collisions at $\sqrt{s} = 5.02$ TeV. *JHEP* 09 (2019) 008.
6. S. Acharya et al. [ALICE]: Measurement of D-meson production at mid-rapidity in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV. *Eur. Phys. J. C* 77/8 (2017) 550.
7. S. Acharya et al. [ALICE]: Azimuthal correlations of prompt D mesons with charged particles in pp and p–Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV (2019). Preprint: arXiv:1910.14403 [nucl-ex].
8. T. Sjöstrand, S. Mrenna, P. Z. Skands: A Brief Introduction to PYTHIA 8.1. *Comput. Phys. Commun.* 178 (2008) 852.
9. E. Frajna, R. Vértési: Correlation of Heavy and Light Flavors in Simulations. *Universe* 5/5 (2019) 118.
10. J. R. Christiansen, P. Z. Skands: String Formation Beyond Leading Colour. *JHEP* 08 (2015) 003.
11. M. He, R. Rapp: Charm-Baryon Production in Proton-Proton Collisions. *Phys. Lett. B* 795 (2019) 117.
12. R. Xu, W. Deng, X. Wang: Nuclear modification of high- p_T hadron spectra in p+A collisions at LHC. *Phys. Rev. C* 86 (2012) 051901.
13. A. Beraudo, A. De Pace, M. Monteno, M. Nardi, F. Prino: Heavy-flavour production in high-energy d–Au and p–Pb collisions. *JHEP* 03 (2016) 123.
14. R. Vértési [ALICE]: Heavy-Flavor Measurements with the ALICE Experiment at the LHC. *Universe* 5/5 (2019) 130.
15. S. Wicks, W. Horowitz, M. Djordjevic, M. Gyulassy: Elastic, inelastic, and path length fluctuations in jet tomography. *Nucl. Phys. A* 784 (2007) 426.
16. S. Acharya et al. [ALICE]: Production of charged pions, kaons and (anti-)protons in Pb–Pb and inelastic pp collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV (2019). Preprint: arXiv:1910.07678 [nucl-ex].
17. S. Cao, X. Wang: Jet quenching and medium response in high-energy heavy-ion collisions: a review (2002). Preprint: arXiv:2002.04028 [hep-ph].
18. J. Adams et al. [STAR]: Experimental and theoretical challenges in the search for the quark gluon plasma: The STAR Collaboration's critical assessment of the evidence from RHIC collisions. *Nucl. Phys. A* 757 (2005) 102.
19. R. Snellings: Elliptic Flow: A Brief Review. *New J. Phys.* 13 (2011) 055008.
20. J. Adam et al. [ALICE]: Anisotropic flow of charged particles in Pb–Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV. *Phys. Rev. Lett.* 116/13 (2016) 132302.
21. Á. L. Gera [ALICE]: Upgrade of the ALICE Time Projection Chamber for the LHC Run 3 (2020). Preprint: arXiv:2004.10520 [physics.ins-det].
22. S. A. Khan, J. Mitra, T. K. Nayak, T. Kiss, E. Dávid, A. Kluge: Common Readout Unit (CRU) – A New Readout Architecture for the ALICE experiment at the CERN-LHC. *DAE Symp. Nucl. Phys.* 59 (2014) 972.



A szerkesztőbizottság fizika tanításáért felelős tagjai kérik mindazokat, akik a fizika vonzóbbá tétele, a tanítás eredményességének fokozása érdekében új módszerekkel, elképzelésekkel próbálkoznak, hogy ezeket osszák meg a Szemle hasábjain az olvasókkal!



A CSILLAGKÉPEK ANATÓMIÁJA

Kutrovácz Gábor
BME GTK Filozófia és Tudománytörténet Tanszék

A csillagképek fizikai értelemben nem léteznek, hiszen a Föld egén egy adott alakzatot kirajzolni látszó csillagok valójában igen eltérő távolságokra helyezkednek el a megfigyelőtől. Ugyanakkor a konstellációk azonosítása talán egyetemes emberi igény: feltehetőleg minden kultúra ismert csillagképeket. Az odaképzelt mintázatok nagyban megkönnyítik a kigazodást a csillagos égbolton, és így jelentős szerepet töltenek be a tájékozódásban mind térben (alpirányok felismerése), mind időben (az év múlásának követése). Az persze már népről népre változik, hogy pontosan melyik csillagcsoportokat azonosították csillagképekként, ezek tipikusan mekkora égtérületre terjedtek ki, az égbolt mekkora hányadán tartottak számon csillagképeket, és milyen objektumokkal azonosították azokat. Az utóbbinak csak az emberi fantázia szabhat határt, ám az magától értetődő, hogy az egyes kultúrák képviselői „ismerős” dolgok – emberek, állatok, tárgyak, mitológiai lé-

nyek – képeivel ragadták meg a képzelet által össze rendezett égi alakzatokat.

A mai világban a csillagképek terén is érvényesül a globalizáció: a legtöbb csillagképhagyomány feledésbe merült, sőt gyakran nyom nélkül elveszett, mert kiszorította azokat a nyugati tudomány által felkarolt görög–római tradíció. Ennek egyik meghatározó szöveges forrása az ókor legnagyobb hatású csillagászati műve, az i. sz. 2. századi *Ptolemaiosz Nagy matematikai összefoglalása*, amelyre *Syntaxisként* vagy *Almagestumként* is szokás hivatkozni. E mű VII. és VIII. könyveiben a szerző közöl egy csillagkatalógust, amely mintegy ezer égitest adatait tartalmazza. Ez a legkorábbi fennmaradt részletes csillagfelsorolás, hiszen a forrásaként szolgáló korábbi katalógusok nem hagyományozódtak ránk (az első ilyen egyébként feltehetőleg i. e. 2. századi *Hipparkhosz* alkotta meg). A *Syntaxis* óriási népszerűségének köszönhetően a későbbi korokban, egészen *Kopernikusz* koráig ez a

1. táblázat

Ptolemaiosz 48 csillagképe.					
Északi csillagkép	darab	Állatövi csillagkép	darab	Déli csillagkép	darab
Kis Medve (Ursa Minor)	7+1	Kos (Aries)	13+5	<i>Tengeri Szörny</i> (Cetus)	22
Nagy Medve (Ursa Maior)	27+8	Bika (Taurus)	32+11	Orion (Orion)	38
Sárkány (Draco)	31	Ikrek (Gemini)	18+7	<i>Folyó</i> (Eridanus)	34
Cefeusz (Cepheus)	11+2	Rák (Cancer)	9+4	Nyúl (Lepus)	12
<i>Szántóvető</i> (Bootes)	22+1	Oroszlán (Leo)	27+5	Kutya (Canis Maior)	18+11
Északi Korona (Corona Borealis)	8	Szűz (Virgo)	26+6	Kis Kutya (Canis Minor)	2
<i>Térdeplő ember</i> (Hercules)	28+1	<i>Ollók</i> (Libra)	8+9	Argo (→ később többre bontották)	45
Lant (Lyra)	10	Skorpió (Scorpius)	21+3	Vízikígyó (Hydra)	19+2
<i>Madár</i> (Cygnus)	17+2	Nyilas (Sagittarius)	31	Serleg (Crater)	7
Kassziopeia (Cassiopeia)	13	Bak (Capricornus)	28	Holló (Corvus)	7
Perzeusz (Perseus)	26+3	Vízöntő (Aquarius)	42+3	Kentaur (Centaurus)	37
Szekeres (Auriga)	14	Halak (Pisces)	34+4	<i>Fenevad</i> (Lupus)	19
Kígyótartó (Ophiuchus)	24+5	összesen 12 csillagkép 346 csillaggal		<i>Tömjéntartó</i> (Ara)	7
Kígyó (Serpens)	18			Déli Korona (Corona Australis)	13
Nyíl (Sagitta)	5			Déli Hal (Piscis Austrinus)	11+6
Sas (Aquila)	9+6			összesen 15 csillagkép 316 csillaggal	
Delfin (Delphinus)	10				
<i>Ló eleje</i> (Equuleus)	4				
<i>Ló</i> (Pegasus)	20				
Androméda (Andromeda)	23				
Háromszög (Triangulum)	4				
összesen 21 csillagkép 360 csillaggal					

A feltüntetett darabszámok a csillagképeket alkotó csillagok számát jelentik, ahol az első szám a figurát kirajzoló csillagokhoz tartozik, míg a második a figura közelében található, abban részt nem vevő (úgynevezett „megformálatlan”) csillagokhoz. A dőlt betűvel írt csillagképek elnevezése mára megváltozott.

lista szolgált alapul minden további csillagkatalógus számára.

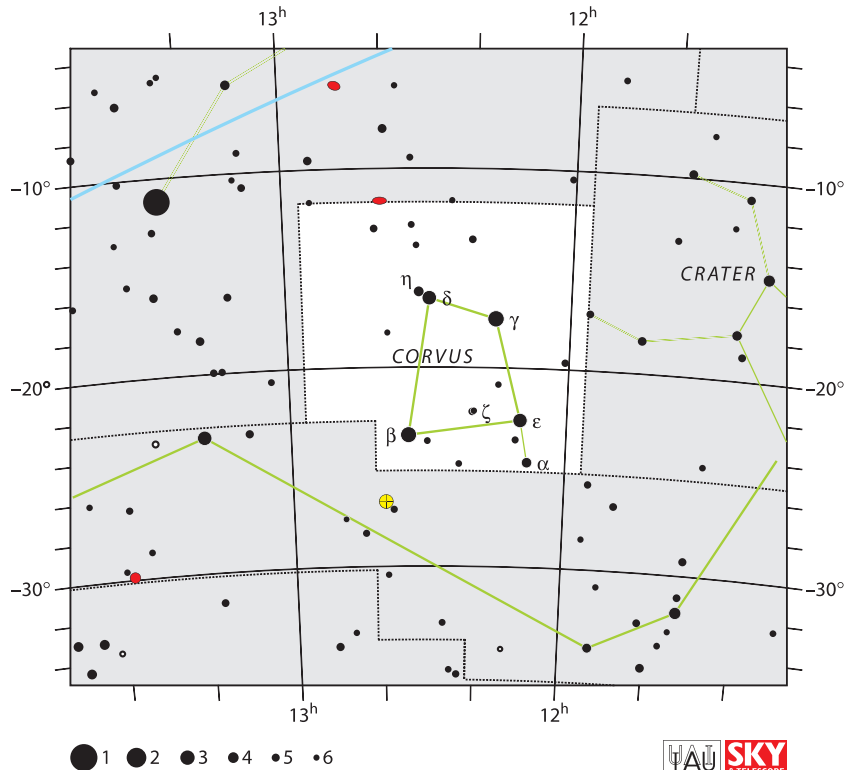
Ptolemaiosz 48 csillagképbe csoportosította az általa megfigyelt csillagokat. Ezek szinte teljesen meg egyeznek azokkal a konstellációkkal, amelyeket az i. e. 3. századi költő, Aratosz sorolt fel a *Jelenségek* (*Phainomena*) című költeményében, és amelyeket a későbbi görög-római szerzők is jellemeztek. A csillagképek három osztályt alkotnak az ekliptikához, azaz a Nap – és körülbelül a bolygók – útját kijelölő körhöz viszonyított elhelyezkedésük szerint: 21 északi (vagyis az ekliptika körétől északra levők) összesen 360 csillaggal, 12 állatövi (amelyeken áthalad az ekliptika köre) 346 csillaggal és 15 déli (tehát az ekliptikától délre levők közül azok, amelyek még a horizont fölé emelkednek a Ptolemaiosz lakhelyéül szolgáló Alexandriából nézve) 316 csillaggal. Közöttük hozzávetőlegesen 20 állati figura, 12 emberi (vagy isteni), 6 szörny és 10 élettelen objektum található. A listát lásd az 1. táblázatban.

Példaként vegyünk szemügyre egy kisebb konstellációt a déli égtérületről, a Hollót (latinul *Corvus*, görögül *Κόραξ*). A csillagkép ma elismert határai között (erre később visszatérünk) körülbelül 30 olyan csillag helyezkedik el, amely ideális körülmények esetén – vagyis a fényszennyezéstől mentes, felhőtlen éjszakai égbolton – végzett szabad szemes észlelés számára nagyjából még látható (azaz fényesebb 6,5 magnitúdónál). A terület modern ábrázolásához lásd az 1. ábrát. Ptolemaiosz listája szerint azonban ez a csillagkép hét csillagból áll: ezek a fényesebbek vagy könnyebben azonosíthatók. Katalógusának vonatkozó részletét a 2. táblázat tartalmazza magyar fordításban.

Vegyük szemügyre ezt a táblázatot kissé közelebről, és közben haladjunk jobbról balra! Az utolsó oszlop valójában nem része az eredeti katalógusnak, ezt csak az azonosíthatóság kedvéért szokás hozzátenni a modern kiadásokban. A fényesség (görögül *μεγεθος*,



Kutrovátz Gábor okleveles csillagász, fizikatanár és filozófus. PhD fokozatát tudományfilozófiából szerezte a BME-n. Jelenleg a BME docense, fő kutatási területe a csillagászat története.



1. ábra. A Holló csillagképről készült modern csillagtérkép (fehér terület). A pontok nagysága a csillagok fényességét reprezentálja. A görög betűk a fényesebb csillagok úgynevezett Bayer-azonosítói, amelyek *Jobannes Bayer* 1603-ban megjelent *Uranometria* katalógusából származnak. A zöld vonallal önkényesen megrajzolt alakzat pszichikai igényt elégít ki: az azonosítást megkönnyítő fiktív konfigurációt jeleníti meg. A Hollótól „balra” a fényes csillag a Spicát, a Szűz legragyogóbb csillagát jelöli, felette fut az ekliptika köre (kék). A koordináták itt – szemben Ptolemaioszéival – (második) egyenlítői koordináta-rendszerben vannak megadva. Forrás: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Corvus_IAU.svg

azaz „nagyság”) egy hozzávetőleges érték, amely a Hipparkhosz által bevezetett skálán alapul: a legfényesebb csillagok az első osztályba, míg a leghalványabbak a hatodikba tartoznak.¹ A szélesség az úgynevezett ekliptikai koordináta-rendszerben értendő, vagyis az ekliptikától mért szögtávolságot jelenti fokokban (a „D” arra utal, hogy „déli” – ma ezt negatív előjellel jelezzük). A hosszúság ugyanebben a vonatkoztatási rendszerben értendő, azzal a megszorítással, hogy Ptolemaiosz ezt nem a 0°–360° tartományban adta meg, hanem 12 egyenlő, 30°-os zodiákus szakaszra osztotta az ekliptikát, és minden esetben az adott szakaszon – itt: Virgo, azaz Szűz – belüli pozíciót adta meg.

Számunkra a legérdekesebb azonban az első oszlop, amely az odaképzelt figura, ez esetben a holló testrészeivel azonosítja a csillagot.

Ptolemaiosz műve tisztán technikai munka, vagyis gondos észlelési adatokra alapoz precíz matematikai levezetések. A táblázatban található leírásoknak, csakúgy mint általában az odaképzelt figuráknak, jelen esetben nincsen semmilyen mitológiai vagy asztrológiai jelentőségük. Funkciójukat tekintve az a cél-

¹Hipparkhosz magnitúdórendszere alapján alkották meg később a fényesség mérésére szolgáló, ma is használt csillagászati magnitúdóskálát (a szerk. megj.).

2. táblázat

A Holló csillagkép csillagai Ptolemaiosz katalógusában.

leírás	hosszúság	szélesség	fényesség	Bayer-azonosító
A csőrön lévő, amely közös a Hydrával	Vir 15 ¹ / ₃	D 21 ² / ₃	3	α
A nyakon lévő, a fej csatlakozásánál	Vir 14 ¹ / ₃	D 19 ² / ₃	3	ε
A mellkason lévő	Vir 16 ² / ₃	D 18 ¹ / ₆	5	ζ
Az elülső, jobb szárnyon lévő	Vir 13 ¹ / ₂	D 14 ¹ / ₆	3	γ
Az előbbi a hátsó szárnyon lévő kettő közül	Vir 16 ² / ₃	D 12 ¹ / ₂	3	δ
Az utóbbi ugyanabból	Vir 17	D 11 ³ / ₄	4	η
A láb végén lévő, amely közös a Hydrával	Vir 20 ¹ / ₂	D 18 ¹ / ₆	3	β

A magyarázatot lásd a szövegben.

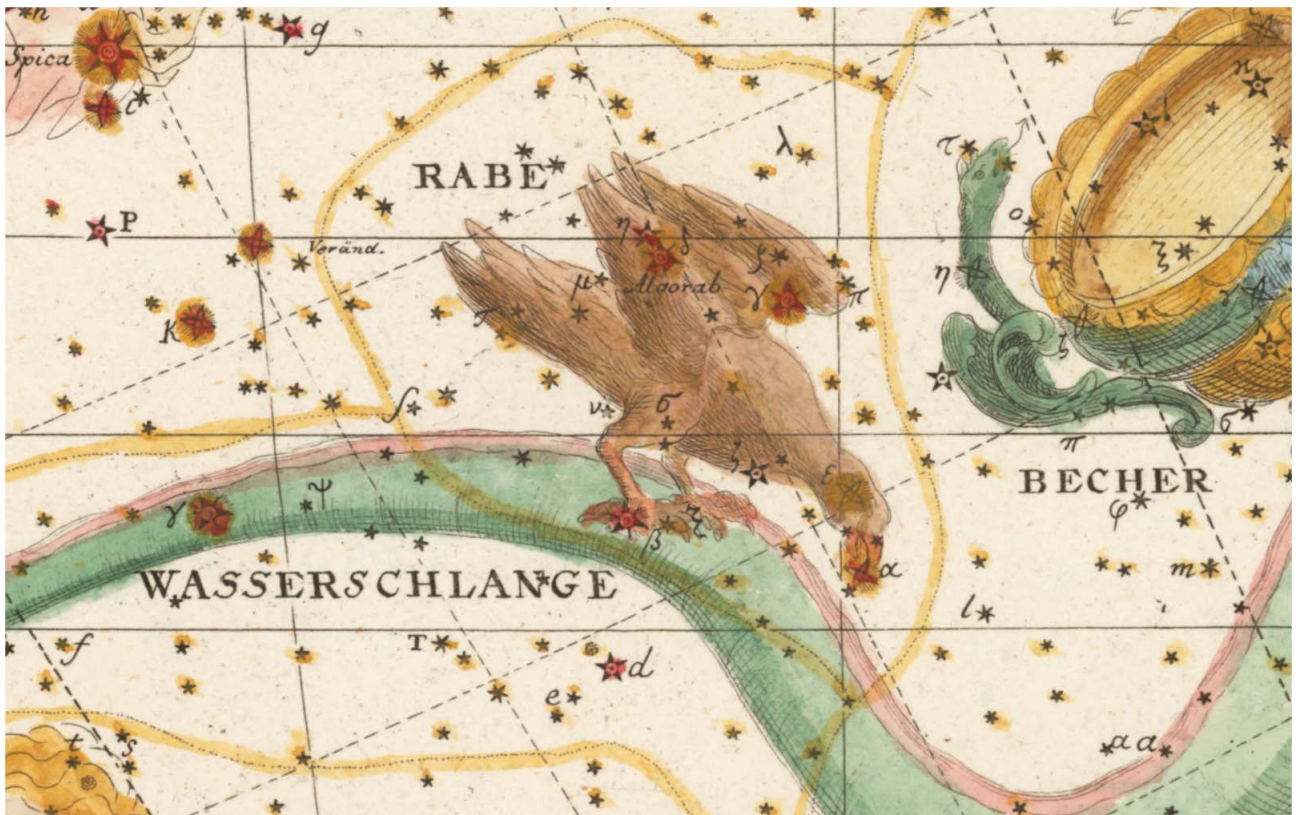
juk, hogy megkönnyítsék az egyes csillagok azonosítását, tehát az olvasó ez alapján tudja, hogy a szerző éppen melyik csillagot említi. Szigorúan véve ezt a funkciót a koordináták is képesek lennének ellátni, ha elég pontosak volnának, és ha az ókori olvasó könnyen és precízen mérhetett volna pozíciót, ám ezek a feltételek itt nem teljesülnek. Egyszerűbb tehát, ha az olvasó úgy követi a leírást, hogy maga is igyekszik odaképzelné például egy hollót.

Ezek a leírások szolgáltak alapul a későbbi csillagkép-ábrázolásokhoz. Bár ókori ábrázolások nem

maradtak fenn (eltekintve egy i. sz. 2. századi márványszobor éggömbjétől, az úgynevezett farnesei Atlasztól), az európai reneszánsz korában és az újkorban született csillagtérképek nagytöbbsége igyekezett minél pontosabban odarajzolni Ptolemaiosz figuráit. E hagyomány egyik utolsó, ám annál jelesebb képviselője *Johann Elert Bode*, a 18. és 19. század fordulójának kiemelkedő csillagásza és a Berlieni Observatórium vezetője, aki igen pontos és részletes csillagtérképein (*Uranographia*, 1801) még megjelenítette az ókori figurákat. A 2. ábrán e csillagtérkép egy kissé egyszerűsített, kevésbé tudományos igényű változatát láthatjuk.

Ha általános képet szeretnénk kapni a ptolemaioszi csillagképfigurák és az azokat kirajzoló csillagok viszonyáról, akkor érdemes lehet némi kezdetleges statisztikát készíteni azáltal, hogy számba vesszük, szerző a katalógusában melyik testrésze hányszor hivatkozik. Ehhez a csillaglista egy olyan kritikai kiadását vettük alapul, amelyet *Francis Baily*, a promi-

2. ábra. Johann Elert Bode (1747–1826) ábrázolása a Hollóról. A kapcsolódó ókori legendák szerint a madár a vízikígyó (*Hydra*) testét csipkedti, mert rá szeretné venni arra, hogy elérhesse a szomszédos csillagképet adó Serleget (*Crater*) és ihasson belőle. Forrás: Vorstellung der Gestirne auf XXXIV Tafeln, 1805. <https://www.raremaps.com/gallery/detail/30085/wasserschlange-rabe-becher-hydra-continua-crater-corvus-bode>



Az egyes testrészekre történő hivatkozások száma testtájanként csoportosítva.

fej			törzs			végtag (kar és láb)		
latin	magyar	db.	latin	magyar	db.	latin	magyar	db.
caput	fej	46	corpus	test	15	brachium	(fel)kar	13
capillus	haj	1	collum	nyak	46	cubitus	könyök	29
cranium	fejtető	5	occiput	tarkó	6	vola	csukló	11
frons	homlok	5	interscapilium	nyakszirt	5	manus	alkar/kéz	35
supercilium	szemöldök	1	scapula	lapocka	18			
oculus	szem	11	humerus	váll	41	coxa	comb/far	4
tempus	halánték	1	axilla	hónalj	5	crus	comb	25
auris	fül	9	spina	gerinc	10	genu	térd	41
facies	arc	3	dorsum	hát	5	poples	térdhajlat	13
naris	orr(lik)	5	pectus	mellkas	18	tibia	lábszár	15
os	száj	14	cor	szív	2	sura	vádli	4
rictus	pofa	12	venter	has	16	talus	sarok/boka	10
rostrum	csőr	1	umbilicus	köldök	1	calcaneum	sarok	5
lingua	nyelv	1	latus	oldal	18	pes	láb(fej)	64
maxilla	állkapocs	3	lumbus	farhát	13			
mento	áll	3	vertebrum	csípő	6		kar összesen	88
			clunus	far	3		láb összesen	181
	fej összesen	121		törzs összesen	228		végtag összesen	269

A táblázat nem tartalmazza az emberi testrésszel nem rokonítható szerveket (például farok, szárny), ám tartalmazza az emberhez hasonló állati testrészeket (például pofa, farhát), valamint az embereknél is értelmezhető testrészek esetén (például láb, szem) az állatoknál és szörnnyeknél történő hivatkozásokat is figyelembe vettük.

nens angol csillagász adott közre 1843-ban, és amely az eredeti görög szöveg helyett az ábrázolások alapján gyakran képező latin fordításokon alapul.²

A számlálás eredményei elé kívánkozik néhány módszertani megjegyzés. A különböző terminusokkal jelölt objektumokat (első körben) különböző testrészeknek tekintettük, akkor is, ha jelentésükben igen hasonlóak (magyarul ilyen lenne például a „far”/„fenék”). Csak akkor tettünk különbséget emberi és állati testrészek között, ha ez nyelvi szinten is jelentkezett (például „száj”/„pofa”), különben nem különböztettük meg az emberre és állatra (vagy szörnnyre) történő hivatkozásokat (például „szem”). Figyelembe vettük az implicit hivatkozásokat is, ahol szövegszerűen nem az adott leírásban kerül említésre a kérdéses testrészt, hanem egy megelőző leírásra visszautalva (erre példa a 2. táblázat

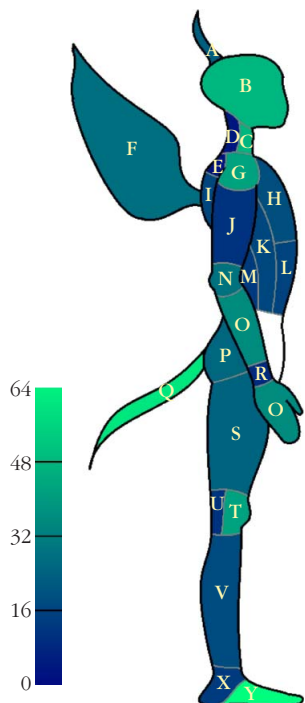
kat is, ahol szövegszerűen nem az adott leírásban kerül említésre a kérdéses testrészt, hanem egy megelőző leírásra visszautalva (erre példa a 2. táblázat

A legtöbbszor (legalább tízszer) hivatkozott testrészek.

latin	magyar	db.	latin	magyar	db.
pes	láb(fej)	64	latus	oldal	18
cauda	farok	58	venter	has	16
caput	fej	46	corpus	test	15
collum	nyak	46	tibia	lábszár	15
humerus	váll	41	os	száj	14
genu	térd	41	brachium	(fel)kar	13
manus	alkar/kéz	35	lumbus	farhát	13
cubitus	könyök	29	poples	térd(hajlat)	13
crus	comb	25	rictus	pofa	12
cornu	szarv	24	oculus	szem	11
ala	szárny	23	vola	csukló	11
forfex	olló	21	spina	gerinc	10
scapula	lapocka/hát	18	talus	sarok/boka	10

A táblázatban emberi és állati testrészek egyaránt szerepelnek.

²A szöveg alapját képező latin fordítás Georgios Trapezuntios 15. századi munkája. Az eredeti, görög nyelvű katalógus alapján némileg eltérő statisztikai adatok, de minőségileg hasonló következtetések adódnak, amelyeket a szerző készséggel az érdeklődők rendelkezésre tud bocsátani.



betű	latin	magyar	darab
A	cornu	szarv	24
B	caput	fej	46
C	collum	nyak	46
D	occiput	tarkó	6
E	interscapilium	nyakszirt	5
F	ala + penna + pectine	szárny	28
G	humerus	váll	41
H	pectus + cor	mellkas	20
I	scapula	lapocka	18
J	brachium	felkar	13
K	latus	oldal	18
L	venter + umbilicus	has	17
M	spina + dorsum	hát	15

betű	latin	magyar	darab
N	cubitus	könyök	29
O	manus	alkar, kézfej	35
P	lumbus + vertebrum + clunis + coxa	farfáj	26
Q	cauda	farok	58
R	vola	csukló	11
S	crus	comb	25
T	genu	térd	41
U	poples	térdhajlat	13
V	tibia + sura	lábszár	19
X	talus + calcaneum	sarok + boka	15
Y	pes	láb(fej)	64

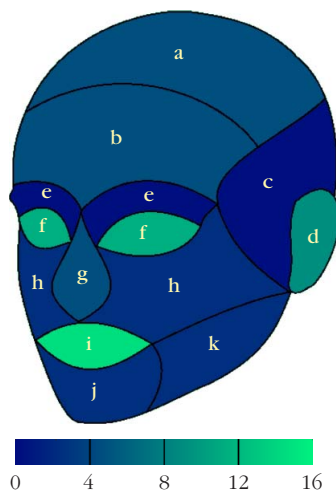
3. ábra. Az egyes testtájakra történő hivatkozások száma színekódolva. A kék árnyalat a kevés, a zöld pedig a sok hivatkozást jelenti. Az emberekre nem értelmezhető testrészek közül csak a „népszerűeket” (farok, szárny, szarv) vettük figyelembe. Az emberihez hasonló állati testrészeket (például pofa, farhát) figyelmen kívül hagytuk. Megjegyzendő, hogy a „láb” terminus sokszor általánosabb jelentéssel bír (a teljes láb valamely része), mint amit az ábra sugall (lábfej), ám ezt az ábrázolásunk nem tudja megjeleníteni.

hatodik csillaga, amely az ötödik leírásra utalva implicit hivatkozik a szárnyra). A ruházatra történő hivatkozásokat akkor sem vettük figyelembe, ha testtáj szempontjából viszonylag egyértelműek (például „öv”, „korona”). Végül: egyes terminusok nem szokványos értelemben szerepelnek (például „crus” – „comb”, „lumbus” – „farhát”, „vola” – „csukló”), itt igyekeztünk az ábrázolások és a katalógus angol fordításai alapján követni Ptolemaiosz szándékát.

Számlálásunk szerint a katalógusban összesen 770 hivatkozást találunk emberi vagy állati testrészeire, eb-

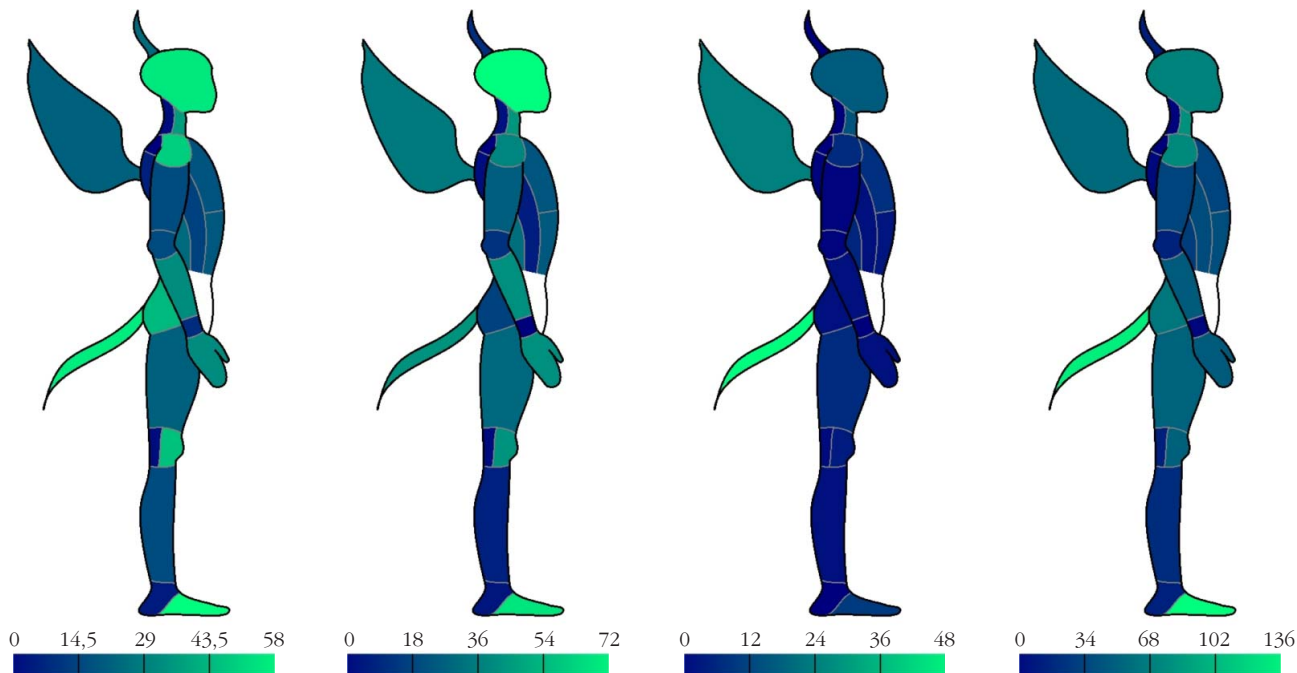
ből 232 (30%) implicit. Ez azt jelenti, hogy a csillagleírások többsége, körülbelül háromnegyede hivatkozik a figurák testére – amit kissé árnyal, hogy néhány esetben egy leírás két testrésze is hivatkozik, amelyeket külön előfordulásként vettünk figyelembe. Mivel vannak olyan csillagképek, amelyeket nem élő figurák reprezentálnak (például Nyíl, Háromszög, Argo (hajó) stb.), megállapítható, hogy ahol csak élő figurák adják a csillagképet, ott Ptolemaiosz rendszerint ezek testéhez köti a leírásokat – ám nem mindig: néha geometriai alakzatok is szerepet játszanak.

4. ábra. A fej egyes területeire történő hivatkozások száma színekódolva. A kék árnyalat a kevés, a zöld pedig a sok hivatkozást jelenti. Az emberekénél is értelmezhető testrészek esetén (például száj, szem) az állatoknál és szörnyeknél történő hivatkozásokat is figyelembe vettük.



betű	latin	magyar	darab
a	cranium	fejtető	5
b	frons	homlok	5
c	tempus	halánték	1
d	auris	fül	9
e	supercilium	szemöldök	1
f	oculus	szem	11
g	naris	orr(lik)	5
h	facies	arc	3
i	os	száj	14
j	mento	áll	3
k	maxilla	állkapocs	3

A különböző terminussal jelölt testrészek száma 57, így átlagosan 13,5 esetben történik hivatkozás egy adott fajta testrészeire. A hivatkozások többségében a csillag a szóban forgó testrészen található, ám néha csak annak közelében (alatta, felette stb.). A hivatkozásszámokat a 3. táblázat mutatja be emberi testtáj szerint csoportosítva, tehát kihagyva azon testrészeket, amelyeknek nincsen emberi megfelelője (például „szárny”, „kopolyú”). A 4. táblázat a legtöbbször hivatkozott (emberi és állati) testrészeket sorolja fel. A 3. ábra egy fiktív, főként – de nem teljesen – emberi figurán illusztrálja az egyes testrészekre való hivatkozás gyakoriságát színekódolva, míg a 4. ábra ugyanezt végzi el az (emberi) fej részeire.



5. ábra. Koraújkori csillagkatalógusok hivatkozási gyakoriságai testrészek szerint. Nicolaus Kopernikusz (1543); Tycho Brahe (1602/1627); Edmond Halley (1679); Johannes Hevelius (1690). A különbségek részben a tárgyalt csillagképek eltéréseinek, részben a szerzők preferenciáinak köszönhetők, ám az közös pont, hogy a testrészekkel történő objektumazonosítás mindenütt gyakori (55 és 80% között).

A számok összességében azt mutatják, hogy a nagyobb testtájakra való hivatkozások aránya összhangban van a testtájak realisztikus méretével, mivel végtagok (269) > törzs (228) >> fej (121), valamint láb (181) >> kar (88). Itt érdemes megjegyezni, hogy néhány kivételtől eltekintve (például Pegazus, Bika) a figurák egész alakosak, tehát nincsenek például csak fejet ábrázoló csillagképek. Ugyanakkor, ha az egyes végtagokat tekintjük, látható, hogy az ábrák „töréspontjait” kijelölő ízületek hivatkozási aránya jóval magasabb annál, mint amit ezen testrészek nagysága indokolna: a törzs esetén messze kiemelkedő jelentőséget kap a váll, a lábak esetén pedig a térd, illetve – bár kevésbé hangsúlyosan – a kar esetén a könyök. Mindez persze nem meglepő, hiszen a hivatkozások száma akkor lenne úgymond területarányos, ha azt vizsgálnánk, hogy előre megrajzolt figurák esetén hová esnek a véletlenszerűen elhelyezkedő csillagok. Ám mivel éppen a csillagokhoz igazítjuk a figurákat, nyilvánvaló, hogy a testhelyzet azok elhelyezkedéséhez fog illeszkedni, kitüntetve a test jellegzetes és jól lokalizálható pontjait. Valamint azt is ki kell emelnünk, hogy a nyak (és a fark) erős hangsúlya első sorban az ezekben bővelkedő szörnyeknek (Sárkány, Kígyó, Vízikígyó...) köszönhető.

Végezetül az 5. ábrán négy koraújkori csillagkatalógusban – alkotóik Nicolaus Kopernikusz, Tycho Brahe, Edmond Halley, Johannes Hevelius – található testrészek előfordulási gyakoriságát mutatjuk be.

Ezeket a csillagképeket apró eltérésekkel ma is számon tartjuk, kiegészítve további negyvennel, amit az elmúlt négyszáz év csillagászai vezettek be részben a görög-római csillagképek közötti „üresebb”, azaz látható csillagokban szegényebb területekre, részben a

déli pólus környékének az ókori szerzők által megfigyelhetetlen régiójára. A csillagképek (szám szerint 88) hivatalos listáját a Nemzetközi Csillagászati Unió véglegesítette 1922-ben. Természetesen az ókoriak által odaképzelt figurák mára elveszítették a jelentőségüket: a csillagképek már nem csillagok által kirajzolt alakzatoknak felelnek meg, hanem az égbolt pontosan rögzített határok közé eső területeinek – ezeket a határokat 1930-ban szögezte le az előbb említett szervezet. Valójában pedig ennek sincs különösebb jelentősége, hiszen a határok teljesen önkényesek, és csak a hozzávetőleges tájékozódást segítik elő – a pontos elhelyezkedést pedig az objektumok (csillagképektől függetlenül) koordinátái adják meg.

Am annak ellenére, hogy tudományos jelentőségük háttérbe szorult, a csillagképfigurák kulturális szerepe továbbra is jelentős: részint a történeti vonatkozások miatt, amelyek gyakran tetten érhetők irodalmi vagy képzőművészeti örökségünkben, részint pedig – az állatövi csillagképek esetén – az asztrológia hatására. Érdekesség, hogy az asztrológia nyugati hagyományának egyik legfontosabb történeti szövegét, a *Tetrabibloszt* szintén Ptolemaiosz szerezte.

Irodalom

1. Heiberg, J. L. (szerk.): *Claudii Ptolemaei Opera Quae Exstant Omnia: Syntaxis mathematica*. Leipzig: B.G. Teubneri, 1898–1903. [A görög eredeti standard modern kiadása.] Online: <https://www.wilbourhall.org/pdfs/HeibergAlmagestComplete.pdf>
2. Peters, C.H.F., Knobel, E.B.: *Ptolemy's catalogue of stars: a revision of the Almagest*. Washington: The Carnegie Institution, 1915. [A latin nyelvű katalógust tartalmazza.] Online: <http://www.atlascoelestis.com/Montignot%20Knobel%20Ptolemy%27s%20cat%201915.pdf>
3. Toomer, G.J., ford.: *Ptolemy's Almagest*. London: Duckworth – New York, Springer, 1984. [A mű pontosabbik angol fordítása.]

EÖTVÖS LORÁND EMLÉKKIÁLLÍTÁSOK, 1970–1998

Körmendi Alpár
geofizikus, Budapest

A *Fizikai Szemle* (69/12) 2019. decemberi számában gazdagon illusztrált írás jelent meg *Bodoky Tamás*, *Szabó Zoltán*, *Baráth István* szerzőktől. Részletesen foglalkoznak az egykori ELGI-ben 1998-ban Budapesten megnyitott emlékkiállítással és gyűjteménnyel. Hasonlattal élve, megírták egy történet 3. fejezetét, utólag próbálók részleteket felvillantani a korábbi fejezetekből. Együttal szeretnék emléket állítani három embernek, akik az 1998-as kiállítást megalapozták. (Egyes szám első személyben írok, ahol saját véleményemet adom tovább.)

Az ideiglenes és az első állandó kiállítás

Uzsoki András (1. kép) régész és muzeológus volt az első tihanyi időszakos Eötvös Loránd emlékkiállítás megálmodója és megvalósítója. Tömörített életrajza az interneten több helyen megtalálható, itt annyit ragadok ki belőle, amennyi a *korszak és a tihanyi helyzet megértéséhez* szükséges.

1944-ben érettségizett, és rögtön kilökték a keleti frontra, ami akkor már elérte a Kárpátokat. Hadi fogságba esett, Georgiába (orosz: *Gruzija*) vitték, ahol erdei favágóként dolgozott. Alacsony és vékony termete miatt kifejezetten alkalmatlan arra a munkára, de túlélte. 1948-ban engedték haza, alkalmi építőmunkásként hányódott ide-oda, majd felvételt nyert a bölcsészkarra. 1955-től 1958-ig volt a mosonmagyaróvári Hanság Múzeum igazgatója. Bár Somogyban született, mindig *Mosonmagyaróvárt nevezte otthonának*, és végül – fiatalon elhunyt felesége mellé – ott temették el 2011-ben. A hírhedt 1956-os mosonmagyaróvári sortűz mély hatást gyakorolt az akkor 31 éves muzeológusra. Nem beszélt azokról a politikai és



1. kép. Uzsoki András



Körmendi Alpár szenior geofizikus, 1968-ban végzett az ELTE-n. A mérés-technika és jelfeldolgozás (kibernetika) érdekelte. A Tatabányai Szénbányánál lett belőle „becsületes bányász”. 1982-ben hívták meg a geofizikai obszervatórium korszerűsítésére Tihanyba. Emiatt került az ottani Eötvös-kiállítások szervezése és az Eötvös-hagyaték megőrzése projektbe, amit legjobb tudása szerint teljesített. Életének Eötvös-epizódja váratlanul kezdődött és hirtelen ért véget: 1998-ban elhagyta az ELGI-t és a geofizikát.

szakmai igazságtalanságokról, amelyekért 1991-ben rehabilitálták, de szavak nélkül is tudni lehetett, hogy 1970 táján a Győrből Tihanyba helyezés büntető lefokozás volt, országon belüli száműzetés, nem pedig kitüntető „sine cura” állás vagy jutalomüdülés.

Tihany sokáig túske volt a szocialista rendszer tesztében. A szovjet-típusú országokat a nehézipar elsobbsége, a proletariátus és a burzsoázia közötti osztályharc jellemezte. Ezzel szemben Tihany nyersanyaga legfeljebb a nád, munkásosztálya az a tucatnyi férfi, aki a balatonfüredi hajógyárba járt dolgozni. Viszont ott volt a Kálvária, mint a trianoni béke emlékműve (amit 1960-ban bontottak el), ott magasodik a „klerikális reakció” hivalkodó jelenléte, az apátság és templom. Ez a felfogás csak a '80-as évekre változott meg, amikor a Balaton, és kiemelten Tihany, a nyugat- és keletnémetek találkozóhelyévé lett, és a nyugatnémet márka fontosabb lett, mint az ideológia.

Uzsoki András világosan látta, hogy az adott földrajzi térben és a kultúrpolitika háromdimenziós terében (tiltott, túrt, támogatott) neki a tudomány adja az egyetlen lehetőséget, hogy a „támogatott” irányba tudjon elmozdulni. Bár *Eötvös Loránd* arisztokrata, mint a proletariátus nagy halottja 1919-ben, ideológiailag kikezdehetetlen személy. Ez indította el az első Eötvös Loránd emlékkiállítás megszervezését, egy ideiglenes kiállítást – a megyei pártvezetés hozzáállását szondázva – 1970 novemberétől 1971 áprilisáig, gondosan a turistaszézonon kívül (2. kép, balra).

1982 májusában alig két hete voltam a tihanyi obszervatórium munkatársa, egyik reggel becsöngetett Uzsoki András. Bemutatkozott, mint *Bandi bácsi* – ebből a közvetlenségből megértettem, hogy bevett a helyiek közé –, és röviden elmondta, hogy szerinte megérett a helyzet az állandó Eötvös Loránd kiállítás megszervezésére; számíthat-e rám? A válasz természetesen *IGEN* volt, és kezdetét vette két és fél év közös munkája. 1984. szeptember utolsó hetében, az októberi Múzeumi Hónap kezdetére, *Dank Viktor*, a Központi Földtani Hivatal elnöke, megnyithatta a kiállítást (2. kép, jobbra), amelyhez az apátság első emeletén két szerzetesi szobát kapott kölcsön az ELGI, a szűk hellyel ügyesen kellett gazdálkodni. Az a kiállítás ugyan jóval kisebb volt, mint a későbbiek, de – véleményem szerint – hangulatosabb. *Barna Péter* fiatal látványtervező ügyesen használta fel a boltíveket, beugrókat, előnnyé tudta változtatni a környezet korlátait.

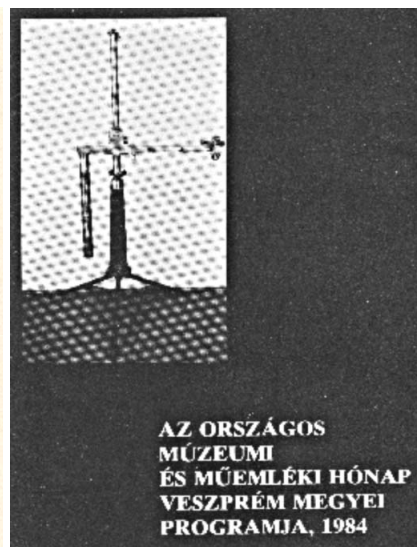
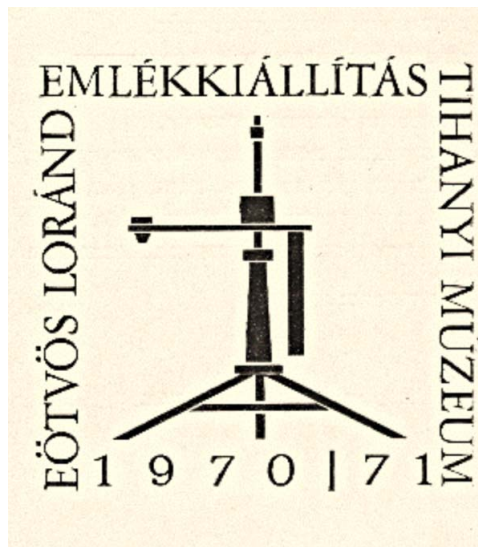
Tudtuk, hogy az állandó kiállítás sem örök, de a megszüntetése egyszerű személyi okból, váratlanul következett be. A Tihanyi Múzeumban Uzsoki Andrást *Praznovszky Mihály* váltotta. Az új igazgató az irodalomtörténet szerelmese, az Eötvös-családból inkább *József* érdekelte, mint Loránd. Új múzeumi

koncepcióval érkezett, amelynek bemutatásához a „különlegesen értékes” első emeleti szobákat ki kellett ürítenünk. Ekkor az Eötvös-kiállítás – bizonytalan hosszúságú átmeneti időre – a „Balatoni-házba” költözött. Visszanézve, az a költözés Uzsoki András távolléből vívott utóvédharca volt a kiállítás fennmaradásáért.

Közjáték: az ötödik erő, mint „felhajtó erő”

Az ELGI előtt két lehetőség állt: belárázni és valahol tárolni a kiállított anyagot, vagy kiállítást szervezni saját területen. A választás az utóbbira esett, aminek számos összetevője volt, egyik éppen az „ötödik erő”.

1988-ban jelent meg *Ephraim Fischbach* hipotézise az *ötödik erőről*, amely szerint a négy ismert kölcsönhatás (a nagy távolságokra ható gravitáció, elektromágneses, az igen kis távolságokra ható erős és gyenge nukleáris) mellett létezik egy „közbeneső távolságokban ható ötödik erő”. A spekuláció egyik kísérleti alátámasztása éppen Eötvös Loránd és munkatársai-



2. kép. Kiállítási meghívók.

nak azon mérései lehetnek volna, amelyekkel – hetven évvel korábban – a gravitációs kölcsönhatás anyagfajtatól való függetlenségét bizonyították.

Fischbach néhány évig Eötvös méréseire irányította a gravitációval foglalkozó fizikusok figyelmét az USA-tól, Európán át, Indiáig. Eljött Budapestre, hogy megnézze az eredeti helyszíneket (ELTE) és eszközöket (ELGI) – őszintén meglepődött a föléje magasodó II. számú kettős inga látványától: „Ez ilyen nagy?!”

3. kép. Középen Müller Pál egy mongóliai expedíción (Az *ELGI Története* II. kötetéből).



Az ELGI állandó kiállítása

Müller Pál (3. kép), az ELGI igazgatója (1965–1990) döntött a valóban állandónak szánt, saját Eötvös-kiállításról. Az igazgató ügyelt az észszerű gazdálkodásra, de nem garaszkodott. Ezzel együtt, váratlan volt a szóbeli utasítása, hogy: „Most kell mindent előszedni, összeszedni, rendbe tenni!” Mert a „rendbe tenni” kategóriába olyan drága tétel is belefért, mint Eötvös József nagyméretű követválasztási zászlajának (4. kép) restaurálása. (Amikor a rúdja tekert zászlót kigöngyöltük, kiderült, hogy a finom selyem nagy foltokon négyzetmilliméteres darabokra töredezett. *Lepkeszárny himpórárt könnyebben visszavarrtam volna!* – mondta a restaurátor hölgy egy évnyi munka után.)

A kiállítás szakmai koncepciója az Eötvös-ingák fejlődésének bemutatása; emiatt jött a „mindent összeszedni” utasítás. Valóban össze kellett szedni, ugyanis, az állandó helyhiánnyal küszködő ELGI szívesen adott kölcsön ingákat, amelyeket sok évnyi tárolás után a sajátjuknak éreztek. „Emberemlékezet óta a miénk” – érveltek a Miskolci Nehézipari Egyetem Geofizikai Tanszékén, amikor visszakértük az 1902-es



4. kép. A zászló egyik oldala. A másikon szokatlan kép van: Kossuth-címer és felette a királyi korona. Pontosan kifejezi Eötvös József felfogását (Vámos Judit felvétele).

ingát. De nálunk volt *Pekár Dezső* leltára: *Kölcsönadva Tárczy tanárnak Sopronba*. Eötvös ingáinak első nemzedéke ma valójában szimbólum, demonstrációra sem alkalmasak, mert belül üresek (5. kép). Nem volt bennük arretáló szerkezet, minden elmozdítás előtt ki kellett szerelni a szálat.

Akkor úgy gondoltam, hogy Müller igazgatóra Fischbach látogatása volt nagy hatással. Két évvel később, 1990-ben értem meg a mélyebb okot, amikor bejelentette, hogy súlyos betegsége miatt idő előtti nyugdíjazását kérte. Korábban nem beszélt a betegségéről, és úgy akart elmenni az ELGI-ből, hogy az Eötvös-hagyatékot védett és rendezett állapotban adja át az utókoroknak.

Örömmel tehetem hozzá: az idő mindkét döntését igazolta. Müller Pál, 22 évvel később, a volt kollégák körében ünnepelhette 80. születésnapját; a gyógykezelés és nyugdíjas lét használt. Az 1992-ben Tihanyban megnyitott kiállítás anyagát pedig olyan állapotba hoztuk, hogy amikor 1998-ban áttelepítették Budapestre, ott szinte azonnal be lehetett tenni a tárgyakat az új helyükre; régiből az új tárlóba (6. kép).

Az 1992-es tihanyi és 1998-as pesti kiállítás előkészítésének kulcsemberről, *Holló Ferenc* műszerészről hosszabban illik megemlékezni. E sorok írásakor 79 éves. Csendesen dolgozott gépein, és

egyetlen dolgot várt el: *miután a munkát megkapta, műhelyébe senki be ne tegye a lábát!* Rendkívül sokoldalú szakember, aki fémmel, rugalmas és kemény műgyantákkal, fával egyformán ügyesen bánt, századmilliméterig pontos. Egyáltalán nem túlzás azt mondani, hogy miképp *Süss Nándor* munkája tette lehetővé Eötvös Lorándnak a különleges eszközök elkészítését, úgy *Holló Ferenc* munkája tette lehetővé az eredeti eszközök esztétikus felújítását, bemutathatóvá tételét. Legyártotta az elveszett részeket (libellát, leolvasó skálát), csillogóvá varázsolta, újralakozta a sárgaréz felületeket. Majd a Balatoni-ingáról és az első (1902-es) kettős nagy ingáról a „megszólalásig hasonló” másolatot készített.

Az ELGI-ben végzett munkája mellett régi órák működőképessé tétele volt a hobbija. Ennek eredményeképp kiterjedt kapcsolati hálója volt régiségkereskedők között. Hosszan nézegette azt a diát, amely Eötvös tanári szobájáról maradt ránk. Kapcsolatait használva – hogy a kiállítás minél

több korhű részletet tartalmazzon – ugyanolyan függőlámpát, háromlábú vadászszéket szerzett be, mint ami a képen látható.

A bányamérnök, aki restaurátor szeretett volna lenni

A Tatabányai Szénbányáktól hívtak a tihanyi obszervatóriumban, jól ismertem a bányák föld alatti világát. Amikor benyitottam a szobába, ahol az Eötvös-hagyaték többségét tárolták, megütötte az orrom a vizes

5. kép. A kiállításon elkészítésük sorrendjében állítottuk fel az eszközöket. Balról jobbra a Balatoni-inga, graviméter, a II. számú kettős nagy inga (saját felvételem).



tárnák penészszaga. Könnyű volt kideríteni, hogy a szoba minden nagy esőben beázik, az utazóláda (amiben a „régipapírok” voltak) és a könyvespolc fölött. (Nem kizárt, hogy a beázásoktól sérült meg a korábban említett zászló.) Az obszervatóriumnak nagy, eredetileg könyvtárnak szánt szobájába teregettem ki a nedves iratokat. A megszáradt iratokat nézegettem, amikor betoppant négy bányamérnök, korábbi kollégák, akik balatoni kiránduláson jártak. „Jöttünk megnézni, milyen, amikor becsületes bányászból obszervatóriumi szélhámos lesz!” – viccelődtek. (Akkor dolgoztak bányászatban, tudják, hogy ilyen szöveg nem mindig humor!) Egyikük német, a „régipapíroktól” szinte transzba esett. Bányamérnök-dinasztia ötödik nemzedéke, „akinek az élete csilléje születéskor sínre állt”. Viszont ő mindig papírrestaurátor szeretett volna lenni, rendszeresen járt restaurátor-tanfolyamokra. „Ilyen szentségeket még soha nem vehettem a kezembe!” – mondta. (Éppen a *Splényi László* tábornoknak kiállított adománylevelet fogta, amelyet *Savoyai Jenő saját kezével írt alá*.)

Újít megszakítva egy teljes napig maradt Tihanyban. Minden megszáradt iratot lemért, azután Balatonfüredre, az üvegeshez mentünk, üveglapokat vágtunk. Az iratokat az üveglapok közé téve, ragasztószalaggal körbezártuk, végül sötét vasszekrénybe tettük. Csak ezután ment el. Egy német mérnök, akinek a fejében a határidőnaplójával kombinált svájci óra ketyeg, felrúgta tervezett menetrendjét! Inkább „kelet-európai papírfecniket” mentett! Ekkor kezdtem el sejteni, hogy akaratlanul – mint a tihanyi obszervatórium vezetője – minek lettem a kurátora.

A felvágatlan könyv története

Ismert értelmiségi mondás: „Mutasd meg a könyvtáradat, és megmondom, ki vagy!” Tudtam, hogy Eötvös Loránd könyvtárának apró töredéke porosodott a tihanyi polcon, de valamit az a kevés is elárul róla. Apránként átlapoztam minden könyvét, változó figyelemmel. A legnagyobb meglepetést apja, Eötvös József *A XIX. század uralkodó eszméinek befolyása az államra* című könyve okozta. Mert olyan volt, ahogyan a nyomdából kijött, *nem volt felvágva!* Bármilyen hihetetlen, azt a példányt az Eötvös-családból senki sem olvasta. Bár Eötvös József 1854-ben írta, 1983-ban nem volt elérhető. Ha már a kezembe került, felvágtam és elolvastam több fejezetét. Azt a részt



6. kép. Az állandó kiállítás részlete (Vámos Judit felvétele).

is, amelyben a kommunizmusról szőtt 19. századi elképzeléseket elemezte. Rögtön érthetővé vált, hogy miért nem adták ki 1945 és 1990 között.

Az elveszett ingák tarka legendája és a poros valóság

Ahhoz, hogy értssem, mi történt, nem volt elég átfutni Eötvös 1896-os publikációját (*Vizsgálatok a gravitatio és mágnesség köréből*), hanem többször keresztül kellett rágnom magam rajta, és lassan megemészteni. Eközben vetődött fel a kérdés: hova lett az első Eötvös-inga, az őspéldány? Későbbi hasonló kérdés, hová lett a III. számú kettős nagy inga? *Szilárd József, Jóska bácsi*, aki 1930-ban került Pekár Dezső mellé, képviselte a szóhagyomány folytonosságát, emlékező-képessége nyolcvan évesen is pontos volt. Ő a két inga eltűnésére hasonló magyarázatot adott: az ősingát Eötvös szétszerelte és főbb darabjait beépítette az első (Balatoni) ingába; a II. és III. számú kettős nagy inga pedig annyira megsérült a II. világháborúban, hogy utána a kettőből egyet készítettek. Az első tévhitet könnyű lett volna megcáfolni: az ősinga és a Balatoni-inga méretei annyira különböztek, hogy egyet-



7. kép. Az ősinga felújítás előtt (Vámos Judit felvétele).

len csereszabatos alkatrészüket sem volt – de illetlenség lett volna Jóska bácsinak felvetnem. A nagy ingákra vonatkozó állítás annyiban tűnt kétségesnek, hogy a sérült daraboknak valahol meg kellene lenniük, de nincsenek!

Sokáig kerestük, mégis mindkét inga véletlenül került elő. A tihanyi obszervatórium raktárában a Dexion-polcok alatt volt egy hosszúkás papírdoboz, amiben az új kerti szerszámokat tárolták. Talán hólapát kellett, előráncigáltam a dobozt – és amit a lapátok alatt láttam, az felért egy kísértet megpillantásával: *az ősinga fedőlemezt!* Következett a sárgaréz alkatrészek kiguberálása, majd a 3D puzzlejáték: az inga összerakása úgy, hogy melyik csavarmentet melyikkel illik össze (7. kép). Majdnem minden alkatrész előkerült, Holló Ferenc készítette el a hiányzókat 1993 körül, és később az eredetihez hasonló fa tartót is.

A III. számú kettős nagy inga előkerülését geofizikusok kávézás közben anekdotázásaként hallottam, nem kezeskedhetek sem a történet teljességért, sem a részletekért. Adott egy állami intézmény, annak több autója, több garázs. Egyik garázs hátuljában nagy fadobozok porosodtak egymásra tornyozva. Idős munkatársak nyugdíjba mentek, fiatalok jöttek, autók cserélődtek, a ládák senkit sem érdekeltek. A feledés guanója és a por együtt vastagodott. Egyszer az újonnan vásárolt autó nem fért be a régi helyére; a dobozhalmot el kellett bontani. Tudományos munkatársak vonszolták a poros ládákat, és kíváncsian kinyitották: vajon mitől olyan nehezek? Valaki az egyikben *felismerte egy sárgarézből készített kettős nagy inga közeplő részét, rajta a felirat: III. ESZKÖZ*. Rossz rá gondolni, mi lehetett volna, ha az intézménynek van annyi pénze, hogy külsős vállalkozóra bízva a garázs lomtalanítását.

VÉLEMÉNYEK

A FIZIKAOKTATÁS KÁLVÁRIÁJA A RENDSZERVÁLTÁS ÓTA

A humán lobby győztes diktatúrája a természettudományos tantárgyak felett a 21. század technikai meghatározottsága idején

Radnóti Katalin
ELTE

Írásomban a következő kérdésekre keresem a választ: Mi történt a fizikatanárokkal? Miért nem megfelelő az utánpótlás? Milyen tényezők okozhatták a fizika, mint iskolai tantárgy visszaszorulását? Ennek milyen hatása lehet hazánk jövőjére? Milyen rossz döntés(ek) következménye lehet a jelenlegi helyzet?

Miért kell/célszerű fizikát tanulni/tanítani?

A kérdésre adható rövid válasz néhány mondatban a következőképpen foglalható össze.

– A fizika az emberiség történetének része, kultúránk.

– A fizika a mai technikai világunk alapja, nem mondhatunk le róla, ezért a fizikához értő emberekre van szükségünk.

– A jövő szakembereinek kineveléséhez a gyerekekben fel kell keltenünk a fizika iránti érdeklődést.

– Fontos, hogy mindenki olyan tudást szerezzen, amellyel el tud igazodni technikai világunkban.

A fentieknél azért bővebb válasz is adható. A fizikaórán ténylegesen nem csak fizikát tanítunk, ha-

nem általános természettudományos szemléletet, racionális gondolkodásmódot kívánunk elsajátíttatni a diákokkal.

A természettudományos tantárgyak tanulása/tanítása során gyerekeinkben ki kell alakítani azt az attitűdöt, gondolkodásmódot, hogy a *természet megismerhető, vannak természeti törvények*, a Világegyetem nem véletlenszerűen, összeviszva működik. A világot önmagából és önmagával magyarázzuk. A természet-

Köszönöm *Adorjárné Farkas Magdolna* tanulmány elkészítéséhez nyújtott hasznos tanácsait és észrevételeit.



Radnóti Katalin az ELTE TTK-n végzett kémia–fizika szakos tanárként. Több éves középiskolai tanári munkája mellett egyetemi doktorátust szerzett fizikából, majd az ELTE Tanárképző Főiskola oktatójaként a neveléstudomány kandidátusa lett a fizika tanítása témaköréből. Jelenlegi munkahelye az ELTE TTK Fizikai Intézet, főiskolai tanár. Több mint 200 publikációja van, tanári segédletek, tanulmányok, könyvek, könyvfejezetek. Kutatási területe a fizika és a természettudományok tanításának módszertana.

ben előforduló jelenségek törvényekkel leírhatók, amelyhez – amikor csak lehet – a *matematika jelrendszerét alkalmazzuk* (Ohm-törvény, Newton törvényei, mozgásegyenletek, Maxwell-egyenletek, gázok állapotegyenlete, a termodinamika főtételei...).

Különböző *fogalmakat konstruálunk*, amelyekkel jellemezni tudjuk az adott dolgot, jelenséget (út, idő, sebesség, gyorsulás, lendület, erő, energia, nyomás, hő, térerősség(ek), áramerősség, potenciál, feszültség...). Ezek minél nagyobb részéhez – az összehasonlíthatóság követelménye miatt – *számértékeket* is rendelünk.

A fizika tanulásának fontos feladata, hogy a megismerés során a diákokban alakuljon ki *a világot mérések során ismerjük meg* szemlélete. A fizika mennyiségi viszonyokat leíró törvényeinek felhasználásával, matematikai eszközök alkalmazásával *számszerű előrejelzések* tehetők, amelyek *összehasonlíthatók a tapasztalattal*. Ez ad lehetőséget a technikai tervezéshez, például űrhajók pályájának kiszámításához, épületek, gépek tervezéséhez, mai modern eszközeink megalkotásához, amelyek nélkül mai életünket el sem tudnánk képzelni. A diákoknak feladott számításon fizikai feladatok megoldása éppen ezt az aspektust hivatott bemutatni.

A természettudomány feladata elsősorban a világ *működésének* leírása, a „hogyan működik?” kérdésre adandó válaszok keresése. A fizika fejlődése során a tudományát művelők egyre alapvetőbb és átfogóbb törvényeket fedeztek fel és belőlük kiindulva, segítségükkel – gyakran *hosszú logikai lánc* felhasználásával – egyre több jelenséget magyarázhatnak meg. Tehát a fizika a „miért, mi az oka?” kérdésekre is választ keres. Azonban olyan alapvető kérdésekre, mint például „miért éppen négy alapvető kölcsönhatás létezik, és azok miért éppen olyan törvények alapján működnek?” esetleg „miért éppen akkora az elektron töltése, tömege... stb.?”, vagy például „mi az élet értelme?” nem tud és nem is akar választ adni, hiszen ezt nem kutatja, nem célja.

Világunk *megismerésének vannak módszerei*, szabályai, amelyek minden esetben sajátos mintázatot mutatnak.

A fizika lényeges eleme – amely az oktatásában is meg kell jelenjen – az *tapasztalat és elmélet összhangja*: a dolgok lehetséges működéséről, a megfigyelt jelenségek létrejöttének okáról hipotéziseket alkotunk, és ezek beválását megfigyelésekkel és kísérletekkel képesek vagyunk ellenőrizni, alátámasztani vagy éppen elvetni.

A természet leírásához, megismeréséhez *egyszerűsítő feltételeket* vezetünk be, analógiákat és modelleket használunk (anyagi pont, merev test, súrlódásmentes lejtő, matematikai inga, pontszerű töltés, szabadesés vákuumban, ideális gáz, különböző atommodellek...), a sokaság leírásához statisztikai, valószínűségi módszereket alkalmazunk stb. A modelleket egyre finomítjuk, több jelenséggel hozunk egymással kapcsolatba, így a jelenségek egyre szélesebb spektrumát tudjuk megmagyarázni.

Hatalmas adatbázisok kezelési lehetőségei nyíltak meg, a *szimulációk* a modellalkotásban és annak tesztelésében nyújtanak lehetőséget. Ezzel egyben *kitágult a vizsgálható jelenségek köre* is!

A természettudomány a *technikai világunk* alapja. Az emberiség problémáit – energiaszükséglet, környezeti krízis, betegségek, járványok megakadályozása – csakis természettudományos eszközökkel lehet enyhíteni.

Az Internet megteremtette a *gyors tudásmegosztás* lehetőségét is.

A természettudomány azonban elveti a parajelenségeket, amelyek nem reprodukálhatók, előrejelzéseit lehetetlen empirikusan vizsgálni!

A fizikaoktatás rövid története, az óraszámok alakulása az utóbbi négy évtizedben

Az ókorban *Arisztotelész* iskolájában fizikával is foglalkoztak Athénban az Akadémon nevű ligetben. Innen származik az akadémia kifejezés. Majd a *Nagy Sándor* alapította egyiptomi Alexandriában létrehozott könyvtár működött iskolaszerűen, ahova többek között *Arkhimédész* is járt. Sok fizikai tartalmú műve maradt ránk az úszó testekről, az emelőkről, optikáról. Az ókori tudomány eredményei elfelejtődtek, majd arab közvetítéssel kerültek ismét Európába. Arab mintára alakultak meg az egyetemek. Az önálló fizikatanítás azonban csak a 17. század végét követően terjedt el. Hazánkban ez *Comenius* (1592–1670) nevéhez köthető, aki az oktatásban fontosnak tartotta a szemléltetést. Az első hazai fizikatankönyvet *Pósbázi János* (1628(32)–1686), a Sárospataki Kollégium filozófiaprofesszora írta.

Hazánkban a fizika önálló tantárggyá a latin nyelvű gimnáziumokban *Mária Terézia* uralkodása alatt vált. A magyar közoktatást az 1777-ben kiadott *Ratio Educationis* szabályozta. Ekkor a hároméves gimnázium 1. évfolyamán heti egy, a 2. évfolyamon heti öt fizikaóra volt. A 2000-ig tartó fizikatanítás története részletesen *Poór István* tanulmányában olvasható [1]. A fizikatanítás szempontjából kiemelendő, hogy a 20. század elejétől a második világháborúig hazánk gimnáziumainak jelentős része reálgimnázium volt, amelyekben a matematika és a természettudományok oktatása kiemelt szerepet kapott. A tantervek kialakításában kiváló tudóstanárok – például *Mikola Sándor*, *Rácz László* – működtek közre, ebben az időszakban jártak iskolába az emigrálni kényszerült, világhírűvé vált, a 20. századot alapvetően formáló tudósaink is, mint *Kármán Tódor*, *Teller Ede*, *Wigner Jenő*, *Neumann János*, *Szilárd Leó* és a sort hosszan folytathatnánk.

Az *1. táblázat* és a hozzá tartozó *1. ábra* több, mint fél évszázad távlatából, 1965-től napjainkig mutatja be a fizikaórák számának alakulását.

Világosan látható, hogy a rendszerváltást követően folyamatosan csökkentek a fizika tanítására fordított óraszámok. Napjainkra ez szélsőséges eset-

1. táblázat

A fizikaórák heti számának alakulása

tanterv-bevezetés éve	évfolyam / heti óraszám							összes heti óraszám	1965. évi órák %-a
	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.	XI.	XII.		
1965	2	2	2	0	2	3	4	15	100
1978	2	2	2	2	2	3	2	15	100
1995 (NAT)	1,5	2	1,5	2	2	2	?	11	73
2000	0	2	1,5	1,5	3	2		10	67
2008	0	1,5	1,5	1,5	2	2		8,5	57
2020	0	1	2	2	3			8	53
2020*	0	0	0	2	3			5	33

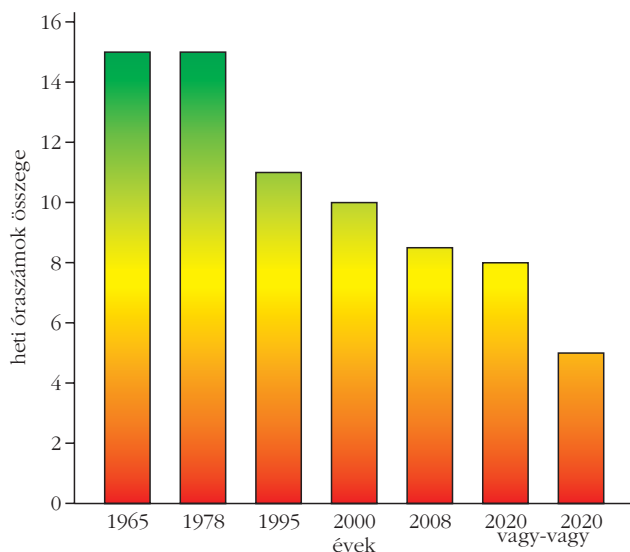
* A 7–8. évfolyamon integrált természettudományt tanuló diák esetében.

ben akár a harmada is lehet az 1965. évének, hiszen a 7–8. évfolyamon integrált természettudományt tanuló diák csak a 9. évfolyamon találkozik önálló fizikaoktatással, amely ráadásul a 10. évfolyamon befejeződik, leírni is szörnyű: a 21. században, a természettudomány és technika soha nem látott, életünk mindennapjait meghatározó korában összesen két évig tanulja a fizikát! (Szerencsésebb gyerekeknek 7–8. osztályban fizika szakos tanár tanítja a természettudományt).

Mi okozhatta a fizika óraszámok drasztikus csökkenését?

„A magyar közoktatás egyik legnagyobb problémája a *humán deficit*.” Olvasható *Báthory Zoltán* 1997-ben megjelent [2] könyvének 263. oldalán. Ezt az állítását a szerző széleskörűen hangoztatta azokban az években, amely alapvetően befolyásolta a közoktatás alakulását. A viszonylag sok természettudományos oktatást a kelet-európai szocialista országok jellegzetességeként állították be, amelyet a humán tantárgyak fejlesztése érdekében csökkenteni kell. Persze –

1. ábra. A fizikaórák számának csökkenése az elmúlt fél évszázadban.



hangsúlyozta – a természettudományos oktatás magas színvonalának megőrzése mellett. Senki sem gondolhatja komolyan, hogy ez lehetséges!

Az óraszámcsökkentéseket szinte sohasem követte vele arányos tananyagcsökkenés, ami állandó *időhiányt* okoz a tantárgy oktatásakor. Érdeemes Báthory Zoltán közoktatási helyettes államtitkár 1996-os *Fizikai Szemle* hasábjain megjelent írásából idézni:

„Olyan vélemények is hallhatók, hogy a természettudományos kultúra viszonylag

magas szintje is magyarázza a kreatív design és a sakk terén mutatkozó magyar sikereket (*Rubik Ernő*, *Polgár lányok*). *Marx György* egyenesen azt tételezi fel, hogy az elmúlt negyven évben igen sok tehetséges fiatalember azért választotta a természettudományokat, hogy elkerülje az agyonideologizált humán szférát. Így a hazai science tehetségállománya robbanásszerűen felduzzadt.

Mindent egybevetve úgy tűnik tehát, hogy a magyar oktatásügy »húzó« ágazata a természettudományos és a matematikatanítás. Amikor az ezer esztendő évfordulót ünnepeljük, ezeket a hagyományainkat és eredményeinket sem szabad elfelejtenünk.”

A 60-as, 70-es években világszerte nagy fejlődésen ment keresztül a vegyipar, például a műanyaggyártás, műtrágyagyártás, gyógyszeripar. A KGST országai közötti munkamegosztás alapján Magyarország számára ez komoly gyártás- és kutatásbővítést hozott. A kémiahoz kapcsolódó ipar fejlődése a fizika fontosságát is kiemelte. A Paksi Atomerőmű felépítését 1966-ban határozták el, ezzel a jelentős ipari programmal a fizikához és a technikához kapcsolódó témák nagyobb hangsúlyt kaptak a tömegkommunikációban, majd az oktatásban. Az űrkutatásban is hatalmas eredmények születtek abban az időben (*Jurij Gagarin* 1961-ben került meg űrhajóval a Földre, és alig nyolc évvel később, 1969-ben *Neil Armstrong* személyében először lépett ember a Holdra.) Az 1965-ös és az 1978-as tantervek (akkori NAT) ennek megfelelően, ezt követve írtak elő a mostanihoz képest jelentős fizikaóraszámot.

A 60-as, 70-es években az emberek fontosnak tartották a természettudományokat, ezért az egyetemeken – a tanárképzést is beleértve – népszerű volt a kémia és a fizika szak, aminek hatása a közoktatásban is érezhető volt, hiszen azokban az években csak kimagasló tanulmányi eredménnyel lehetett bekerülni e szakokra. Akkor a fizikatanárok – régen pályán lévők és a pályakezdők – a kollégák, a szülők és a tanulók részéről a mostanival össze sem hasonlítható megbecsülésben részesültek, hiszen nehéz és fontos tantárgyat, aránylag magas óraszámokban tanítottak.

Mi lehet a probléma a fizika tanításával? Attitűdvizsgálatok

Báthory Zoltán már a nyolcvanas évek végén rámutatott a fizika tantárgy kedvezőtlen tanulói megítélésére [4]. Saját élményeim már a nyolcvanas évek elején, amikor tanítani kezdtem, is hasonlóak voltak. Több diákom kérdezte meg tőlem, hogy miként tudtam ilyen szakokat választani magamnak, mint fizika és kémia? De akkor még nem végeztek attitűdvizsgálatokat. Egyszerűen arra gondoltam, hogy mivel több nyelvtagozatos osztály volt az iskolában, ahol akkor tanítottam, egyszerűen ezért sokkal többen érdeklődnek a humán tantárgyak iránt, amelyre rendszeresen hivatkoztak a diákok.

A fenti, egyedinek gondolt tapasztalatok azonban számszerűsítést nyertek *Csapó Benő* és munkatársai által 1995-ben végzett széleskörű felmérés eredményeivel. Vizsgálatukban tudásszintmérő tesztekkel mérték fel a tanulók tudását, de a tantárgyakkal kapcsolatos tanulói attitűdökre is rákérdeztek. A tanulók 1–5-ig osztályozták a tantárgyak kedveltségét. A kapott eredményeket a 2. táblázat tartalmazza az [5] 50. oldala alapján.

Idézzük fel, hogyan interpretálták Csapó és munkatársai az eredményeket (51. oldal):

„Mi lesz a fizikával és a kémiával, kik és hogyan fogják búsz év múlva tanítani, ha a gyerekek tizenhárom évesen tanulják meg utálni, és a középiskola végére negatív érzelmeik csak fokozódnak? A fizika helyzete különösen aggasztó: már hetedikben is a legnépszerűtlenebb tárgy, de a középiskola végére 2,64-es népszerűségi átlagával még a többi népszerűtlentől is leszakadva áll a lista végén.”

És most itt vagyunk több, mint 20 évvel később! Valószínűleg az óraszámcsökkentés is okozója a népszerűségvesztésnek, bár erre nem történtek vizsgálatok. Alacsony óraszámban sokkal kevesebb lehetőség van kísérletezésre, az érdekes jelenségek magyarázatára, az új kutatási eredmények megbeszélésére, és a belőle fakadó legnagyobb probléma, hogy a tanulók ennyire kevés idő alatt képtelenek olyan mély tudáshoz jutni, ami alapján valóban megérthetnék – és nem csupán elfogadnák, bebifláznák – a jelenségek magyarázatát. Elmarad az „aha” élmény, helyette a „nem értem” élménye jut a diáknak.

Később, az 52. oldal tetején a következő olvasható:

„A kirajzolódó tendenciák riasztó módon egybeesnek a természettudományi karok egyes szakjaira jelentkező hallgatók számának csökkenésével. Ugyanakkor fel kell hívjuk a figyelmet arra is, hogy *nem általában a természettudományok negatív megítéléséről, elutasításáról van szó*, hiszen a biológia mindkét életkorban a legnépszerűbb tantárgyak között van.”

A fentebb idézett tanulmánykötetet megdöbbenéssel olvastam annak idején, hiszen azért erre, a fizika tantárgy ilyen mértékű elutasítására nem gondoltam. Egyszerűen azt hittem, hogy én tanítottam olyan gimnáziumban, ahol jóval több volt a humán érdeklődésű

2. táblázat

A tantárgyakkal kapcsolatos attitűdök a 7. és a 11. osztályban, 1–5-ig skála			
7. osztály		11. osztály	
tantárgy	attitűd	tantárgy	attitűd
biológia	3,77	idegen nyelv	3,70
történelem	3,67	biológia	3,64
irodalom	3,61	történelem	3,62
idegen nyelv	3,54	irodalom	3,41
matematika	3,37	matematika	3,14
kémia	3,32	nyelvtan	2,92
nyelvtan	3,25	kémia	2,79
fizika	3,24	fizika	2,64

diák. Ezért próbáltam szerény eszközeimmel felhívni a természettudományos társadalom figyelmét e tényre, és két recenziót is írtam a könyvről a *Fizikai Szemle* (1998/12) és a *Természet Világa* (1999/1) számára, kiemelve a következőt: „Ez a tanulmány rámutat a fizikának még a természettudományos tantárgyakon belül is problematikus helyzetére.”

Néhány évvel később az Országos Közoktatási Intézet (OKI) létrehozta a Tantárgyi Obszerváció nevű kutatócsoportot, amelyben a fizika tantárgy képviselőjében magam is részt vettem. A munkálatok részeként 2002 májusában kérdőíves adatgyűjtést végeztünk. A kérdőívek két részből álltak: egy közös, minden tantárgy esetében azonosból és egy tantárgyspecifikusból. Ez utóbbiban csak az adott tantárgy esetében értelmezhető kérdéseket tettük fel. A felmérésben összesen 2185 pedagógus vett részt, köztük 152 fizikatanár az ország minden tájáról. Tanulmányunkban a fizikatanítás szempontjából legfontosabb eredményeket is bemutattuk. A felmérésben az általános iskola felső tagozatán folyó fizikaoktatás helyzetére voltunk kíváncsiak. Ebből idézzük a számunkra jelen pillanatban fontos részt [6].

Felmérésünkben a tanárkollégáktól arról is érdeklődtünk, hogy véleményük szerint miként ítélik meg a fizika tantárgyat a tantestület, a gyerekek és a szülők.

A kapott adatok szerint közepes mértékben tartják fontosnak a fizikát a szülők, a gyerekek és a tantestület. Az ötfokozatú skálán a 3. táblázat bal oldalán látható átlagok születtek, ami sajnos mindhárom cél-

3. táblázat

A fizika tantárgy megítélése és az összes tantárgy megítélésének átlaga, 1–5-ig skála		
fizika	ítélkezők	összes tantárgy
3,28	szülők	3,53
3,23	gyerekek	3,60
3,47	tantestület	3,74

csoportban alacsonyabb, mint az összes tantárgy átlaga (táblázat jobb oldala).

A tanárok nagyon nehezményezték az óraszámok csökkenését. Kérdőívünk utolsó részében megjegyzések írására is volt lehetőség, íme egy példa. „Nagyon etikátlan a heti óraszámokat a testületekre bízni, a természettudományokat rendre leszavazzák a humán és nyelvszakos kollégák, nekik is kenyérgkérdés az óraszám...”

A fizikatanár-képzés négy évtizedes történetéhez

Amikor majd 40 évvel ezelőtt elkezdtem fizikatanári pályámat, az általános iskola 6–7–8. évfolyamán, a gimnáziumokban pedig minden évfolyamon volt fizikaoktatás. Továbbá, az egyetemi felvételi pontszámába beszámították az év végi fizikaosztályzatokat. Ebben az időben körülbelül 100 matematika-fizika és körülbelül 20 kémia-fizika szakos tanár végzett az ELTE-n, és még ott voltak a vidéki egyetemek, főiskolák. Együttesen évente mintegy 200 fizikatanárt adtak az országnak. Az egyetemen matematikát csak fizikával lehetett párosítani, kémiát biológiával és áruismerettel, amely a Marx Károly Közgazdaságtudományi Egyetemen (mai nevén Corvinus) közös képzés volt. De jelen írás csak a fizikatanárokkal foglalkozik.

Már tanári pályám kezdetén nagyon érdekes tapasztalat ért. A matematika-fizika szakosok jelentős része – természetesen tisztelet a kivételeknek – csak kényszerből tanulta, majd később tanította a fizikát, alapvetően a matematikát szerették. Ezt onnan lehetett tudni, hogy a matematika-fizika szakos tanárok jó része – ha csak tehette – szinte csak matematikát tanított, fizikát legfeljebb a saját osztályában vállalt. Érdeemes lenne megkérdezni az iskolákban még megtalálható idősebb matematikatanárokat, hogy mi a másik szakjuk! Sokuknak fizika, amelyet évek óta nem tanítanak.

A nagyobb iskolákban a fizikát a kémia-fizika szakosok tanították. Bár itt is meg kell jegyezzem, hogy a kémia-fizika szakosok nem elhanyagolható része inkább a kémiát szereti-szerette. Többen úgy kerültek a tanárszakra, hogy bár vegyésznek jelentkeztek, de ide vették fel őket. Később sokan vegyészek lettek, szinte rögtön elhagyták a tanári pályát.

Tehát összefoglalóan megállapíthatjuk, hogy *a fizika régen sem tartozott a kedvelt tantárgyak közé, még a fizikaszakos tanárok körében sem.* A rendszerből adódóan, a kötött szakválasztási lehetőségek következtében mégis megfelelő létszámú fizikatanár volt az országban. Itt érhetjük tetten a mai katasztrófális helyzet kialakulásának egyik fontos momentumát. Ugyanis *a rendszerváltást követő liberális oktatáspolitiká következtében a tanárjelölt hallgatók szinte bármilyen szakpárt választhattak maguknak!* Így megszűnt az a megkötöttség, hogy a matematika mellé csak fizikát lehetett választani – ami automatikus fizikatanár-képzést jelentett –, és *ennek következményeként évtizedek óta nagyon kevesen választják a fizi-*

kát. Jelenleg a matematikaszakosok mintegy 20%-a választja másodikként a fizikát. Ugyanakkor igaz, hogy a fizika mellett néhány egyéb szakpárosítás – például biológia, történelem, sőt magyar nyelv és irodalom – is megjelenik, de teljesen elhanyagolható mértékben. A felsőoktatás képzési struktúrájának átalakítása és a közoktatás tantárgyi struktúrájának átalakulása mintegy felerősítette egymást. A kémia-fizika szak pedig néhány év alatt szinte kiürült.

2006-ban bevezették a bolognai rendszert, amely tovább rontott a helyzeten. Előtte szinte bedarálták a főiskolai karok egy részét, mondván, ne legyenek párhuzamos képzések. Ezzel gyakorlatilag megszűnt az általános iskolák tanári utánpótlását szolgáló tanárképzési hálózat. Csak a történet kedvéért: ez egyszer már megtörtént Budapesten. Az idősebb tanárok számára példaképként ma is jelenlévő *Óveges József* 1948-tól a Budapesti Pedagógiai Főiskola – annak 1955-ös megszűnéséig – Fizika Tanszéke tanszékvezető főiskolai tanárként oktatott. Később újra kellett alapítani a Főiskolát, először, mint az egri főiskola fővárosi tagintézményét, amelyet később az ELTE-hez csatoltak, végül pedig 2003-ban ismét megszűntették, a hallgatók és az oktatók átvételével a megfelelő karokra.

A 2006-ban indult fizika és matematika BSc-re ugyan sokan jelentkeztek, de közülük csak nagyon kevés lett végül tanár, mivel ez csak az egyik lehetséges szakirány volt. A közel 100-100 fős hallgatói létszámból sokan kibuktak. (Az első végzés évében az ELTE-n mindössze egyetlen fizika minor szakos tanár végzett.) A régi rendszerben közülük sokan matematika-fizika szakra mentek volna, mivel akkor csak 20 fő mehetett fizikusnak.

A fentiek miatt át kellett alakítani a fizikusképzést. Három évbe mintegy öt év tananyagát kellett besűrítetni, azaz a 3 év alatt minden olyan témakört érinteni kellett, amire korábban 5 év állt rendelkezésre. A sűrített, így kevésbé kifejtett részek mellett bizonyos tantárgyak kényszerből az idősebb évfolyamokon kaptak helyet. Ilyen például az elektrodinamika, amit annak idején a 2. évben – amikor már megvolt az elengedő matematikatudásunk – tanultam. A 3 éves BSc-képzés miatt azonban már az első év 2. félévében tanítják, némi matematikai alapozással együtt.

Már 2008-ban látható volt, hogy kevesen választanak természettudományi és műszaki pályát, illetve az ilyen jellegű felsőoktatási helyekre kevés jó tanulmányi eredménnyel rendelkező fiatal jelentkezik. A folyamat mérséklésére az Oktatási és Kulturális Minisztérium döntés-előkészítő, véleményező és javaslattevő országos szakértői testületeként működő Országos Köznevelési Tanács (OKNT) a közoktatásban és a felsőoktatásban tanító, a természettudományi nevelés helyzetéért aggódó tanárok, kutatók kifejezett kérésére – *Kertész János* és *Csermely Péter* professzorok vezetésével – ad hoc bizottságot hozott létre, amelynek feladata a helyzet feltárása és elemzése, majd javaslatok megfogalmazása volt. Ennek keretében a bizottság arra kérte a természettudományi tantárgya-

kat tanító kollégákat, hogy töltsenek ki egy kérdőívet, így a megállapításukat időszerű, konkrét adatokkal lehetett alátámasztani. Jelen írásban az adatgyűjtés eredményeiből idézek néhányat, elsősorban a fizika-tanárok válaszaival alátámasztva [7].

Az kérdőívet kitöltő 1033 tanár közül 185-en tanítottak biológiát, 490-en fizikát, 334-en kémiát, 12-en integrált természettudományt és 12-en környezettant. A fizika és a kémia tantárgyak esetében az országban tanítók közel 10%-a kitöltötte kérdőívünket.

Megkérdeztük a tanárok életkorát is, amelyből látható volt, hogy a tanártársadalom nagyon előregegett. Az 50 év feletti kollégák aránya (a megkérdezettek fele) kétszerese volt a 35 évnél fiatalabbakénál. Az általános iskolai tanárok esetében még szomorúbb a helyzet.

A BSc-re járó hallgatóknak csak az első év után kell szakot választaniuk. Az első három év adatai alapján már látható volt, hogy a fiatalok alig jelentkeznek tanári pályára. A helyzet már akkor is különösen aggasztó volt a fizika és a kémia tanári szak esetében, amelyeket fő szakként alig választottak a hallgatók, de minor szakként is nagyon kevesen. *Vagyis már akkor világosan látszott, hogy hazánkban néhány éven belül nagyon komoly tanárhiány várható a területen.* A javaslatok közt felmerült, hogy a tanárképzést ki kellene vonni a bolognai rendszer alól, vagyis visszaállítani a hazánkban korábban meglévő ötéves képzést.

A fent említett 2008-as vizsgálat és a tiltakozások nyomásának engedve végül a tanárképzést kivették a bolognai rendszerből. 2013-ban indult az első osztatlan tanárszakos évfolyam. De ez már késő volt. A 7 éves elmaradást nem lehetett bepótolni. Továbbá a korábbi létszámokat sem sikerült visszatornáznai. Ennek persze az is oka, hogy a matematikát bármilyen másik szakkal lehet párosítani.

Napjainkban a tanárszakos hallgatóknak nem egy esetben a megfelelő BSc-s egyetemistákkal együtt kell hallgatnia és vizsgáznia az alapozó tárgyakból, mintha az lenne a fő szakja. Holott két szakjuk van, plusz a pedagógiai stúdiumok. Átlagosan számítva 40-40% jut a szakmai részre, a pedagógiai stúdiumok aránya 20%. Nem kell magyarázni, ha kisebb időkeret áll rendelkezésre egy adott témakör megértésére, feldolgozására, esetünkben 40%, akkor azt nem lehet úgy tanítani, mintha az 100% lenne, amelyen a BSc-s hallgatók számára előírt tananyag mennyiséget érttem. A 40%-hoz egészen *más megközelítés* szükséges. Azt nem lehet megtenni, hogy például csak minden 2. tételről tanul a tanárszakos hallgató, vagy a tananyag második része marad el. És *nem azért, mert a tanárszakos hallgatók gyengébb képességűek!* Hanem azért, mert a tanárszakos hallgató tanulmányi idejének csupán 40%-a áll rendelkezésére az adott szakanyag tanulmányozására, továbbá tanulási célja is más, tanár lesznek, nem kutató. Iskolai tantestületben fognak dolgozni, ahol gyerekek nevelésével, oktatásával foglalkoznak, ami nagyon eltér a kutatói pályától.

Oktatásuk során általában erre nincsenek tekintettel – tisztelet a kivételnek –, ezért a tanárszakos hallgató képzése ritkán fér bele az államilag finanszírozott időkeretbe. Nem csoda, ha ezt kevés fiatal tudja teljesíteni. Holott *napjaink technikai világában óriási szükség lenne több mérnökre, fizikusra, informatikusra, akiknek az alapozást a közoktatás éveiben, megfelelően képzett tanároktól kell megkapniuk.*

A fizikaszakos hallgatók előszeretettel választják az 5+1-es képzést, mondván, hogy középiskolában szeretnének tanítani. Általános iskolába kevesen akarnak menni. Azonban néhány 4+1-es hallgató is van. A problémát az jelenti, hogy számukra is nagyon kemény fizikát tanítanak, figyelembe nem véve majdani szükségletet, így a fizika tárgyakból sokan elvéreznek, és végül kibuknak, megfosztva magukat a végzettségtől. És emellett sok diák is elesett attól a lehetőségétől, hogy ugyan kevesebb, de az általános iskolai tanításhoz azért elegendő fizikatudással rendelkező tanárok oktathassák őket. Épp e cikk írása közben jelent meg az a rendelet, hogy a tanárképzés egységesen 10 féléves lesz. Kérdés, hogy ez a képzési forma majd melyik korosztály tanításához ad megfelelő alapozást?

A fent leírt folyamatok következménye az lesz, hogy az általános iskolákban kénytelenek lesznek bevezetni a sokak, elsősorban a „szakma” tiltakozását kiváltó integrált természettudományos tantárgyat, amelyet majd földrajz-, esetleg biológiaszakos kollégák tanítanak, hiszen nem lesz más, aki bemenjen az órára! Mint a cikk elején írtuk, a biológia kifejezetten kedvelt tantárgy, sokan választják tanárszakként is. Földrajztanárként is viszonylag sokan végeznek. Tehát – a jelenlegi helyzet alapján – e tantárgyak oktatóiból lesz több az iskolákban.

A „szakma” majd bemegy megtartani akár egy budapesti belvárosi kerületbe is a hiányzó fizikatanár (kémia) helyett az órákat? Egyesek úton haladunk a felé, hogy a fizikát, mint önálló tantárgyat csak 9–10. évfolyamokon fognak tanítani! És történik mindez a 21. században, amikor a technika elemei olyan módon vesznek körül mindnyájunkat, hogy azok nélkül szinte létezni sem tudnánk, illetve csak nagyon nehezen. Gyerekeink-unokáink már ebbe születnek, az információs és kommunikációs technológia (IKT) eszközei nélkül el sem tudják képzelni életüket. De ha így haladunk tovább, akkor fogalmuk sem lesz a napi szinten használt eszközeik működéséről, amely kiszolgáltatottá teszi majd a felnövekvő nemzedéket azon keveseknek, akik értenek hozzá. Így elsatnyul a hazai műszaki-technikai innováció és az is kérdéses lesz, hogy a külföldről behozott technikát ki tudja majd megérteni. Hát ide jutottunk!

Pedig Magyarország kormánya – nyilatkozatai alapján – az innovációt szeretné támogatni, hogy hazánk lakossága ne csak olcsó munkaerőként legyen piaci szereplő. Magas hozzáadott értékű termékeket kíván előállítani. De mindez hogyan lesz lehetséges – a kormányzati tervekkel, NAT-tal – elsorvasztott fizikaoktatás mellett?

Napjainkra már kialakult az évtizedekkel korábban jelzett sajátos helyzet. Az iskolákban óriási tanárhány van, különösen a reál- és a természettudományi területen. Az iskolák óraadókat várnak, vagy nem szakos tanár tanítja a fizikát, kémiát. A megoldás nem egyszerű, mivel kis óraszámú tantárgyokról van szó, egy kisebb iskolában szinte nem is jön ki egy teljes állású kolléga óraszámra. A fizikaórák megtartása mellett állandó helyettes, napközis lehet, esetleg ebédeltethet, vagy több iskolában tanít, és ki tudja milyen lehetőségük van, hogy meglegyen a teljes állás. Legyünk őszinték, ezek egyike sem szerepel a tanári vágyalmok között. És persze sok osztálya van, nem egyszer 30 fő feletti létszámokkal. Mindezek mellett a tantestületnek – diplomatikusan fogalmazva – nem a legmegbecsültebb tagja, hiszen a tantárgyai nem érettségi tárgyak, azaz nem fontosak. Egy tantestületi értekezleten hangzott el az egyik történelemszakos kolléga nem épp kedves, de sajnos találó megjegyzése, miszerint a fizika és a kémia tantárgyak „a futottak még” kategóriába tartoznak. A természettudományt tanító tanárok iskolai elismertségét az is csökkenti, hogy nem tudnak osztályfőnökséget vállalni, hiszen tantárgyukat sem az általános, sem középiskolában nem tanítják négy éven keresztül. Holott a diplomájáért nagyon meg kellett küzdeni. E helyzet miatt még kevesebb fiatal jelentkezik fizika és kémia tanári szakokra. A tanárhány mellett nem ritka a fizikatanárok elbocsátása sem, az óraszámok folyamatos csökkentése, sőt egyes iskolatípusokban a fizikaórák teljes megszüntetése okán. Tehát már az állás sem biztos, a tanár iskolaváltásra, vagy arra kényszerülhet, hogy párhuzamosan két vagy több iskolában tanítson. Mi lesz a folyamat vége? Teljesen elfogynak a kémia- és a fizikaszakos tanárok?

Hogyan tovább? A fizikaoktatás „humanizálása”

Az utóbbi évtizedben az IKT eszközök megjelentek az oktatásban és nem csak videók nézésére, ppt-k készítésére, hanem mérő- és adatmegjelenítő, -kiértékelő eszközként. A fizika érettségi szerkezete is alapjaiban megváltozott: már nem csak számításos feladatokat, hanem tesztek, esszéírást is tartalmaz. A fizikatanítás sokkal életközelibbé, gyakorlatiasabbá vált. A tananyagban és az érettségi feladatokban is megjelennek a legújabb felfedezések, mint például exobolygók, gravitációs hullámok, érzékeltetve a fizika fejlődését, változását. Hangsúlyosabb lett a fizika tanulása közbeni kompetenciafejlesztés, a tanulók gondolkodásfejlesztése.

A matematika és a fizika tananyag összehangolása sosem volt zökkenőmentes, sem a felsőoktatásban, sem a közoktatásban, de mindig érzékelhető volt az igyekezet, ráadásul a közoktatásban, ha egy tanár tanítja e két tárgyat, akkor könnyebb az összehangolás. Napjainkban, mint azt korábban bemutattuk, erre egyre kevesebb az esély. A két tantárgy tananyaga teljesen különvált, ez pedig a fizika számára tragédiával ér fel!

A fizika, mint tudomány és az azt leképező iskolai tantárgy számára fontos, hogy mérhető mennyiségekről beszél, törvényeit a matematika nyelvén fogalmazza meg. De a matematika sosem tart ott, amire a fizikának szüksége lenne. A matematika kizárólag az éppen aktuálisnak gondolt saját belső logikája szerint halad, mintha csak önmagában létező tantárgy lenne, nem véve tudomást eszköz jellegű tudásszerepéről.

Persze igaz, hogy az általános iskolában a fizika tantárgyat sem feltétlenül a mozgások leírásával – amely nem tárgyalható grafikonok és az egyenletrendezés tudása nélkül – kellene kezdeni. Először optikát tanulva kísérletezni lehetne és közben olyan szerkesztéseket végezhetnének, amelyhez már megvan a geometriai alapok. De azért sokáig nem húzható a matematika hiánya.

Óriási probléma, hogy a tantárgy óraszámja a rendszerváltás óta majdnem a felére zsugorodott, de a tananyag viszont nem csökkent. Nehéz lefaragni belőle, hiszen az emberiség történetének technika által leginkább átforgalmazott korában élünk (és látható, hogy a tendencia egyre erőteljesebbé válik). További probléma a fizikatanárok számának folyamatos csökkenése is, amely már a tantárgy létét fenyegeti.

A fizikát nem lehet úgy tanítani, mint régen. Akkor 7 év volt a fizika tanításának időtartama, most pedig 4, illetve lehet, hogy csak 2 év, ha a diák az általános iskolában nem külön tantárgyként tanulta.

A fizika tantárgy „humanizálása” lehet egyfajta alternatíva! Az emberiség nem úgy fejlődött, hogy mindenki magas fokú absztrakt, elvont gondolkodásra legyen képes. (Elvonatkoztatás, absztrakció természetesen van.) A pszichológusok szerint inkább a történetmesélés, a narratíva jellemzi az átlagembert. A történetekben lévő hiányokat, lukakat pedig az agy kiegészíti. Ezért is kevés a matematikát, fizikát, kémiát szerető diák. A levezetések, a hosszú logikai láncok nem egyszerű történetek, ezeket nem lehet önkényesen kiegészíteni. Itt szigorú, racionális és logikai szabályok, ok-okozati kapcsolatok vannak.

A magas szintű absztrakció, a tapasztalati összefüggések *bizonyításának igénye* először csak az ókori görögöknél merült fel. Ezt a gondolkodásmódot semmilyen korábbi kultúrában (márpedig számos kultúra alakult ki, amelyek sok tapasztalati ismeretet halmoztak fel, sőt mérnökeik alkalmazták például piramisok, templomok építésére, vagy hivatalnokaik a földterületek alapján az adók kivetéséhez szükséges számítások elvégzésére) nem találjuk meg. Ezt a gondolkodásmódot „örököltük” meg római, majd arab közvetítéssel, amely végül a polgárosodó Európában robbanásszerűen erőre kapott, és lehetővé tette a természettudományok kialakulását, majd napjainkra a hihetetlen és globálisan magas szintre jutását. Ez jelenti a technikai fejlődés alapját.

Idézzük *Pléh Csaba* gondolatait a [8] 88. oldaláról:

„A felidézést a séma irányítja, a sémák közül pedig a legkitüntetettebb az *elbeszélő séma*. Úgy tűnik, hogy *történeteket sokkal könnyebb felidézni*, mint például tájleírásokat.”

„Történeteket mindig könnyebb felidézni, mindig egyetemesebbek, mindig világosabb mintázatot adnak. Egy tankönyvi történet, amikor visszaadjuk, sokkal kevésbé válik zavarossá, mint egy leírás, vagy magyarázat.”

Pléh Csaba gondolatait kiterjesztve tovább folytathatjuk a példák sorát, hogy a levezetések, matematikai tételek, fizikai és kémiai ismeretrendszerek, amelyek leírásokból és szigorúan következetes jelrendszereket használva, sokszor matematikai formában megfogalmazott törvényekből, magyarázatokból állnak, sokkal nehezebbek, nehezebben tanulhatók, mint például egy elbeszélés, egy regény cselekményét, vagy emberek történeteit, emberi sorsokat megismerni, megtanulni.

Így persze kérdés, hogy egyáltalán miért vannak olyan emberek, akik az ilyen jellegű gondolásmódot szeretik? Hányan lehetnek, a népesség hányad részét teszik ki ők? Lehet, hogy ezek az emberek a megfelelő tulajdonságot jellemző Gauss-görbe egyik szélét képviselik?

További kérdés, ha a fent említett elvont gondolkodás ennyire nem tipikus, inkább ritka, akkor miért erőltetjük rá mindenkire? Lehet, hogy a természettudomány a tantervi változások során azért szorul egyre jobban háttérbe, mert az emberek jelentős részének a természettudományos leírások és magyarázatok nehezen érthetőek, gondolkodásától idegenek? Pedig a jelen technikai környezetünkben nem elhagyható a természettudomány és azon belül a fizika minimális szintű ismerete. Azért, hogy az elkövetkezendő évek, évtizedek múlva is élvezhessük a technika vívmányait, sok és egyre több embernek foglalkozásszerűen kell művelnie e területeket. De honnan tudjuk, hogy erre kik lesznek alkalmasak, kiknek sajátja, kiknek tetszik a szigorú tudományos gondolkodásmód? Erre csak egyetlen lehetőség van, tanítani kell az iskolában. Meg kell mutatni a diákoknak, hogy létezik a narratíván kívül másféle gondolkodásmód is, és akiknek ez tetszik, azok jelentkezni fognak szakkörökre, versenyekre, műszaki-természettudományos jellegű továbbtanulásra.

És ennek tudatában hogyan tanítsuk a fizikát? Egy lehetséges módszer lehet, ha mind a felfedezések, mind a mindennapi élet vonatkozásában emberi történetekbe ágyazzuk a fizikai és a kémiai ismereteket. Ezért fontos és jó, hogy egyedül a fizika tantárgy érettségi követelményei között szerepel hangsúlyosan a legnagyobb tudósok élete és munkássága!

A biológia azért lehet kedveltebb, sőt kifejezetten kedvelt tantárgy, mert jobban, közvetlenül kötődik az emberhez? Például: mit eszünk, növények, állatok, házi kedvencek, betegségek, gyógyítás stb.

Lehet javasolni, hogy a fizikatanulás kevésbé kvantitatív, inkább leíró jellegű legyen. Ugyanakkor legyen modern, mutassa be a legújabb tudományos eredményeket, akár webes ismeretterjesztő írások formájában. A kvantitatív leírások is inkább mérések legyenek, amelyeket például Excelben ábrázolnak a diákok, bemutatva az adatbázisok fontosságát, kihasználva azok kezelési lehetőségeit. Sokkal több leíró jellegű szöveg kell. A fizikai tartalmak történetekbe ágyazottak legyenek. Sőt, a számonkéréshez is alkalmazható a módszer. A számításhoz is lehet történeteket keresni vagy kreálni, például szabaduló-szobák feladatainak keretében, amelyhez kerettörténet is tartozik.

A fizika története a tananyag középpontjában lehet, a tudósok életrajzán keresztül, mint emberi történet, mennyire volt érdeklődő, szorgalmas az illető, milyen nehézségekkel kellett megküzdenie stb. A feldolgozás során be lehet mutatni a tudományos megismerési folyamatot, az akkori tudományos elképzeléseket, problémákat, kutatási kérdéseket, a vizsgálódás menetét stb. Fel lehet hívni a figyelmet, hogy napjainkban miért fontos az adott felfedezés. Feladatként a témával kapcsolatos kisebb *színdarabok*, *párbeszéd*ek írását lehetne adni, amelyeket akár el is játszhatnak. Például *Pierre* és *Marie Curie* párbeszéde a laboratóriumban, amikor elhatározzák, hogy uránszurokércet rendelnek stb. Ez a módszer különösen a humán érdeklődésű diákok számára hozhatja közelebb a fizikát. Minden módszert meg kell ragadni! Természetesen hagyományos feladatok is helyet kaphatnak, de differenciált jelleggel. Elsősorban azon diákok számára, akik érdeklődnek a kvantitatív leírások iránt, illetve a fakultáción.

Irodalom

1. Poór István: A fizikatanítás történetének áttekintése. In Radnóti, Nahalka, Poór, Wagner: *A fizikatanítás pedagógiája*. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest (2002).
2. Báthory Zoltán: *Tanulók, iskolák – különbségek*. Második, átdolgozott kiadás. OKKER Kiadó, Budapest (1997). <https://docplayer.hu/68361250-Bathory-zoltan-tanulok-iskolak-kulonbsegek.html>
3. Báthory Zoltán: Ezer esztendő a magyar iskola. *Fizikai Szemle* 46/5 (1996) 145. <http://fizikaiszemle.hu/old/archivum/fsz9605/batz9605.html>
4. Báthory Zoltán: Tanulói kötődések vizsgálata négy tanulói korosztály körében. *Pedagógiai Szemle* 39/12 (1989) 1162–1172.
5. Csapó Benő (szerk.): *Az iskolai tudás*. Osiris Kiadó, Budapest (1998).
6. Radnóti Katalin: A fizika tantárgy helyzete és fejlesztési feladatai egy vizsgálat tükrében. *Fizikai Szemle* 53/5 (2003) 170–176. <http://fizikaiszemle.hu/old/archivum/fsz0305/radnoti0305.html>
7. Radnóti Katalin: A természettudományi nevelés és a fizikaoktatás helyzete a 2008-as tanári felmérés tükrében. *Új Pedagógiai Szemle* (2009/3) 3–17. <https://ofi.oh.gov.hu/radnoti-katalin-termesztudomanyi-neveles-es-fizikaoktat-as-helyzete-2008-tanari-felmeres-tukreben>
8. Pléh Csaba: *A tanulás és gondolkodás keretei*. Typotex, Budapest (2015).

Szerkesztőség: 1092 Budapest, Ráday utca 18. földszint III., Eötvös Loránd Fizikai Társulat. Telefon/fax: (1) 201-8682

A Társulat Internet honlapja <http://www.elft.hu>, e-postacíme: elft@elft.hu

Kiadja az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, felelős kiadó Groma István főtítkár, felelős szerkesztő Lendvai János főszerkesztő.

Kéziratokat nem őrzünk meg és nem küldünk vissza. A szerzőknek tiszteletpéldányt küldünk.

Nyomdai előkészítés: Kármán Stúdió, nyomdai munkálatok: OOK-PRESS Kft., felelős vezető: Szathmáry Attila ügyvezető igazgató.

Terjeszti az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, előfizethető a Társulatnál vagy postautalványon a 10200830-32310274-00000000 számú egyszámlán.

Megjelenik havonta (nyáron duplaszámmal), egyes szám ára: 1000,- Ft (duplaszámmal 2000,- Ft) + postaköltség.

HU ISSN 0015–3257 (nyomtatott) és HU ISSN 1588–0540 (online)



BŰVÉSZTRÜKK LABDÁVAL

Bokor Nándor
BME Fizika Tanszék

A bűvésztükk

A tapadó és csúszó súrlódási erő közötti különbségek fontos részét képezik a klasszikusmechanika-tananyagban. Tárgyalásukat a következő, osztályteremben is elvégezhető bűvészmutatvánnyal színesíthetjük. Minden diák kap egy-egy 6-7 cm átmérőjű gumilabdát (mint amilyen az 1. képen látható), amellyel a vízszintes iskolapadon vagy asztalon kísérletezhet. Fontos, hogy a labdák és a padok felülete olyan legyen, hogy a labdák könnyen, csúszás nélkül tudjanak gördülni a padon, ugyanakkor a labdákat, ha mereven tartjuk őket, viszonylag könnyen el is lehetesen csúsztatni a pad felületén. Más szóval a felületek ne legyenek se túl csúszósak, se túl tapadósak.

A trükk első felében a diákokat megkérjük, helyezték a labdát maguk elé a padra. Elmagyarázzuk nekik a célt: azt kell elérniük, hogy az asztalon fekvő labda felülről nézve forogjon az óramutatóval ellentétes (ÓME) irányban. *Ehhez csak a labda tetejét érinthetik meg, és azt is csak egy ujjal. Ráadásul az ujjuknak mindvégig ugyanabba az irányba kell mutatnia* (tehát tilos például úgy végrehajtaniuk a feladatot, hogy a labdát felülről erőteljesen lenyomják, és aztán elfordítják az ujjukat). A megoldás: a labdát az ujjukkal le kell nyomni, majd viszonylag gyors, ÓME irányú „dörzsölő” mozdulatokat kell végezni. Amikor a labda „északi sarkát” kis körmozgásoknak vetjük alá, valóban el lehet érni, hogy az „egyenlítő” és ezzel együtt az egész labda ugyanolyan irányban lassan elforduljon, amint a 2. kép és a hozzá tartozó videó szemlélteti.

A trükk második felében megkérjük a diákokat, hogy ismételjék meg a kísérletet, de ezúttal egy (látványlag jelentéktelen) módosítással: a labda tetejére most két ujjukat helyezték egymás mellé, ahogy a 3. kép mutatja. Mielőtt azonban a kísérlet második felét végrehajtják, előjöhethetünk valami ködös magya-

Ez az írás a *Physics Education* folyóiratban megjelent [1] cikk magyar változata.



Bokor Nándor egyetemi docens a BME-n szerzett villamosmérnök-diplomát 1993-ban, majd ugyanott fizikából PhD fokozatot 1999-ben. Munkájában – az optika számos területén végzett kutatásai mellett – legszívesebben a fizika, azon belül kiemelten a relativitáselmélet oktatásának pedagógiai kérdéseivel foglalkozik. Ez utóbbi témában számos publikációja jelent meg a *Fizikai Szemlében*, valamint a *Physics Education* és a *European Journal of Physics* folyóiratokban.



1. kép. A labda felülnézetben. A nyíl mutatja, merre kell a labda tetejét apró körmozgásokkal „dörzsölni”.

2. kép. Ha a labda tetejét egy ujjal az óramutatóval ellentétes (ÓME) irányban körkörösén mozgatjuk, a labda is lassan elforog ÓME irányban (lásd a képhez tartozó videót, amely a fotóra kattintva indul). Ez a mozgás csak azért jöhet létre, mert a labda alja nem tisztán gördül, hanem megcsúszik a pad felületén.





3. kép. Ha a labda tetejét két ujjal az óramutatóval ellentétes (ÓME) irányban körkörösén mozgatjuk, a labda lassan elforog az óramutatóval megegyező (ÓMM) irányban (lásd a fotóra kattintva induló videót). A labda tisztán gördül a pad felületén.

rázattal arról, hogy ezúttal – pusztán a gondolat erejével! – próbáljuk majd őket megakadályozni a feladat végrehajtásában. Például telekinézissel megkíséreljük elérni, hogy a labda *az óramutatóval megegyező* (ÓMM) irányban forduljon el, tehát pontosan *ellentétesen* azzal, ami a diákok célja. A diákok ismét ÓME irányba mozgatják körkörösén a labda tetejét (csak most két ujjal), így próbálják a labda „egyenlítőjét” is ÓME irányban elforgatni. Meglepve tapasztalják azonban, hogy – annak ellenére, hogy a két ujjuk *pontosan ugyanazt a mozgást végzi* a labdán, mint a kísérlet első felében az egyetlen ujjuk – a labda ezúttal lassan *ÓMM* irányban fordul el, ahogy megjósoltuk. Ezt a jelenséget a 3. kép és a hozzá tartozó videó szemlélteti.

Ez a trükk azért különösen hatásos, mert a diákok teljes egészében maguk hajtják végre, így a kísérlet második felében első kézből tapasztalják a meglepő, ösztöneiknek ellentmondó jelenséget. A mutatvány magától működik (nem kell hozzá ügyesség), erről a dolog matematikája gondoskodik. A kísérlet második fele ugyanis nem más, mint az úgynevezett „gördülőlabda-effektus”, az egyik leglátványosabb példa, amellyel a háromdimenziós forgatásoknál előforduló meglepő jelenségeket szemléltetni szokták [2]. A gördülőlabda-effektus rövid elméleti magyarázata a cikk következő fejezetében olvasható.

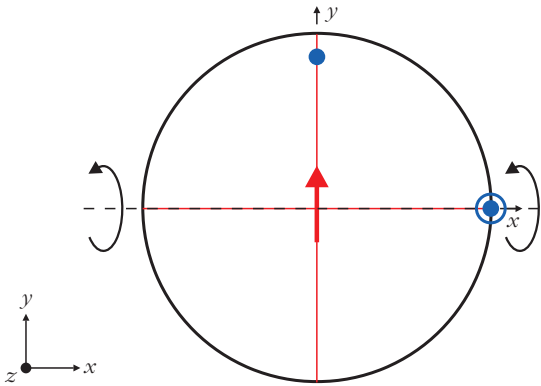
Az egész kísérlet érdekes és pedagógiailag értékes vonása – amit utólag érdemes külön ábeszélni a diákokkal –, hogy a kísérletező számára a mutatvány első fele nem okoz különösebb meglepetést: az ember ösztönösen úgy érzi, hogy ha körkörösén ÓME irányban mozgatjuk a labda tetejét, azzal az egész

labdát is ugyanabba az irányba forgathatjuk. Valójában viszont éppen a mutatvány első fele az, ami bonyolultabb fizikai leírást igényel, mert ahhoz, hogy az azonos forgási irány előállhasson, a labda *csúszva kell mozogjon* az asztalon. A mutatvány második fele ellentmond annak, amit az ember józan ésszel vár, és a (gördülőlabda-effektust nem ismerő) kísérletező számára teljesen meglepő, szinte varázslatos látványt nyújt. Ugyanakkor éppen a mutatvány második fele az, ami teljesen egyszerű fizikai modellel, elemi matematikával is könnyen magyarázható, mert ebben az esetben a labda *tisztán gördül* a vízszintes felületen. Érdemes elgondolkozni azon, mi okozza ezt a markáns különbséget az egy- és kétujjas eset között; e sorok írója számára egyelőre nem világos az ok. Ezért csak mint kísérleti tény tudom megállapítani, hogy – ha a felületek nem túl tapadósak és nem is túl csúszósak – *két vagy több ujjal, esetleg a teljes tenyérrel* végrehajtva a mutatványt automatikusan a tiszta gördülő mozgás áll elő, vagyis az „északi sark” és az „egyenlítő” ellentétes irányban forog (lásd a 3. képet), míg az egy ujjal végrehajtott kísérlet szinte automatikusan azt a fajta csúszó mozgást hozza létre, amellyel a labda egyenlítője és az északi sarkot mozgató ujj azonos irányú forgó mozgása áll elő (2. kép).¹

A gördülőlabda-effektus magyarázata

A tisztán gördülő labda meglepő forgásirányát (azaz a fent tárgyalt kísérlet második felét) azzal a szemléletes, egyszerűsített esettel szokás magyarázni, amikor a labda három, egymást követő 90°-os gurulómozgást végez az asztalon [2]: először előrefelé gurul egy negyed fordulatot, azután balra egy negyed fordulatot, végül pedig hátra egy negyed fordulatot. A labda középpontja ilyen módon ÓME irányú mozgást végez. Meglepő módon a három guruló mozgás – amelyek mindegyike egy-egy *vízszintes* tengely körül elfordulás – együttesen ahhoz vezet, hogy a labda 90°-ot elfordul a *függőleges* tengely körül, mégpedig ÓMM irányba! Ezt az érdekes kísérletet (amely egyszerű, kvalitatív magyarázatot ad a gördülőlabda-effektusra) a diákok akár papíron, saját ábrákat rajzolva is könnyen végiggondolhatják, és az előttük levő labdával gyorsan maguk is ellenőrizhetik. Az egyetlen gond vele az, hogy a három egymás utáni negyed fordulat – előre, balra, hátra – a labda középpontját nem a kiinduló helyre viszi vissza az asztalon, hanem attól $R\pi/2$ -vel balra (ahol R a labda sugara), míg a diákok által ténylegesen végrehajtott mutatványban a labda parányi gördülésekkel mozgott körbe-körbe, és középpontja periodikusan a kiinduló pontba érkezett vissza a padon (lásd 1. fejezetet).

¹A gördülőlabda-effektust tárgyaló szakirodalom (például [2]) általában azt javasolja, hogy a labda tetejét *tenyérrel* nyomjuk le, és mozgassuk körkörösén. Én a cikkben azért választottam a kétujjas változatot, mert így a kísérlet első és második felének kiinduló paraméterei kevésbé térnek el egymástól, így az eredmény látványosabb.



4. ábra. A labda tájolása az első infinitezimális gördülő mozgás előtt: a labda az x tengely körül $d\alpha$ szöggel előre felé fordul el.

A kérdést tehát talán jobb ebben a formában feltenni: ha a labdát úgy gurítjuk az asztalon, hogy négy (nem három) *parányi* (nem 90° -os) fordulatot tesz meg egymás után – előre felé, balra, hátra felé, majd jobbra –, amelyek egy teljes, *az óramutatóval ellentétes irányú burkot alkotnak* az asztalon és a labda közepét visszaviszik a kiindulópontba, akkor hogyan lehetséges, hogy a hurok végére a labda a függőleges tengely körül kis szöggel elfordul, mégpedig *az óramutatóval megegyező irányba*? A cikk hátralevő része erre a kérdésre válaszol, egyrészt öt egyszerű ábrával (4–8. ábrák) – amelyek önmagukban is elégséges kvalitatív magyarázatot adnak a problémára –, másrészt részletes algebrai levezetéssel.

Felteszem, hogy a négy gördülő mozgás mindegyikében a labda ugyanazzal a szöggel fordul el a megfelelő vízszintes tengelyek körül (így középpontja biztosan visszajut az eredeti helyre), valamint hogy ez a $d\alpha$ elfordulási szög kicsi. A számolásokban a harmad- és magasabb rendű tagokat ezért elhanyagolom, azaz például használom a $\sin(d\alpha) \approx d\alpha$ és $\cos(d\alpha) \approx 1 - d\alpha^2/2$ közelítéseket. A jelenséget olyan koordináta-rendszerben írom le, amelynek origóját a labda középpontjához rögzítjük, tengelyei pedig az asztalhoz képest rögzített irányokban vannak: az x tengely az asztal elülső és hátulsó élével, míg az y tengely az asztal jobb és bal oldali élével párhuzamos, a z tengely pedig függőleges, azaz az asztal lábaival párhuzamos. Az x , y , illetve z irányú elmozdulásokat „jobbra-balra”, „előre-hátra”, illetve „felé” elmozdulásoknak fogom nevezni.

A 4. ábra felülnézetből mutatja a labda kezdeti tájolását az asztalon. A labda felszínére néhány szimbólumot rajzoltam, amelyek segítenek vizuálisan követni az egymás utáni elfordulásokat: két „hosszúsági kört” (vékony piros vonalak), egy piros nyilat az „északi sarknál”, egy

piros kettős kört az „egyenlítőn” és egy kék pontot az egyik hosszúsági körön, kissé északra az egyenlítőtől. (A kék pont elhelyezkedését úgy választottam, hogy az első guruló mozgás a pontot éppen az y tengelyre vigye le.)

Figyeljük meg, hogyan változik a kettős kör helyzete a ciklus alatt az (x, y, z) koordináta-rendszerben! Kezdő pozíciója $(x, y, z) = (R, 0, 0)$, ahol R a labda sugara. Az első guruló mozgás alatt a kettős kör a forgástengelyen fekszik, tehát nem változtatja meg a helyzetét (4. ábra és az 5. ábra bal oldala): $dx_1 = 0$, $dy_1 = 0$, $dz_1 = 0$.

A ciklus második lépésében a labda balra gurul, mint az 5. ábra mutatja. A kettős kör egy R sugarú körpálya mentén mozog. Felfelé $dz_2 = R \sin(d\alpha) \approx R d\alpha$, balra pedig

$$\begin{aligned} dx_2 &= R \cos(d\alpha) - R \approx R \left(1 - \frac{d\alpha^2}{2}\right) - R = \\ &= -R \frac{d\alpha^2}{2} \end{aligned}$$

az elmozdulása. Az y helykomponens nem változik: $dy_2 = 0$.

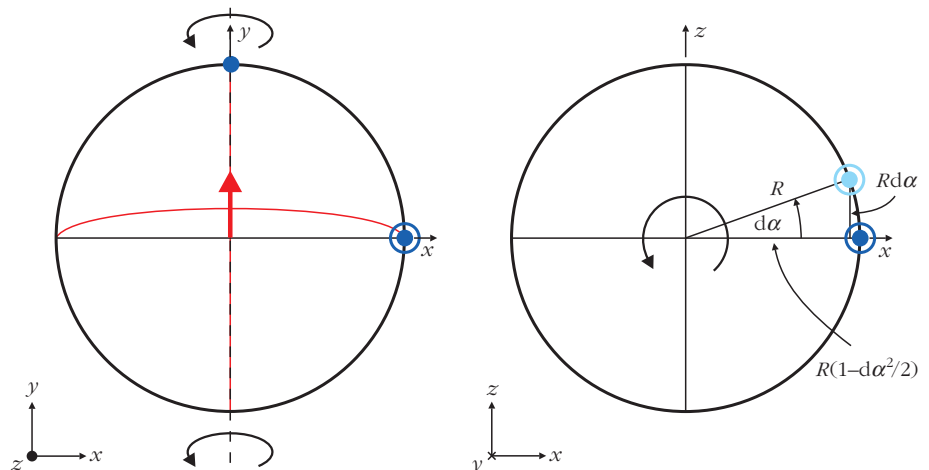
A harmadik lépésben a labda hátrafelé gurul a 6. ábrán látható módon. A kettős kör egy $R d\alpha$ sugarú körpálya mentén mozog. Elmozdulása hátrafelé $dy_3 = -R d\alpha \sin(d\alpha) \approx -R d\alpha^2$, lefelé pedig

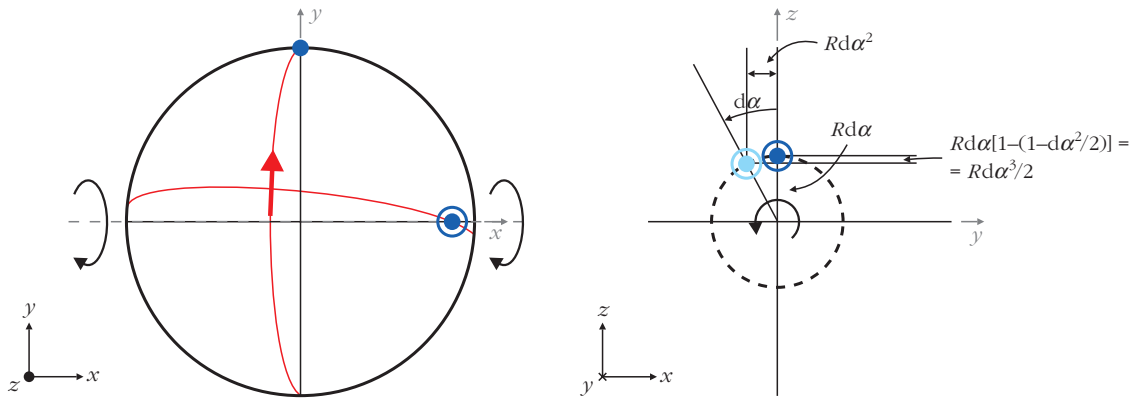
$$\begin{aligned} dz_3 &= R d\alpha \cos(d\alpha) - R d\alpha \approx R d\alpha \left(1 - \frac{d\alpha^2}{2}\right) - R d\alpha = \\ &= -R \frac{d\alpha^3}{2} \approx 0. \end{aligned}$$

(Emlékeztető: a $d\alpha$ -ban harmad- és magasabb rendű tagokat elhanyagoljuk.) A kettős kör x helykomponense nem változik: $dx_3 = 0$.

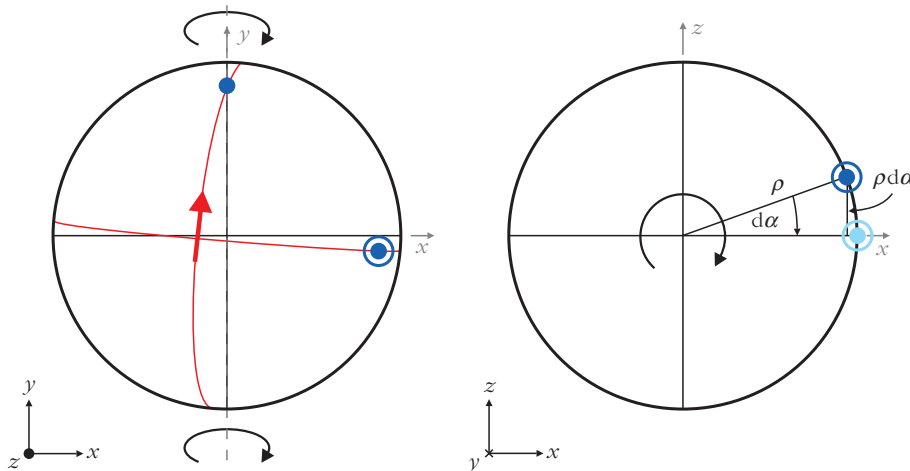
A negyedik (és utolsó) lépésben a labda jobbra gurul, a 7. ábrán látható módon. A kettős kör egy ρ sugarú körpálya mentén mozog, ahol ρ egy kicsit kisebb az R -nél. Azonban a ρ és az R közötti különbség elhanya-

5. ábra. Balra: a labda tájolása a második infinitezimális gördülő mozgás előtt. Jobbra: a ciklus második lépésében a labda az y tengely körül oldalirányban balra $d\alpha$ szöggel elfordul.





6. ábra. Balra: a labda tájolása a harmadik infinteimális gördülő mozgás előtt. Jobbra: a ciklus harmadik lépésében a labda az x tengely körül hátrafelé, $d\alpha$ szöggel fordul el.



7. ábra. Balra: a labda tájolása a negyedik infinteimális gördülő mozgás előtt. Jobbra: a ciklus negyedik, egyben utolsó lépésében a labda az y tengely körül oldalirányban $d\alpha$ szöggel jobbra fordul el.

golható az általunk megkövetelt pontosságon belül: a Pithagorasz-tétel miatt $\rho^2 + (dy_3)^2 = R^2$, amiből

$$\rho = R\sqrt{1 - d\alpha^4} \approx R\left(1 - \frac{d\alpha^4}{2}\right) \approx R.$$

A negyedik guruló mozgás tehát a kettős kört

$$dx_4 = \rho - \rho \cos(d\alpha) \approx \rho - \rho\left(1 - \frac{d\alpha^2}{2}\right) \approx R\frac{d\alpha^2}{2}$$

távolsággal jobbra, és $dz_4 = -\rho \sin(d\alpha) \approx -Rd\alpha$ távolsággal lefelé mozgatja el, míg az y helykoordináta ugyanaz marad: $dy_4 = 0$.

A ciklus végére a kettős kör teljes elmozdulása (az előírt pontosság mellett) a következő összetevőkkel rendelkezik:

$$dx = \sum_{i=1}^4 dx_i = 0,$$

$$dy = \sum_{i=1}^4 dy_i = -Rd\alpha^2 \text{ és}$$

$$dz = \sum_{i=1}^4 dz_i = 0.$$

A 8. ábrán látható a labda tájolása a teljes ciklus bejárása után.

A fentieket összefoglalva: a labda egy ÓME irányú ciklust járt be, amely négy, egymás utáni tisztán gördülő szakaszból állt. Mind a négy gördülő szakaszban a labda vízszintes tengely körül $d\alpha$ szöggel elfordult. A ciklus végén a labda középpontja visszakerült a kiindulópontba az asztalon, de a labda

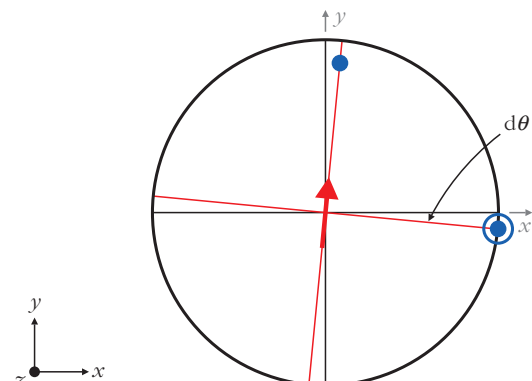
$$d\theta \approx \frac{|dy|}{R} \approx d\alpha^2$$

szöggel elfordult a z tengely körül ÓMM irányban. Ezzel az összefüggéssel és a hozzá tartozó 4-8. ábrákkal megkapjuk a gördülőlabda-effektus (az 1. szakaszban bemutatott trükk második fele) kvantitatív magyarázatát.

Irodalom

1. N. Bokor: A rolling ball magic trick. *Physics Education* 54 (2019) 015011.
2. A. J. Hanson: *Visualizing Quaternions*. Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco (2006).

8. ábra. A labda helyzete és tájolása a teljes ciklus végén. A labda a pad felületén visszatért eredeti helyére, de közben elfordult a z tengely körül $d\theta = d\alpha^2$ szöggel.



NÉHÁNY GONDOLAT AZ ATOMFIZIKA KÖZÉPISKOLAI TANÍTÁSÁHOZ

Schramek Anikó
Fazekas Mihály Fővárosi Gyakorló
Általános Iskola és Gimnázium

A – 2012-es – NAT és kerettanterv alapján – atomfizika témában tanítandó tartalmakat a tankönyvek többnyire jól lefedik. Ezek leginkább a kvantummechanika előzményeként számon tartott jelenségek, atommodellek, köztük a „kvantummechanikai atommodell” [1] és a kettős természet. Az „új NAT”-ban a kvantummechanikai atommodell nem szerepel, de az elektron hullámtermészete és az elektronmikroszkóp működése igen. A B kerettanterv ezen felül a kémiai kötések, az ion- és fémrács, a vezetési tulajdonságok tanítását követeli meg. Ezen belül a szupravezetést és a félvezetők szerkezetét, p-n átmenetet és a félvezetők gyakorlati alkalmazásait olvashatjuk [2]. Az emelt szintű érettségénél megkövetelik, hogy a diák tudja értelmezni Thomson- és Millikan-kísérletet, a Planck-állandó kísérleti meghatározását, tudjon számításokat végezni az atom által elnyelt energiamennyiségekkel kapcsolatban. Közép szinten is értelmeznie kell a fotoeffektust, ismernie kell a vele kapcsolatos formulákat. Meg kell fogalmaznia a fény kettős természetét. Ismernie kell a kvantumszámokat, emelt szinten ezek fizikai jelentését(!), és az elektron de Broglie-hullámhosszát. Emelt szinten kell, hogy alkalmazni tudja a Pauli-elvet és a Hund-szabályt az elektronpályák betöltési rendjére a periódusos rendszerben, valamint ismernie kell az atom kvantummechanikai modelljét, vagyis az elektron „tartózkodási helyének” modell szerinti jelentését [3].

Az elvontabb fogalmak – az elektron hullámtermészete, a „pszí-függvény” és annak valószínűségi értelmezése – átadása nem könnyű feladat, ezek bemutatásához kerestem eszközöket, ötleteket. Az alábbiakban ezen ötleteket igyekszem röviden megmutatni, továbbgondolásra átadni. A cikk célja természetesen nem a téma összefoglalása, megtanítása vagy újszerű megvilágítása néhány oldalon, hanem a tanításával kapcsolatos néhány gondolat megosztása. A szemléltetéshez, képek kialakításához igyekszem ötletet adni,

A tanulmány elkészítését a Magyar Tudományos Akadémia Tantárgy-pedagógiai Kutatási Programja támogatta.



Schramek Anikó 2000-ben végzett az ELTE fizikatanári szakán. 2015 óta a Budapesti Fazekas Mihály Gyakorló Általános Iskola és Gimnáziumban tanít. Jelenleg az ELTE Fizika Tanítása Program doktori hallgatója.

amit az olvasó ízlés szerint alakíthat, fejleszthet, vagy azokat látva más ötletek juthatnak eszébe. Először három jelenséget emelek ki, amelyek a kvantummechanika és az atomfizika tanítása során előkerülhetnek, de már a mechanikai hullámok tanításakor bemutatathatjuk őket. Ezután a valószínűségi leírás és az elektronszerkezet bemutatásának egy lehetséges módját írom le, illetve az interneten elérhető szimulációkat ajánlok hozzá. Ezt a részt csak a fizikát emelt szinten tanuló diákoknak ajánlom.

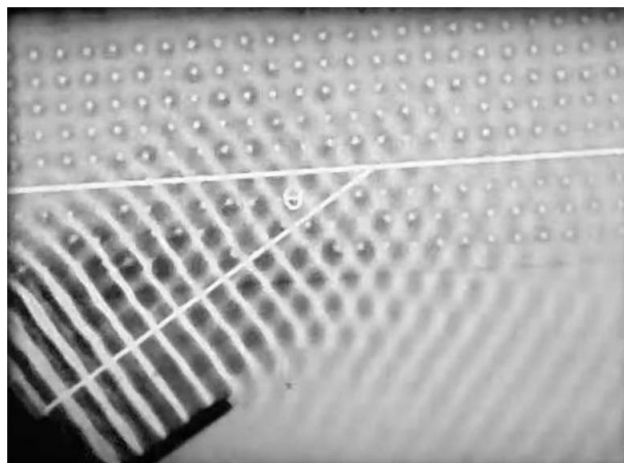
Mechanikaihullám-analógiák

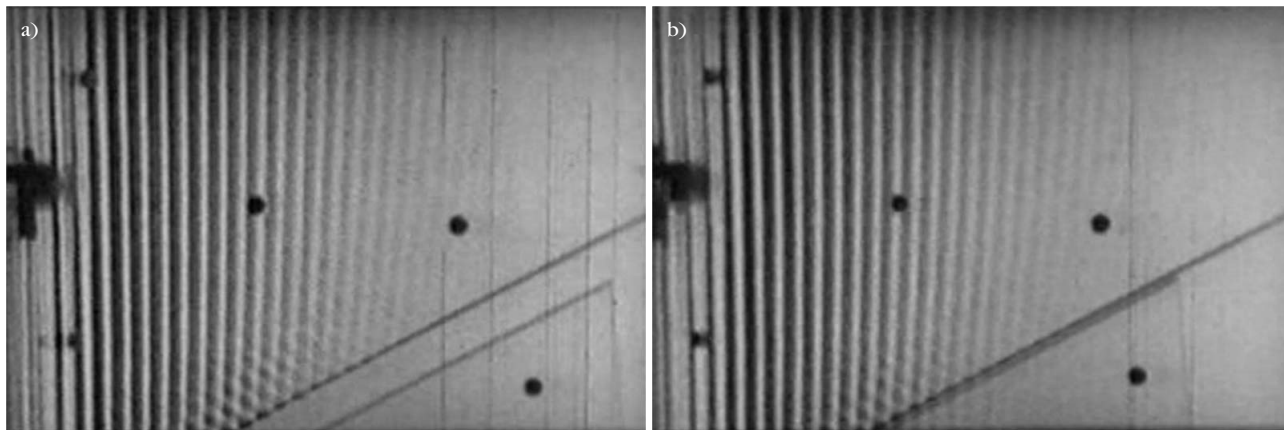
A hullámtermészet bemutatásához az alapokat a mechanikai hullámok tulajdonságai, a hullámjelenségek tanítása adja. Ezeket többek között hullámkódas kísérletekben mutatjuk be, vagy eszköz és idő hiányában erről készült filmeket használunk. Fizikaszertárakban „hurokfilm” néven ismert az 1950-es, '60-as években az MIT-n felvett kísérletek gyűjteménye, aminek VHS-re mentett vagy digitalizált formája sok szertárban ma is megtalálható. Az internetes videomegosztó oldalakon részletei elérhetők, de az itt leírt részeket teljes egészében az interneten nem, csak az eredeti filmben találtam meg.

Bragg-féle visszaverődés

A film az elhajlás és interferencia rész után felületi hullámokon keresztül ismerteti a jelenséget. A kristályrácsot szabályos rendben elhelyezett akadályok

1. ábra. Bragg-reflexió szemléltetése víz hullámokkal. A képre kattintva régi hurokfilm nézhető meg a jelenségről, vagy megtekinthető a youtube videomegosztón [4].





2. ábra. a) Teljes visszaverődés, a hullám nem hatol be a 2-es közegbe (mélyebb víz). b) Ha a 2-es közeg megfelelően keskeny, a hullám ezen keresztül átjut a 3-as közegbe. A képre kattintva videó nézhető meg a jelenségről, vagy megtekinthető a youtube videómegosztón [5].

képviselik, ezen halad keresztül a felületi hullám. Adott hullámhossz mellett visszaverődő hullámokat látunk, majd a hullámhosszt változtatva a visszavert hullámok eltűnnek. További változtatás után a visszavert hullámok akkor jelennek meg újra, amikor a hullámhossz az első esetben megfigyelt hullámhossz fele. Az újra „elrontott” erősítést követően a beesési szög változik, így adott beesési szög mellett újra láthatóvá válnak a visszavert hullámok (1. ábra). Ez a rész teljes egészében megtalálható a világháló egyik videómegosztóján[4].

Alagúteffektus

Az alagúteffektus ugyan nem a kötelező tananyag része, de segítheti a valószínűségi leírás megértését, ha beszélünk róla, és több folyamat lejátszódásáért felelős, így kérdésként több terület tanítása során is felmerülhet. Tipikusan ilyen jelenség az alfa-bomlás, de már a mechanikai hullámok két közeg határán való viselkedése is jó példa. Itt a megtört hullám mellett van visszavert hullám is, hiszen a visszaverődés valószínűsége nem nulla. Ezenkívül a diákokat elérő információáradatban jó eséllyel felbukkan valamilyen formában, így előfordulhat, hogy egy diákunk maga kérdez rá a jelenségre.

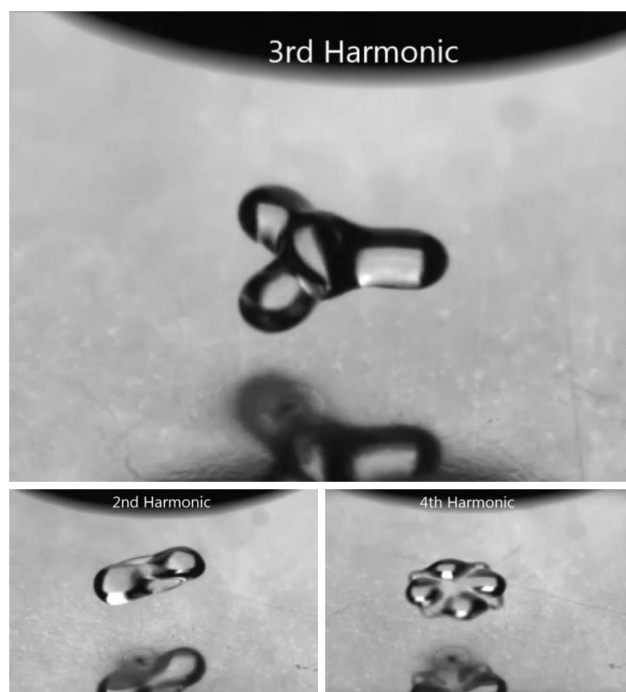
A fent említett filmben a törés, teljes visszaverődés részénél láthatjuk. A hullám sekély vízből mélyebb vízbe érkezéskor törik, a határszögnél nagyobb beesési szög esetén teljesen visszaverődik (2.a ábra). Ha a mélyebb víz után újra sekély vízréteget helyezünk el, és a két közeghatárt egymáshoz közelítjük, kellően keskeny mélyvízszakasz esetén a hullám a második sekély rétegben is megjelenik (2.b ábra) – e jelenségről is létezik hurokfilm a youtube-on [5]. Vagyis valamilyen amplitúdóval átjut azon a rétegen, amelybe – úgy tűnt – nem hatolhat be. Az átjutás után az amplitúdó annál nagyobb, minél keskenyebb a második, magasabb energiát jelentő réteg. Az alagúteffektus tárgyalásakor emlékeztethetjük a diákokat a jelenségre, és összeköthetjük a Born-féle értelmezéssel, megmutatva az amplitúdó szerepét a valószínűségi leírásban.

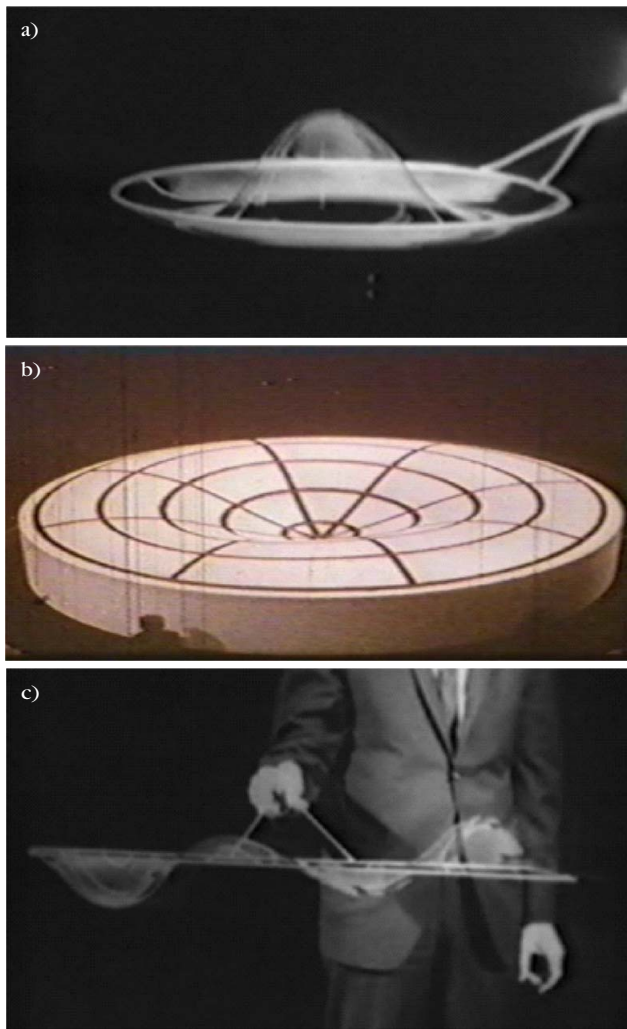
Állóhullámok, avagy dobozba zárt elektron

Az elektront kötött állapotban állóhullámként írjuk le. A síkon kialakuló állóhullámok bemutatását szintén megtaláljuk a felvételek között mind kör, mind téglalap alakú felületen. Utóbbit – egyik irány mentén – fél hullámtól két hullámhosszig minden fél hullámnyi változásnál láthatjuk. Ezeket – megfelelő drótkeretekkel és szappanos oldattal – még magunk is be tudjuk mutatni akár a fizikaórán, akár a tanulókkal közösen a szakkörön. A folyadékcseppeken kialakuló térfogati állóhullámok keltése már sokkal bonyolultabb, de az egyik videómegosztón [6] ilyet is találunk (3. ábra).

A 4.a és 4.b ábrán látható állóhullámok jól szemléltetik a kémiaórán is felbukkanó, mellékvantumszám által meghatározott pályák alakját, illetve a nulla

3. ábra. Folyadékcseppeken kialakuló állóhullámok. A képre kattintva videó nézhető meg a jelenségről, vagy megtekinthető a youtube videómegosztón [6].





4. ábra. a) Felületi állóhullám körfelületen. b) Felületi állóhullám dobon. c) Felületi állóhullám.

valószínűségű helyeket – csomópontokat, csomógömböket. A 4.c ábra a dobozba zárt elektron modelljét szemlélteti.

Hullámfüggvény és valószínűségi jelleg

A téma egy lehetséges bemutatására a diákjaim számára a [7] forrás alapján írt segédanyagomból [8] mutatok részletet. A matematikai leírást képekkel igyekszem helyettesíteni, hiszen a szükséges matematikai ismeretek messze túlmutatnak a középiskolai tananyagon.

Az alábbiakban ψ -vel jelölöm a hullámfüggvény helyfüggő részét (is), vagyis nem használom a ϕ jelölést a helyfüggő tag megkülönböztetésére. Ennek szintén az az oka, hogy középiskolában megoldhatatlannak gondolom a téma matematikai leírásának részletezését, de a valószínűségi értelmezés kapcsán minden forrásban a ψ jelölés szerepel, így azt elhagyhatatlannak érzem. Természetesen, adott esetben, a diákok kérdései mentén eljuthatunk a függvény néhány tulajdonságának leírásához, de ez a matematikában az átlagnál jártasabb diákok feltételez.

Bármi is az, amit hullámként keresünk, ha hullám, akkor térben és időben periodikus, vagyis hullámfüggvénnyel leírható. Az egyszerűség kedvéért térbeli helyvektor helyett csak egy x koordinátával dolgozunk. Így a hullámfüggvény:

$$\psi = A \sin(kx + \omega t + \varphi_0),$$

ahol a k hullámszám ($2\pi/\lambda$) a térbeli periodicitást mutatja, az ω körfrekvencia ($2\pi/T$) pedig az időbeli periodicitás hordozója.

A Schrödinger-egyenlet stacionárius alakját is csak a fizikát és matematikát emelt szinten tanulók diákoknak írjuk fel, mert a deriválás fogalmát ők ismerik. Azonban ennél bonyolultabb matematikai ismereteket nem igényel az alábbi tartalom, a matematikai leírásán keresztül a képi megjelenítéshez szeretnék eljutni. Tapasztalataim alapján a matematikában jártas, azt szerető diákok e nélkül úgy érzik, a közlés „a levegőben lóg”, alapok nélkül kapják az információt. Nekik segít a megértésben az egyenlet felírása. A hullámfüggvény Born-féle értelmezése az egyenletet tartalmazó részt kihagyva is bemutatható. További matematikai részletek a [9] forrásban találhatók.

Schrödinger – anélkül, hogy a hullámfüggvénynek szemléletes tartalmat tulajdonított volna – egy olyan egyenletre jutott, ami az anyaghullámok alakját és helyzetét, annak időbeli változását jól leírta. Mi ezen egyenlet időtől független – egy adott pillanatban jellemző értékeket tartalmazó – változatát fogjuk vizsgálni, amihez a hullámfüggvény időtől független részére van szükségünk:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} \psi(x) + V(x) \psi = E \psi(x).$$

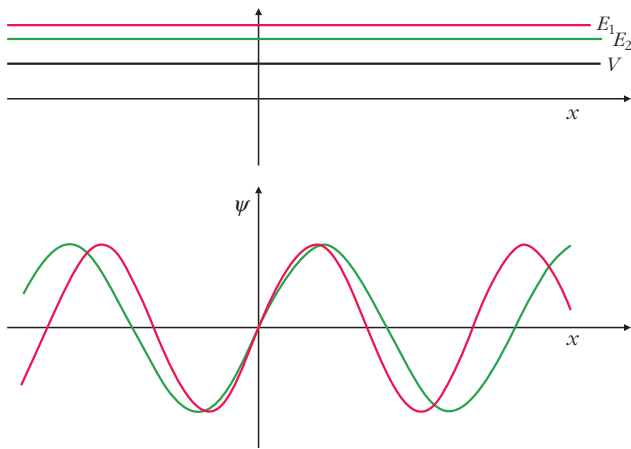
$\psi(x)$ a fent leírt hullámfüggvény helytől függő része, $V(x)$ a részecske potenciális energiája a hely függvényében, E pedig az összes energiája.

Az egyenlet megszületése után röviddel, Max Born adott szemléletes tartalmat a függvénynek. Born szerint a hullámfüggvény amplitúdójának négyzete a részecske adott x hely kicsiny környezetében való tartózkodásának valószínűségével arányos. Vagyis, ha egy adott helyen – x értéknél – a függvény négyzetének értékét vesszük, az 0 és 1 közé esik, és azt mutatja, ha valahogyan detektálnánk a részecskét, akkor az esetek hány százalékában találunk a vizsgált x helyen.

Az egyenlet teljes megoldása nem célunk, a függvény jellegét, a görbe milyenségét keressük, ebből már következtetéseket tudunk levonni. Az egyenlet kis átrendezése,

$$\frac{d^2}{dx^2} \psi(x) = \frac{2m}{\hbar^2} (V(x) - E) \psi(x)$$

után kiderül, hogy – a hely függvényében – állandó potenciális energia esetén a hullámfüggvénynek olyan alakúnak kell lennie, hogy az x hely szerinti kétszeres deriváltja csak egy együtthatóban különbözzön



5. ábra. Különböző energiaszintekhez tartozó hullámfüggvény konstans potenciális energia mellett.

zék az eredeti függvénytől. Ez az együttható előjelétől függően valamilyen harmonikus függvény, vagy (e alapú) exponenciális függvény. Ha az adott helyen a $V(x)$ potenciális energia nagyobb, mint a részecske E energiája, akkor a függvény exponenciális, ha kisebb, akkor „szinuszszerű” (harmonikuszerű). Az alábbiakban egy példán keresztül igyekszem érthetőbbé tenni a függvény jelentését.

Ha a kétszeres derivált együtthatója negatív, a függvényt szinuszos alakban keressük. A

$$\psi = A \sin(\varphi_0 + kx)$$

függvény x szerinti kétszeres deriváltja:

$$\psi'' = -k^2 A \sin(\varphi_0 + kx) = -k^2 \psi.$$

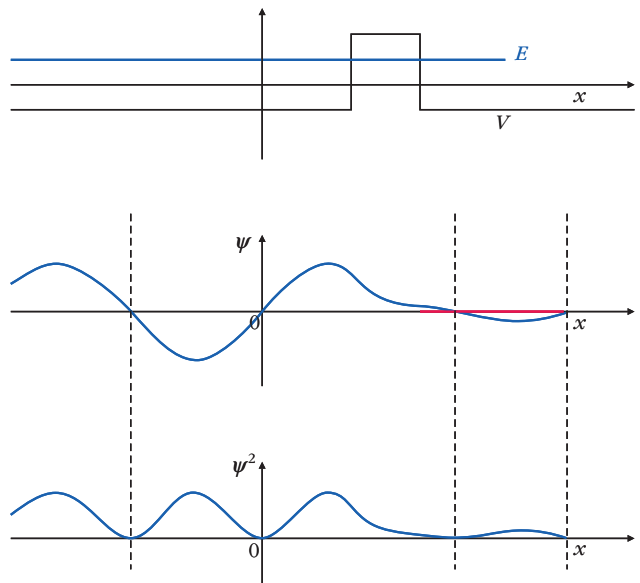
Ebből a $k = 2\pi/\lambda$ hullámszám:

$$k = \sqrt{\frac{2m}{\hbar^2}(E - V(x))}.$$

Grafikusan látható, hogy a hullámhosszt befolyásolja az, hogy a részecske összes energiája mennyivel nagyobb, mint az adott hely potenciális energiája. Nagyobb energiakülönbség nagyobb hullámszámot, azaz kisebb hullámhosszt eredményez. Ha a potenciális energia változik, az energiák különbsége és így a hullámhossz is változni fog (5. ábra).

Potenciálgát, alagúteffektus

Ha a potenciális energia egy $(a_1; a_2)$ tartományban nagyobb, mint a részecske összes energiája, a Schrödinger-egyenlet alapján ψ exponenciális függvény lesz. Egy a potenciálgáthoz „balról érkező” elektron esetén ez azt jelenti, hogy a szinuszos függvény a gát határán exponenciális függvénybe megy át, majd a gát túloldalán újra szinuszos, kisebb amplitúdóval. Az adott helyen tartózkodás valószínűsége tehát a gát tartományában csökken, de sem itt, sem a gát túloldalán nem nulla (6. ábra). Az áthaladás – illetve a gát túloldalán tartózkodás – valószínűsége a gát szélességétől és magasságától függ.



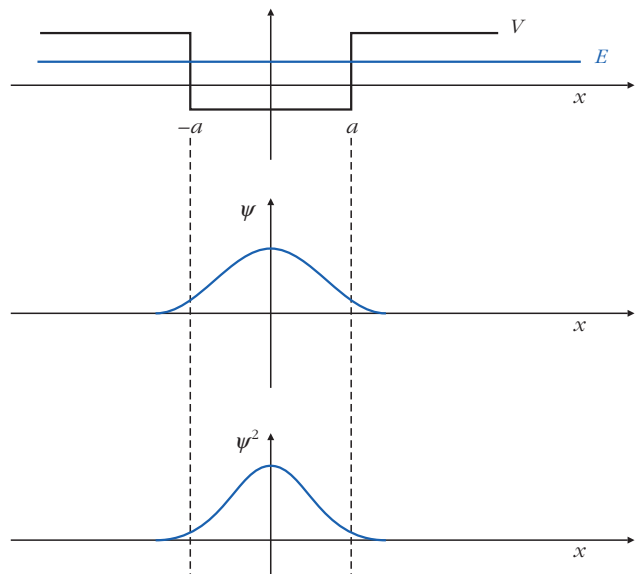
6. ábra. A hullámfüggvény alakulása potenciálgát esetén.

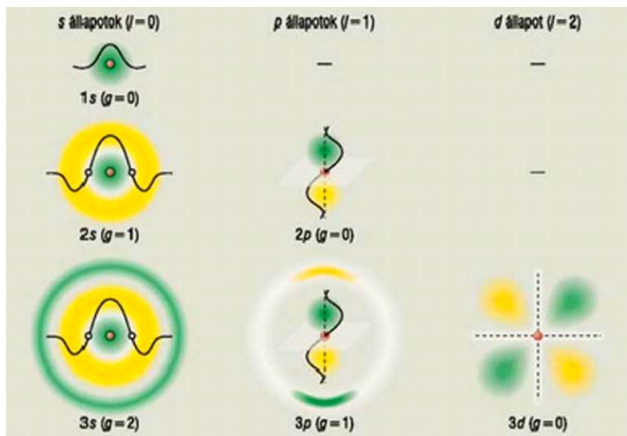
Potenciálgödör vagy dobozba zárt részecske

Ha a potenciális energia egy $(-a; a)$ tartományban érzékelhetően kisebb, mint a környezetében, potenciálgödörről beszélünk. Ha a vizsgált részecske összes energiája a potenciálgödörben nagyobb, mint a potenciális energia, azon kívül pedig kisebb, a fent leírt okokból a ψ függvény a potenciálgödör tartományában szinuszos, azon kívül exponenciális lesz. Mivel a ψ^2 valószínűsűrűség teljes térre vett integrálja 1, ezek az exponenciális függvények a potenciálgödörön kívül a „nullába simulnak”. A vizsgált részecske tehát nagy valószínűséggel a kisebb potenciális energiájú helyen tartózkodik, de kis valószínűséggel azon kívül is megtalálható (7. ábra).

A fenti modell szemléltetheti az elektron alapállapotú helyzetét a hidrogénatomban. Az s pálya gömb-

7. ábra. A hullámfüggvény alakulása „négyyszög” potenciálgödör esetén.





8. ábra. Hullámfüggvény és mellékkvantumszám.

szimmetrikus volta a valószínűsűrűség-függvény alakjából következik. Fentiekben a hullámfüggvényt egy dimenzióban értelmeztük, de az atommag terében a potenciális energia függvénye gömbszimmetrikus, így a tőle való távolság függvényében az adott helyen való tartózkodás valószínűsége is. Ha az elektron gerjesztett állapotban van, vagyis összes energiája nagyobb, hullámhossza kisebb lesz. Ekkor a ψ függvény a $(-a; a)$ tartományban nem egy „fél hullámot”, hanem „egész hullámot” tartalmaz. Ha az origó az atommag, akkor ebből a p pálya alakja rajzolódik ki. Ezt szemlélteti a [11] forrásból származó 8. ábra. A színek, illetve sátozás szerepére az alábbiakban még visszatérünk. Ezzel együtt válik érthetővé a 4. ábra elektronpályákkal való kapcsolata is. A 4.a ábrán látható szappanhártya a 2s pályát szemlélteti. Térben „megforgatva” a hullámfüggvényt, a zérus valószínűségű helyek egy gömböt – csomógömböt – rajzolnak ki. A 4.b ábra dobján két félhullám kialakulása modellezi a 2p pályát, a zérus valószínűségű helyek itt – a 8. ábrán fehérrel jelölt – csomósíkot adnak. Ehhez az alábbi bekezdésben leírt „dobozba zárt elektron” modell ad még információt.

Ha a potenciálját végtelen magas, a hely $-a$, illetve a értékein az ott-tartózkodás valószínűsége 0, vagyis a „gödör” szélességében a félhullámhossz egész számú többszöröse fér el. Ez a kötött állapotok állóhullám-analógiával leírt modelljéhez vezet. A modellben az elektron valamilyen valószínűséggel megtalálható azokon a helyeken ahol a potenciális energia 0, de

9. ábra. Iskolai szemléltető eszköz. Az 1s, 2s és 2p elektronpályákon az elektron adott helyen tartózkodásának valószínűségét láthatjuk a pályák egy metszetén.



zéró valószínűséggel található meg ott, ahol a potenciális energia végtelen nagy. Legyen egydimenzióban L hosszúságú tartományban 0 a potenciális energia, ekkor a modell szerint az elektron itt állóhullámként van jelen, vagyis

$$L = n \frac{\lambda}{2},$$

ahol n pozitív egész. Mivel itt a potenciális energia 0, az elektron energiáját a mozgási energia adja. A részecske- és hullámtulajdonságokat összekötő

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

és a mozgási energiára vonatkozó

$$E = \frac{p^2}{2m}$$

összefüggések felhasználásával adódik, hogy az elektron energiája itt

$$E = n^2 \frac{h^2}{8mL^2},$$

ami a kötött állapotú energia kvantáltságát igazolja, és aminek felhasználásával a vonalas szinképre vonatkozó Rydberg-formula igazolható. A modellt 2 vagy 3 dimenzióba kiterjesztve az elektron megtalálási valószínűségét egy megengedett felületen vagy térrészben leíró „hullámfüggvényhez”, illetve az itt tartózkodó elektron megengedett energiaszintjeihez jutunk. A megtalálási valószínűsége a hullám adott helyen vett amplitúdójának négyzetéből következtetünk. Ezekben az esetekben a különböző tengelyek mentén az állóhullámokat egymástól függetlenül vizsgáljuk, bevezetve az n_x , n_y , és n_z változókat. Az elektron energiáját a két, illetve három dimenzióra felírt E_x , E_y és E_z energiák összege adja:

$$E = \frac{h^2}{8mL^2} (n_x^2 + n_y^2 + n_z^2).$$

A megengedett felület például egy vékony fémlemezben „delokalizált” elektront modellezhet. A 4.c ábra egy ilyen $n_x = 4$, $n_y = 1$ hullámot szemléltet. Ha $n_x =$

$n_y = n_z = 1$, az $1s$ pálya gömbszimmetrikus modelljéhez jutunk, ha n_x , n_y és n_z közül kettő értéke 1, a harmadiké 2, akkor a $2p$ pálya három lehetséges elhelyezkedéseinek modelljét kapjuk.

Három dimenzióban a valószínűség hely függvényében való ábrázolása nem oldható meg a megszokott függvényábrázolással, hiszen ehhez négy tengelyre lenne szükség. Erre megoldás, ha adott helyen az ott tartózkodás valószínűségét sátrózással jelezzük. Sűrűbb sátrózás nagyobb valószínűséget jelent, kétféle szín használata a „váltakozásra”, az állóhullám jellegre utal. Ez látható a 8. ábrán. Szintén sátrózással szemléltetik az adott helyen való tartózkodást a 9. ábrán látható iskolai eszközök, amelyeken $1s$, $2s$ és $2p$ pályák elektronpályáit, illetve azok egy metszetét láthatjuk.

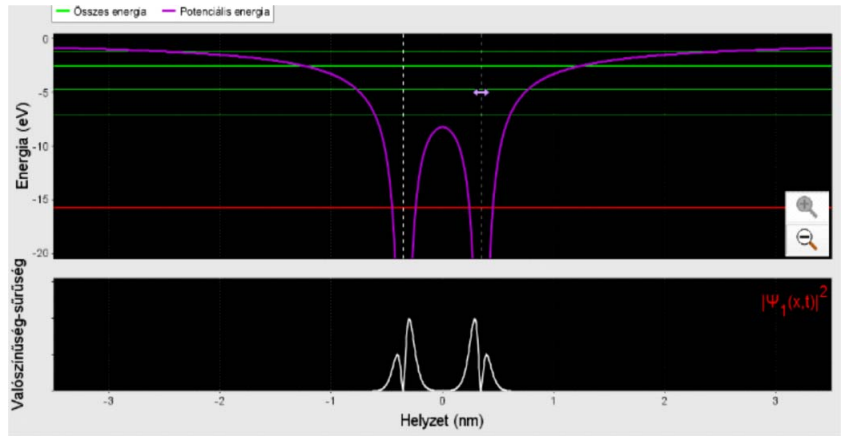
Lehetséges továbbgondolások

A fenti gondolatmenet folytatható, a potenciálisenergia-függvény különböző alakjai mellett vizsgálható, illetve több atommag esetére (molekula, atomrác) továbbgondolható. A következőkben az általam követett logikát írom le röviden.

Atomok, molekulák, rácsok

Nem konstans potenciálisenergia-függvény azt eredményezi, hogy az elektronenergia és potenciális energia különbsége a hely függvényében változik, ennek megfelelően a ψ függvény és második deriváltjának együtthatója is. Szemléletesen ez azt jelenti, hogy a függvény nem egy periodikus, állandó a hullámhossz segítségével jellemezhető függvény, de a görbe jelleget nem kell teljesen elvetnünk. Ez a helyzet áll elő egy ponttöltés (például: hidrogénatommag) terében is, ahol a potenciális energia a töltéstől vett távolsággal fordítottan arányos. Ez a fenti potenciálgödör-közelítésen annyit módosít, hogy hullámfüggvényünk hullámhossza a hely függvényében nem állandó. Két gödör kétatomos molekulát modellezhet (10. ábra).

Fémrácsokban a potenciál a hely függvényében ilyen – az atomtörzstől mért távolsággal fordítottan arányos – potenciálok ismétlődésével közelíthető. A fent leírtak gyors szemléltetésében segíthet a Colorádói Egyetem szimulációi [10] között megtalálható *Kvantált kötött állapotok* című, amelyben egy, kettő, illetve több potenciálgödörhöz tartozó energiaszinteket és valószínűségi sűrűség-függvényeket találunk. Egy gödör esetén a potenciálgödör alakja több lehetőség közül választható ki a programban: négyzet, aszimmetrikus, Coulomb- és harmonikus nevű görbét találunk. Az ilyen potenciálok mellett kvantált energiaszintek közül egyet kattintással kiválasztva, a



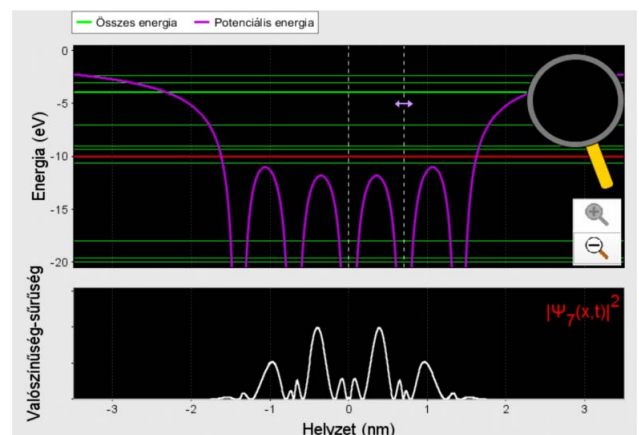
10. ábra. Az alapállapotú energiához tartozó valószínűségi sűrűség két, Coulomb-potenciállal leírható gödör esetén, a Colorádói Egyetem szimulációja alapján.

hozzá tartozó ψ vagy ψ^2 függvény jelenik meg. Ez utóbbit előreválasztással dönthetjük el. Több gödör esetén csak a négyzet- és a Coulomb-potenciálok választhatók. A gödrök száma 1 és 10 között változtatható, a lehetséges energiaszintek elrendeződése nagymértékben függ ettől a választástól, illetve a gödrök távolságától. A 11. ábrán is látható a valencia- és vezetési sávok szétválása. Ez a távolság eV egységben leolvasható az ábráról, emellett elektromos teret is létrehozhatunk, ezzel módosítva a potenciális energia alakulását, ezzel együtt a megtalálási valószínűség hely szerinti alakulását. Ezek a lehetőségek alkalmat adnak arra, hogy vezetési tulajdonságokról beszéljünk. Például 10 egymáshoz közeli gödör (atomtörzs) választásával fémrácsot, míg 4 gödörrel félvezető elektronjainak energiaszintjeit szemléltethetjük.

Egy gödör és a legördülő sávból a „harmonikus” lehetőség választása, a molekulák kötési mentén kialakuló – lineáris, a kötőszög változásával járó, illetve torziós – rezgéseket modellezheti. A harmonikus oszcillátor – vagyis a kitérés négyzetével arányos potenciális energiával leírható modell – alapállapotú energiája

$$\frac{1}{2} \hbar \omega,$$

11. ábra. Több gödör esetén, a 9. ábrán pirossal látható energiaszinthez tartozó valószínűségi sűrűség-függvény.



a magasabb energiájú állapotokba való gerjesztéshez $\hbar\omega$ energiaadagok szükségesek. A kötések mentén kialakuló rezgések esetén ezek a látható fény tartományába eshetnek, az egyes anyagok színe ezzel magyarázható. A leírt

$$\frac{1}{2} \hbar \omega + \hbar \omega$$

energia-sajátértékek középiskolában is bemutatható „levezetésére” találunk példát a [12] forrásban.

A [10] szimuláció a kívánt lehetőségek kiválasztásával mutatja a ψ függvény valós és képzetes részét, abszolút értékét és fázisát is. A diákok valószínűleg hallották a „Schrödinger macskája” néven elterjedt történetet, amiben az elektron egyszerre van több lehetséges sajátállapotban, illetve a sajátállapotok szuperpozíciójaként leírható állapotban van. Ilyen kevert állapotot is létrehozhatunk a szimulációban, ahol a lineáris kombinációban a különböző energiaszintekhez tartozó sajátfüggvények együtthatóinak értékét adhatjuk meg, amit a normálás következtében kissé módosítva, de az új együtthatókat láthatóvá téve jelenít meg a program.

Összegzés

A megértés szempontjából fontos a modell mögé helyezett kép, a vizuális megjelenítés. A szemmel nem látható részecskék viselkedése ráadásul eltér azon testek viselkedésétől, amelyeket születésünktől látunk,

tapasztalunk magunk körül. Mind a mechanikai hullám-analógiák, mind a leírt szimuláció abban segíthet, hogy a diákok képet alkothassanak elvont, nehezen érthető fogalmakról, az „anyag-hullámoknak” a látható mérettartományba eső testekétől eltérő viselkedéséről, és annak – a korábbi leírásokkal összevetve – szintén újszerű leírásáról. Természetesen, ha a szertárban található eszközök megengedik, a kísérleteket szerencsésebb a valóságban bemutatni. A szappanhártyához keret készíthető, diákok szorgalmi feladata is lehet. A filmek ehhez adhatnak ötletet, vagy hiányzó eszközök esetén pótolhatják azokat.

Irodalom

1. <https://docplayer.hu/57164-Magyar-kozlony-66-szam-magyarorszag-hivatalos-lapja-2012-junius-4-hetfo-tartalomjegyzek.html>
2. http://kerettanterv.ofi.hu/03_melleklet_9-12/index_4_gimn.html
3. https://www.oktatas.hu/koznevelés/erettsegi/erettsegi_vizsga_targyak\#1
4. <https://www.youtube.com/watch?v=fiULOzi3Xrk>
5. https://www.youtube.com/watch?v=g8AOQU7_LiI
6. <https://www.youtube.com/watch?v=4z4QdiqP-q8>
7. Gnädig Péter *Szemléletes kvantummechanika* előadásai, Fizika tanítása program.
8. <https://drive.google.com/file/d/1Y0-DK5nAX7V-asGaaMHdjSzXaH3BSy4/view>
9. Juhász Tibor: *A Schrödinger-egyenlet és egyszerű alkalmazásai*. <http://www.zmgzeg.sulinet.hu/tantargy/fizika/files/Schrodinger.pdf>
10. <https://phet.colorado.edu/hu/simulation/legacy/bound-states>
11. Jurisits József, Szűcs József, Halász Tibor: *Fizika 11–12. Középfelsőfokú érettségire készülőknek*. Mozaik Kiadó, Szeged
12. Holics László (szerk.): *Fizika*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1986.

A LORENTZ-ERŐ LEVEZETÉSE A SPECIÁLIS RELATIVITÁSELMÉLETBŐL

Matolcsi Dávid
Fazekas Mihály Fővárosi Gyakorló
Általános Iskola és Gimnázium

Schramek Anikó tanárnő egyik fizikaóráján a Lorentz-erő tárgyalásakor egyik osztálytársam, Kiss Gergely néhány érdekes kérdést fogalmazott meg. Felvetései-kérdései felkeltették figyelmemet: vajon lehetséges a Lorentz-erő létezésének megmagyarázása pusztán a Coulomb-erőre hivatkozva, a speciális rela-



Matolcsi Dávid a Budapesti Fazekas Mihály Gimnázium speciális matematika tagozatán érettségizett, jelenleg az Eötvös Loránd Tudományegyetem matematikus hallgatója. 2017-, 2018- és 2019-ben a Nemzetközi Matematikai diákolimpián képviselte Magyarországot.

tivitáselmélet segítségével. Kiss Gergelynek ezúton is köszönetet szeretnék mondani az inspirációért.

A mágneses Lorentz-erő kifejezése szerint, ha egy I erősségű árammal átjárt vezetékkel párhuzamosan egy töltött részecske w sebességgel halad, akkor a vezetékre merőleges erő hat a részecskére, amelynek nagysága egyenesen arányos a vezetékben folyó áramerősséggel és a részecske sebességével is.

Ez a törvény sokkal komplexebbnek tűnik, mint a Coulomb-erő, ami mindössze két töltés között ébredő erőről beszél. A Coulomb-erő alapvető természeti törvény, aminek létezését – pusztán kísérleti tapasztalatokra hivatkozva – lényegében axiómaként fogadjuk el. Ezzel szemben célunk, hogy a bonyolultabb Lorentz-erő létezését ne ugyanígy axiómaként kelljen feltennünk, hanem azt a Coulomb-erő következményeként tudjuk levezetni.

A Coulomb-erő egy töltött vezeték mellett

Tekintsünk egy q nagyságú töltést, ami egy dróttól r távolságra áll. Legyen ρ a drót protonjainak térfogati töltéssűrűsége. Feltételezve, hogy a drót végtelen hosszú, és benne a protonok eloszlása egyenletes, a protonok által a töltésünkre kifejtett erők eredőjének dróttal párhuzamos komponense 0 (a két oldalon lévő protonok ereje kiejti egymást.)

Vegyünk egy Q töltésű protont a drótban x távolságra a töltéspontunkból állított merőleges talppontjától. A töltésünkre ez a proton

$$k \frac{Qq}{r^2 + x^2}$$

Coulomb-erővel hat. Itt k a szokásos konstans, amelynek értéke körülbelül $9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2 \text{ c}^{-2}$). Az erő dróra merőleges komponense a nagyságának $r(r^2+x^2)^{-1/2}$ -szeresét teszi ki. Tehát a Coulomb-erő dróra merőleges komponensének nagysága

$$k \frac{rQq}{\sqrt{(r^2 + x^2)^3}}$$

Ha a drót összes protonjára összeadom ezeket a dróra merőleges komponenseket, akkor az eredő erőre

$$F_{\text{eredő}} = k r q \rho \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{(r^2 + x^2)^3}} dx. \quad (1)$$

adódik, ami $x = ry$ helyettesítéssel

$$k q \rho \frac{1}{r} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{(1 + y^2)^3}} dy \quad (2)$$

alakra írható át. Itt az

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{(1 + y^2)^3}} dy$$

határozott integrál konstans, ami történetesen 2-vel egyenlő. Tehát a Coulomb-erők dróra merőleges irányú eredője

$$F_{\text{eredő}} = \frac{2 k q \rho}{2}$$

Ugyanez a számítás természetesen igaz a vezetékben lévő elektronok által kifejtett Coulomb-erőre is.

A töltések nagysága mozgás során

Egy semleges drótban ugyanannyi proton és elektron van, így sűrűségük is ugyanannyi, tehát, ha egy töltést helyezünk a drót mellé, akkor a protonok és az elekt-

ronok hatása éppen kiejti egymást, így nem ébred a töltésre ható erő. Amikor áram kezd folyni, továbbra is azt tapasztaljuk, hogy az álló töltésre sem vonzó, sem taszító erő nem hat. Ebből azt a következtetést vonjuk le, hogy egy álló megfigyelő szemszögéből a drótban a protonok és az elektronok sűrűsége továbbra is megegyezik. A későbbiekből majd kiderül, hogy e feltételezés nem magától értetődő, de – megfigyelésünkre hivatkozva – igaznak tesszük föl.

Az elektronok az áramban v sebességgel mozognak. A protonok sűrűsége a saját szemszögükből ρ . Mivel mi a protonokhoz képest állunk, ezért sűrűségüket mi is ρ -nak látjuk. Korábban megállapítottuk, hogy az elektronok sűrűségét szintén ρ -nak látjuk. Viszont az elektronok hozzánk képest mozognak, azaz mi is mozgunk az elektronokhoz képest.

A speciális relativitáselméletből tudjuk, hogy így két elektron távolságát mi az elektronok által érzékelt távolság $(1-v^2)^{1/2}$ -szeresének érzékeljük. Ez a hosszkontrakció jelensége. (A mértékegységeket úgy választottuk, hogy a fénysebesség 1 legyen.) Így szokványos sebességekre ez a $(1-v^2)^{1/2}$ -es szorzójú összehúzódnak nem látható. Most azonban, mint később látni fogjuk, mégis érzékelhető következményei lesznek. Tehát mi az elektronok sűrűségét $(1-v^2)^{-1/2}$ -szeresének érzékeljük, mint maguk az elektronok. Így az elektronok szerint az ő saját sűrűségük kisebb: $(1-v^2)^{1/2}\rho$.

Most w sebességgel kezdünk futni a dróttal párhuzamosan (w előjeles mennyiség). A futó megfigyelő úgy látja, hogy a protonok távolsága $(1-w^2)^{1/2}$ -szeresére változik, tehát a protonok sűrűségét $(1-w^2)^{-1/2}\rho$ -nak látja. Az elektronokhoz képesti sebességünk nem egyszerűen $w-v$, ahogyan a szokványos fizikában megszoktuk. A relativitáselmélet sebességek összeadására vonatkozó szabálya szerint az elektronokhoz képesti sebességünk:

$$\frac{w-v}{1-vw}$$

(Ez is egy olyan jelenség, amit általában közvetlenül nem érzékelünk, mivel vw értéke elhanyagolhatóan kicsi, ha úgy vesszük föl a mértékegységeket, hogy a fénysebesség 1 legyen.)

Az elektronok a saját sűrűségüket $(1-v^2)^{-1/2}\rho$ -nak érzékelik, és mi ennek

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{w-v}{1-vw}\right)^2}}$$

részét látjuk. Tehát a w sebességgel futó megfigyelő szemszögéből az elektronok és a protonok sűrűségének különbsége:

$$\rho \left(\sqrt{\frac{1-v^2}{1 - \left(\frac{w-v}{1-vw}\right)^2}} - \frac{1}{\sqrt{1-w^2}} \right). \quad (3)$$

Mivel

$$1 - \left(\frac{w-v}{1-vw} \right)^2 = \frac{(1-2vw+v^2w^2) - (w^2-2vw+v^2)}{(1-vw)^2} = \frac{(1-v^2)(1-w^2)}{(1-vw)^2},$$

ezért

$$\rho \left(\frac{1-v^2}{\sqrt{1-\left(\frac{w-v}{1-vw}\right)^2}} - \frac{1}{\sqrt{1-w^2}} \right) = \rho \left(\frac{1-vw}{\sqrt{1-w^2}} - \frac{1}{\sqrt{1-w^2}} \right) = \rho \frac{-vw}{\sqrt{1-w^2}},$$

ami a szokványos mértékegységekre átírva a

$$\frac{-vw}{c^2} \rho = \frac{-vw}{c\sqrt{c^2-w^2}} \rho$$

kifejezést adja.

Az elektronok sűrűsége (az álló szemszögéből) szorozva az elektronok sebességével nem más, mint az egységnyi idő alatt áthaladó elektronok száma, azaz az áramerősség. Vagyis $\rho v = I$, így a protonok és az elektronok sűrűségének különbsége a w sebességgel futó megfigyelő szemszögéből:

$$\frac{Iw}{c\sqrt{c^2-w^2}}.$$

Az $(c^2-w^2)^{-1/2}$ -es szorzót szokványos w sebességeknél konstans $1/c$ -nek becsülhetjük.

Tehát a megfigyelő a sűrűségek különbségét

$$\frac{Iw}{c^2} \text{-nek}$$

látja, amely mind az I áramerősséggel, mind a w sebességgel egyenesen arányos.

A Lorentz-erő származtatása

A cikk elején szereplő számításokra hivatkozva, a dróttól r távolságra, a dróttal párhuzamosan w sebességgel haladó q töltésre ható Coulomb-erők eredője

$$\frac{2kq \frac{Iw}{c^2}}{r}.$$

Amint említettük, k körülbelül $9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2\text{c}^{-2}$ értékű, míg c^2 jó közelítéssel $9 \cdot 10^{16} \text{ m}^2\text{s}^{-2}$, így a töltésünkre ható, a drótra merőleges Coulomb-erők eredője jó közelítéssel

$$2 \cdot 10^{-7} \frac{qIw}{r}.$$

Másrészt a Lorentz-erő nagysága w sebesség szorozva q töltéssel és szorozva a mágneses térerősséggel. A mágneses térerősség a vezetőtől r távolságra pedig

$$\frac{\mu_0 I}{2\pi r},$$

ahol μ_0 konstans és értéke körülbelül $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ TmA}^{-1}$. Tehát a Lorentz-erő nagysága

$$wq \frac{4\pi \cdot 10^{-7} I}{2\pi r} = 2 \cdot 10^{-7} \frac{qIw}{r}.$$

Ugyanazt az eredményt kaptuk, vagyis valójában a Lorentz-erő nem más, mint a töltésre ható Coulomb-erők eredője, figyelembe véve a speciális relativitáselmélet szabályait.

Melléktermékként az is kijött, hogy a Lorentz-erő általánosan használt képlete nagy w sebesség mellett már nem pontos, ekkor ugyanis az elhanyagolt

$$\frac{1}{\sqrt{1-\frac{w^2}{c^2}}}$$

szorzóval is számolni kell.

A lektor megjegyzése

A szerzőnek kijött a numerikus egyezés, azaz a k konstans és c^2 értéke, valamint a μ_0 között kapcsolat van, ami nem véletlen. Egyetemi tananyag az elektromágneses sugárzás tárgyalása kapcsán, hogy

$$c^2 = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0} \text{ és } k = \frac{1}{4\pi \epsilon_0},$$

tehát fennáll a

$$\frac{k}{c^2} = \frac{\mu_0}{4\pi}$$

összefüggés.

Simon Ferenc
BME

XXII. ORSZÁGOS SZILÁRD LEÓ FIZIKAVERSENY – 1. rész

Sükösd Csaba
BME Nukleáris Technika Tanszék

A 22. Országos Szilárd Leó Fizikaverseny 2019. első negyedévében rendezte meg az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, a Magyar Nukleáris Társaság, a Szilárd Leó Tehetséggondozó Alapítvány, valamint a döntő helyi szervezői: az Energetikai Szakgimnázium és Kollégium és a Paksi Vak Bottyán Gimnázium. A verseny anyagi feltételeit a szervezőkön túl a Nemzeti Tehetségprogram, valamint az EMMI és a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Nukleáris Technikai Intézetének támogatása biztosította.

Ebben az évben új színfoltot jelentett a Paksi Vak Bottyán Gimnázium bekapcsolódása a döntő helyi szervezésébe. Ezért külön is köszönet illeti *Csajági Sándor* igazgató urat. Erre később, a döntő ismertetésekor még visszatérünk.

Az elődöntőt 2019. február 25-én rendeztük, amikor a regisztrált tanulóknak a saját iskolájukban 3 óra alatt 10 elméleti versenyfeladatot kellett megoldaniuk.

A versenyre összesen 207 diák regisztrált az ország 29 iskolájából. Ezek között 6 budapesti iskola volt (103 tanulóval), a többiek vidékről jelentkeztek. Ennek alapján a regisztrált tanulók fele Budapestről, másik fele vidékről jött.

A versenyre – a hagyományoknak megfelelően – két kategóriában jelentkezhetnek a középfokú oktatásban tanulók:

I. kategória: azok a tanulók, akik a verseny évében, vagy az azt követő évben érettségiznek (tipikusan 11–12 osztályos tanulók). Megoszlásuk: 87 fiú és 20 lány.

II. kategória: a fiatalabbak (tipikusan 9–10 osztályos tanulók). Megoszlásuk: 85 fiú és 15 lány.

A fiúk és a lányok aránya mindkét korcsoportban benne van az $5,0 \pm 0,7$ intervallumban. Öröndetes, és az utánpótlásra nézve biztató, hogy a regisztrált versenyzők nagyjából fele-fele arányban oszlottak meg a két korcsoport között.

Az alábbiakban az elődöntő feladatait és a feladatok megoldását ismertetjük.

1. feladat

kitűzte: *Ujvári Sándor*

Egy lezárt dobozban ötvözetet helyeznek el, amely kétfajta, azonos anyagmennyiségű (azonos számú ato-



Sükösd Csaba (1947) a BME címzetes egyetemi tanára, az ELFT elnökségi tagja. Kísérleti magfizikus, aki kísérleti munkáját nagyrészt külföldi kutatóintézetekben végezte. Kutatási területe a magreakciók, óriásrezonanciák és némely asztrofizikailag releváns magreakció vizsgálata radioaktív ionnyalábokkal. Marx György tanítványaként részt vett a 70-es évek MTA oktatási kísérletében. Azóta is szoros kapcsolata van a fizikatanárok közösségével, több tanár- és oktatóval kapcsolatos program vezetője.

mot tartalmazó) fémről készült. Mindkét fém radioaktív, az egyik (*A*) felezési ideje 12 év, a másiké (*B*) 18 év. Amikor a dobozt kibontották és az ötvözetet elemezték, az *A* és *B* fém anyagmennyiségének aránya $N_A/N_B = 53/220$ volt. Mennyi idős volt az ötvözet?

Megoldás

Mivel kezdetben mindkét anyagból ugyanannyi atom van, ezért a két anyagra vonatkozó bomlás-egyenlet:

$$N_A(t) = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_A}} \text{ és } N_B(t) = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_B}}.$$

Itt T_A , illetve T_B a két felezési idő.

Vegyük a két egyenlet hányadosát és a kapott egyenlet (tetszőleges alapú) logaritmusát:

$$\log\left(\frac{N_A}{N_B}\right) = \log\left(2^{-t\left(\frac{1}{T_A} - \frac{1}{T_B}\right)}\right) = -t\left(\frac{1}{T_A} - \frac{1}{T_B}\right) \cdot \log 2.$$

Ebből t egyszerűen kifejezhető, és az adatok behelyettesítése után kapjuk:

$$t = -\frac{\log(53/220)}{\log 2} \cdot \frac{12 \cdot 18}{6} \text{ (év)} = 73,92 \text{ év.}$$

2. feladat

kitűzte: *Halász Máté*

A Nap sugara 695 700 km, felszíni hőmérséklete 5778 K.

a) Számítsuk ki a Nap átlagos térfogati teljesítménysűrűségét (W/m^3)! Értelmezzük az eredményt!

b) Hány proton alakul a Napban héliummá másodpercenként?

c) Mekkora ezen protonok együttes tömege?

A σ Stefan–Boltzmann-állandó $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$ értékű.

Megoldás

a) A Nap által kisugárzott teljesítményt (másodpercenként kisugárzott energiát) kifejezhetjük egyrészt a keresett teljesítménysűrűséggel, másrészt a Stefan–Boltzmann-törvény segítségével:

$$P = \rho_p \frac{4\pi}{3} R^3 = (4\pi R^2) \sigma T^4.$$

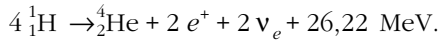
Ebből a keresett ρ_p térfogati teljesítménysűrűség egyszerűen kifejezhető:

$$\rho_p = \frac{3}{R} \sigma T^4 = 0,2725 \text{ W}/\text{m}^3.$$

Azért kaptunk ilyen kis értéket, mert a fúziós teljesítmény 99%-a a Nap térfogatának csak igen kis részé-

ben, a magban (a teljes térfogat kisebb, mint 1%-ában) szabadul fel, másrészt pedig a fúziós folyamat-lánc egyes lépései igen lassúk.

b) A Nap energiatermelése fúziós folyamatokkal történik, amelyek eredményeképpen (több ágon és több lépcsőn keresztül) végül 4 protonból lesz egy hélium atommag:



Innen a másodpercenként héliummá alakuló protonok száma ($\varepsilon = 26,22 \text{ MeV}$):

$$N = 4 \frac{P}{\varepsilon} = 3,66 \cdot 10^{38}, \text{ itt } P = \rho_p \frac{4\pi}{3} R^3.$$

c) A proton tömegével megszorozva kapjuk:

$$m = Nm_p = 6,12 \cdot 10^{11} \text{ kg}.$$

3. feladat

kitűzte: *Papp Gergely*

A Curiosity Mars-járó áramellátásáról egy Radioizotópos Termoelektromos Generátor (RTG) gondoskodik. A generátor hőforrása 8 darab, indításkor egyenként 0,5 kg tisztán alfa-bomló ${}^{238}_{94}\text{PuO}_2$ töltet. Az elektromos átalakítás hatásfoka, $\eta = 6,25\%$.

a) Hány watt az RTG elektromos teljesítménye induláskor?

b) Hányad részére esik ez a teljesítmény a Marshoz érkezés pillanatában, ha az út 253 napig tart?

A ${}^{238}_{94}\text{PuO}_2$ felezési ideje, $T_{1/2} = 87,7 \text{ év}$, alfa-energiája, $E_\alpha = 5,593 \text{ MeV}$, valamint a PuO_2 moláris tömege 276 g/mol .

Megoldás

a) Ha feltételezzük, hogy a bomláshő kizárólag az alfa-bomlásból ered (eltekintünk a magvisszalökődéstől, egyéb sugárzásoktól és a spontán hasadástól), akkor a bomláshő a reakciógyakorosság és az α -energia szorzataként kapható meg.¹

Tömegegységre ($m = 1 \text{ kg}$) vetítve a teljesítmény:

$$P = E_\alpha N \lambda = E_\alpha \frac{m N_A}{M} \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = 489,4 \frac{\text{W}}{\text{kg}} \approx 500 \frac{\text{W}}{\text{kg}}.$$

A Curiosity-n kezdetben $8 \cdot 0,5 = 4 \text{ kg}$ töltet van, azaz a termikus teljesítmény jó közelítéssel $1957,6 \text{ W} \approx 2 \text{ kW}$, az elektromos teljesítmény pedig $122,36 \text{ W} \approx 125 \text{ W}$.

b) A teljesítmény csökkenése a bomlásgörbéből

$$\frac{P_M}{P_0} = 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}} = 99,44\%.$$

A változás nagyjából 0,5%, ami szinte elhanyagolható (ez már a felezési időből is sejthető volt).

¹A magvisszalökődés szintén melegíti az anyagot, ezért elhanyagolásának nem említése elvi hiba. Természetesen a megoldás akkor is helyes, ha valaki azt is figyelembe veszi.

4. feladat

kitűzte: *Szűcs József*

Egy 5 amperes olvadóbiztosíték kör keresztmetszetű olvadószálának átmérője d . Mekkora lesz a biztosíték teherbírása, ha az ugyanabból az anyagból készült olvadószálat azonos hosszúságú, $2d$ átmérőjűre cseréljük ki? (Tegyük fel, hogy a szálak hőleadása a hengerpalást mentén, tisztán hőszugárzás útján történik.)

Megoldás

A biztosíték akkor olvad meg, ha hőmérséklete a T olvadáspont fölé emelkedik. Egyensúlyban a keletkező Joule-hő elvezetéséről a feladat szövege alapján a hőszugárzás gondoskodik. Matematikailag

$$P_\Omega = I^2 R = I^2 \left(\rho \frac{l}{d^2 \pi / 4} \right) = d \pi l \sigma T^4.$$

Itt a jobb oldal a sugárzás által leadott teljesítmény a Stefan-Boltzmann-törvény alapján.

Ugyanezt felírhatjuk a $2d$ átmérőjű szálra is, majd a két egyenletet egymással osztva kapjuk:

$$\frac{I_1^2 \rho \frac{l}{d^2 \pi / 4}}{I_2^2 \rho \frac{l}{(2d)^2 \pi / 4}} = \frac{d \pi l \sigma T^4}{2 d \pi l \sigma T^4} \Rightarrow 4 \left(\frac{I_1}{I_2} \right)^2 = \frac{1}{2}.$$

Ebből kapjuk:

$$I_2 = I_1 \sqrt{8} = 14,14 \text{ A}.$$

5. feladat

kitűzte: *Tarján Péter*

A ${}^{211}_{83}\text{Bi}$ mag radioaktív, 64% valószínűséggel β^- -bomlással, 36% valószínűséggel α -bomlással alakul át. A bomlás során megmaradt bizmutatomok száma 60,55 percenként feleződik (azaz a felezési idő 60,55 perc).

a) Milyen atommagok keletkeznek a bomlások során?

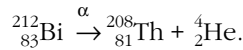
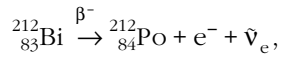
b) Mekkora az alfa- és a béta-bomlások felezési idejei (T_α és T_β) külön-külön?

c) A bizmut hány százaléka bomlik el $T_\alpha + T_\beta$ idő eltelte után?

Megjegyzés: Egy többféle módon is bomlani képes radioaktív atommagnál beszélhetünk a különféle típusú bomlások időegységre eső valószínűségéről külön-külön is. Ezek a „részleges” bomlási valószínűségek, vagy részleges bomlási állandók. Mivel a különböző bomlások egymástól függetlenül, véletlenszerűen következhetnek be, ezért a teljes időegységenkénti bomlási valószínűség ezen részleges bomlási valószínűségek összegeként adódik: $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_N$. (Az időegységre eső bomlási valószínűségek mértékegysége: 1/s.)

Megoldás

a) A bomlások a következőképpen zajlanak, innen leolvashatók a keletkezett atommagok:



b) A részleges bomlási állandókra a következő két összefüggés igaz:

$$\lambda_\alpha + \lambda_\beta = \lambda, \text{ valamint } \frac{\lambda_\beta}{\lambda_\alpha} = \frac{64}{36}.$$

Ezekből kapjuk: $\lambda_\beta = 0,64 \cdot \lambda$ és $\lambda_\alpha = 0,36 \cdot \lambda$.

Mivel

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T} = 0,687 \frac{1}{\text{h}},$$

ezért

$$\lambda_\alpha = 0,36 \cdot \lambda = 0,247 \frac{1}{\text{h}} \Rightarrow T_\alpha = \frac{\ln 2}{\lambda_\alpha} = 2,81 \text{ h},$$

$$\lambda_\beta = 0,64 \cdot \lambda = 0,440 \frac{1}{\text{h}} \Rightarrow T_\beta = \frac{\ln 2}{\lambda_\beta} = 1,58 \text{ h}.$$

c) $T_\alpha + T_\beta = 4,39 \text{ h}$. Azaz ennyi idő alatt

$$\frac{N(t)}{N_0} = 2^{-\frac{t}{T}} = 0,049.$$

Végeredményben a bizmut 4,9%-a megmarad, tehát 95,1%-a elbomlik.

6. feladat

kitűzte: *Sükösd Csaba*

A CERN LHC gyorsítócsövében protonok száguldanak azonos sebességgel. Egy-egy proton mozgása elektromos áramerősséget jelent, így a párhuzamosan futó protonok olyanok, mint párhuzamos vezetőkben egy irányba futó áramok. Ezekről pedig tudjuk, hogy vonzzák egymást. Ugyanakkor pedig a protonok – azonos elektromos töltésük lévén – taszítják is egymást. Vajon melyik hatás az erősebb? Indokoljuk meg a választ! (*Megjegyzés:* a feladatban a pálya görbültségétől és a protonok gyorsításától tekintünk el, azaz vegyük úgy, mintha a feladatban szereplő kölcsönhatások nélkül a protonok egyenes vonalú egyenletes mozgást végeznének.)

Megoldás

Az eredménynek inerciarendszertől függetlennek kell lennie, ezért inerciarendszernek válasszuk a protonokkal együttmozgó rendszert! E rendszerben csak elektrosztatikus taszítás van, hiszen a töltések nyugalomban vannak. Ezért a laboratóriumi rendszerben is a taszítóerőnek kell nagyobbnak lennie, mint a párhuzamos áramok közötti vonzóerőnek. (Az itt leírtak teljes megoldásnak számítanak. A diákoktól nem kérjük az alábbi levezetést, csak az összehasonlítást!)

Természetesen ezt ki is lehet számítani. Fussanak a protonok egymástól d távolságra, lineárisan egyenle-

tes töltéseloszlással (azonos szakaszokon ugyanannyi proton legyen). Számítsuk ki a protonnyalábok közötti taszítóerőt, és a protonnyalábok által reprezentált I áramerősségű egyenes vezetők közötti mágneses vonzóerő hányadosát!

Vegyünk egy $L \gg d$ hosszúságú protonnyalábrészt. Ez N protont tartalmaz, amelyek összes töltése $Q = Ne$. Hengerszimmetria miatt az elektromos térerősség d távolságban (Gauss-törvényből kiszámítva):

$$E = \frac{Ne}{L} \frac{1}{2\pi\epsilon_0 d}.$$

Ekkor a két nyaláb egymással szemben lévő L hosszúságú részei között fellépő taszítóerő:

$$F_{el} = ENe = \frac{1}{\epsilon_0} \frac{(Ne)^2}{2\pi dL}.$$

Másrészt felírhatjuk az L hosszúságú, egyenes, áramjárta vezetők közötti mágneses vonzóerőt is. Az áramerősség írható úgy, mint

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{Ne}{\frac{L}{v}},$$

ahol v a protonok sebessége. Így a fellépő mágneses erő

$$F_m = \mu_0 \frac{I^2}{2\pi d} L = \mu_0 \frac{(Ne)^2}{2\pi dL} v^2.$$

A két erő hányadosára tehát írhatjuk:

$$\frac{F_m}{F_{el}} = \frac{\mu_0 \frac{(Ne)^2}{2\pi dL} v^2}{\frac{1}{\epsilon_0} \frac{(Ne)^2}{2\pi dL}} = \mu_0 \epsilon_0 v^2 = \frac{v^2}{c^2} < 1,$$

ahol kihasználtuk, hogy $\mu_0 \epsilon_0 = 1/c^2$. Mivel a protonok sebessége mindig kisebb, mint a vákuumbeli fénysebesség, ezért a vonzó mágneses erő mindig kisebb, mint a taszító elektromos erő.

7. feladat

kitűzte: *Ujvári Sándor*

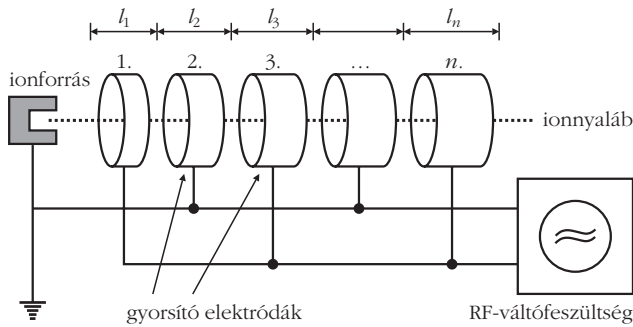
2 MeV energiájú proton lép egy lineáris gyorsítóba, aminek 597 (fémből készült, üreges, hengeres) gyorsító elektródáját (driftcső) egy 200 MHz frekvenciájú oszcillátor működteti. A végső energia 300 MeV. A proton tömege $m_p = 938 \text{ MeV}/c^2$.

a) Milyen hosszú a második driftcső?

b) Milyen hosszú az utolsó előtti?

c) Hány driftcsőre lenne szükség, ha 500 MeV energiát szeretnénk elérni?

Megjegyzés: a gyorsítás szakaszosan történik az elektródák (driftcsövek) közötti hézagokban. Mivel az elektródák fémből vannak, belsejükben az elektromos térerősség nulla (Faraday-kalitka), így nincs gyorsulás



sem. A gyorsítási folyamat akkor optimális, ha a töltött részecske minden hézagban újra gyorsul, azaz, ha két, egymást követő hézagba lépés között éppen félperiódusnyi idő telik el. A hézagközök és elektródák hosszának alkalmas megválasztásával elérhető, hogy a szakaszos gyorsítás egyenlő energiaadagokban történjen. A driftcsövek közötti hézagot – ahol a gyorsítás történik – a driftcsövek hosszához képest tekintsük elhanyagolható szélességűnek.

Megoldás

597 driftcső 596 hézagot jelent. A hézagonkénti energianyereség tehát

$$\frac{300 - 2}{596} = 0,5 \text{ MeV.}$$

a) A második driftcsőben a sebesség még nem relativisztikus, tehát írhatjuk, hogy

$$E_1 = \frac{1}{2} m v_1^2,$$

amiből

$$v_1 = \sqrt{\frac{2 E_1}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (2 + 0,5) \text{ MeV}}{938 \text{ MeV}/c^2}} = 0,073 \cdot c,$$

ahol c a fénysebesség. A driftcső hossza a részecske sebességéből és a periódusidőből

$$l_1 = v_1 \frac{T}{2} = \frac{v_1}{2f} = 5,48 \text{ cm.}$$

b) Az utolsó előtti driftcsőben már feltehetően relativisztikus sebességgel mozog a proton. A proton teljes energiája $E = (938 + 299,5) \text{ MeV} = 1237,5 \text{ MeV}$. Mivel

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

ebből kapjuk

$$v = c \sqrt{1 - \left(\frac{m_0 c^2}{E}\right)^2} = 0,652 \cdot c.$$

Ebből az (a) ponthoz hasonlóan kapjuk:

$$l_{n-1} = \frac{v_{n-1}}{2f} = 48,9 \text{ cm.}$$

c) Ha 500 MeV energiát szeretnénk elérni, ahhoz további $(500 - 300)/0,5 = 400$ driftcsőre lenne szükség, azaz összesen $400 + 597 = 997$ driftcsőre.

8. feladat

kitűzte: Halász Máté

Arthur Askin az 1970-es években fejlesztette ki a fénynyomás elvén alapuló optikai csipeszt (más néven lézercsipeszt), amely egy erősen fókuszált lézernyaláb segítségével mikroszkopikus részecskék háromdimenziós mozgatására alkalmas eszköz, és amelynek kifejlesztéséért 2018-ban fizikai Nobel-díjat kapott. A fellépő erők és nyomások nagyságrendjének érzékeltetésére határozzuk meg egy 520 nm hullámhosszú, 50 mW teljesítményű lézer által kifejttet (a) erőt és (b) fénynyomást, ha a lézernyalábot hullámhossznyi átmérőre fókuszáljuk!

Megoldás

a) A lézernyaláb által kifejttet erő a teljesítményből számolható:

$$F = \frac{\Delta I}{\Delta t} = k \frac{n \frac{h\nu}{c}}{\Delta t} = k \frac{P}{c},$$

ahol fekete testre $k = 1$, tökéletesen tükröző testre pedig $k = 2$. A következőkben fekete testre számolunk. Az erő tehát:

$$F = \frac{P}{c} = 1,67 \cdot 10^{-10} \text{ N.}$$

b) A lézer által kifejttet nyomás a nyaláb hullámhosszával megegyező átmérőre történt fókuszáláskor:

$$p = \frac{F}{\left(\frac{\lambda}{2}\right)^2 \pi} = 786,4 \text{ Pa.}$$

9. feladat

kitűzte: Papp Gergely

Vegyünk egy, a Nap felszínéről kirepülő protont.

a) Mekkora minimális kinetikus energiára van szüksége (eV egységekben), hogy elhagyhassa a Naprendszer?

b) Mekkora hőmérsékleten ekkora a részecskék átlagos energiája?

A Nap sugara 695 700 km, a proton tömege $m_p = 1,673 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$. Csak a Nap gravitációs terét vegyük figyelembe, a bolygók gravitációs hatásától tekintsünk el. A megoldáshoz szükséges további adatokat keressük ki a függvénytáblázatból! (Figyelem! A táblázatban található szökési sebesség a Föld pályájáról indulva érvényes!)

Megoldás

A feladat nem adta meg a Nap tömegét. Függvénytáblázatból: $M = 1,989 \cdot 10^{30}$ kg. Egy végtelenbe „éppen elszökött” részecske mozgási energiája és potenciális energiája is nulla lesz. A mozgás során viszont a két mechanikai energia összege állandó marad, ezért bármely pillanatban is:

$$\frac{1}{2} m v^2 - \gamma \frac{m M}{r} = 0.$$

Ezért ha $r = r_N$, azaz éppen a Nap felszínéről indul, akkor

$$v = \sqrt{\frac{2 \gamma M}{r_N}} = 6,178 \cdot 10^5 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 617,8 \frac{\text{km}}{\text{s}}.$$

Ebből a proton mozgási energiája:

$$E_p = \frac{1}{2} m_p v_p^2 = 3,192 \cdot 10^{-16} \text{ J} = 1992,5 \text{ eV},$$

ahol kihasználtuk, hogy $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

b) Feltételezhetjük, hogy a protonok a Nap belsejében már „szabadon” (ideális gázként) mozognak, és ekkor egy részecske átlagos mozgási energiája:

$$E_{\text{átlag}} = \frac{3}{2} k T.$$

Ebből a hőmérséklet:

$$T = \frac{2 E_{\text{átlag}}}{3 k}.$$

Behelyettesítve: $T \approx 1,54 \cdot 10^7 \text{ K}$.

10. feladat

kitűzte: Tarján Péter

Egy üreges acélgömb belsejében $5 \text{ kg } ^{209}\text{Po}$ -ot helyezünk el, majd a gömböt a világűrbe juttatjuk egy olyan pályára, amelyen a Föld mindig árnyékolja a Napot.

a) Mekkora lesz a gömb állandósult hőmérséklete kezdetben?

b) Adjuk meg, hogy hogyan változik a hőmérséklet az idő függvényében!

A gömb sugara 10 cm , a ^{209}Po α -bomló, felezési ideje $125,2 \text{ év}$, az egy bomlásban felszabaduló energia $7,98 \cdot 10^{-13} \text{ J}$, a gömb külsejének reflexióképessége $0,8$.

Megoldás

Az alfa-bomlásban felszabaduló energia nagyobb részét az alfa-részecske, kisebb részét a visszalökődő atommag viszi el mozgási energia formájában. Mindkét részecske mozgási energiája néhány mm úthozsзон belül hővé alakul. Emiatt az acélburkolaton keresztül nem szöknek meg részecskék, a bomlási hő a gömb anyagát melegíti. A gömb a világűrben (a Naptól leárnyékolva) csak hősugárzás révén tud energiát veszíteni, a mikrohullámú háttérsugárzás ($T = 2,7 \text{ K}$) elnyeléséből nyert energia elhanyagolható. Hőmér-

sékleti egyensúlyban tehát a bomlásból származó hő teljesítményének és a hő formájában kisugárzott teljesítménynek meg kell egyeznie.

a) A bomlásból származó hő teljesítménye:

$$P_{\text{bom}} = \frac{\Delta N}{\Delta t} Q = \lambda N Q = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \frac{m_0}{M} N_A Q = 2017 \text{ W}.$$

A sugárzási teljesítmény a Stefan–Boltzmann-törvény és Kirchhoff sugárzási törvénye alapján:

$$P_{\text{sug}} = (1 - r) A \sigma T^4.$$

Ebből

$$T = \sqrt[4]{\frac{P_{\text{sug}}}{(1 - r) 4 \pi R^2 \sigma}},$$

ahol R a gömb sugara, $r = 0,8$ a reflexióképessége, $A = 4 \pi R^2$ a gömb felszíne. Kihasználva, hogy $P_{\text{sug}} = P_{\text{bom}}$, és az adatokat visszahelyettesítve kapjuk: $T = 1091 \text{ K}$. (Ezen a hőmérsékleten a polónium már olvadt állapotban van, de az acél még nem.)

b) A gömb hőmérséklete idővel csökken, mert azonos időtartamok alatt egyre kevesebb bomlás történik. A termelt teljesítmény a polónium felezési idejének megfelelően csökken. A fentiek alapján

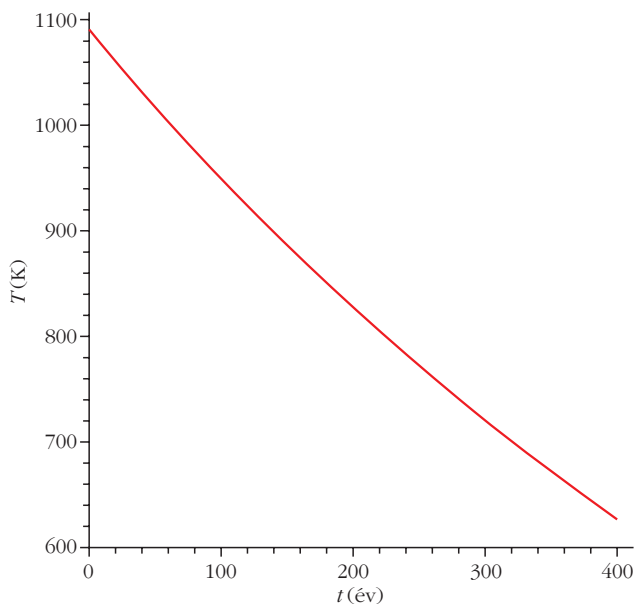
$$T(t) = \sqrt[4]{\frac{P_{\text{bom}}(t)}{(1 - r) 4 \pi R^2 \sigma}} = \frac{1}{C} [P_{\text{bom}}(t)]^{\frac{1}{4}},$$

ahol

$$C = [(1 - r) 4 \pi R^2 \sigma]^{\frac{1}{4}},$$

valamint

$$P_{\text{bom}}(t) = P_{\text{bom}}(0) 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}},$$



ezért

$$T(t) = \frac{1}{C} [P_{\text{bom}}(0)]^{\frac{1}{4}} 2^{-\frac{t}{4T_{1/2}}} = T(0) 2^{-\frac{t}{4T_{1/2}}}.$$

Tehát a hőmérséklet is exponenciálisan csökken, azonban a negyedik gyök miatt csak négyszer hosszabb felezési idővel.

Az elődöntő eredményei

A korábbi szokásoknak – és a versenykiírásnak – megfelelően a dolgozatokat a versenyzők fizikatanárai javították először a küldött pontozási útmutató alapján. Az I. kategóriás versenyzők 60%-nál, a II. kategóriás versenyzők 40%-nál nem kisebb eredményt elért dolgozatait postán eljuttatták a BME Nukleáris Technika Tanszékére, ahol egy egyetemi oktatókból álló csoport ismét átnézte és – szükség esetén – felüljavította a dolgozatokat. A BME-re 24 első és 18

második kategóriás dolgozat érkezett. Ez a korábbi évekhez képest jelentősen kevesebb, és arra utal, hogy az elődöntő feladatai nehezebbek voltak a korábban szokásosoknál. A legkönnyebb az 1. feladat volt, az erre kapott pontszámok átlaga 4,98 (maximum 5). A legnehezebbnek a 6. feladat bizonyult, itt a pontszámok átlaga 2,52 volt az I. kategóriánál, és 0,85 a II. kategóriánál. Azonban meg kell jegyezni, hogy még erre a feladatra is volt 5 pontos dolgozat mindkét kategóriában(!), ami azt jelzi, hogy a feladat középiskolai ismeretekkel mégis megoldható volt.

A pontszámok szerinti rangsor alapján az első kategóriában az első 20 tanulót, a második kategóriában pedig az első 10 tanulót hívta be a Versenybizottság a 2019. április 7–9. Pakson rendezett döntőbe. Érdekes megjegyezni, hogy míg az I. kategória 20 behívott diákjából körülbelül a fele (11 tanuló) volt budapesti, addig a II. kategóriásoknál csak 3 budapesti tanuló került be a döntőbe, a többi 7 tanuló vidékről jött.

Folytatjuk.

SZÓRAKOZTATÓ FIZIKA

HUMOR A TUDOMÁNYBAN, TUDOMÁNY A HUMORBAN

Horváth Dezső
Wigner FK

Általános szabály, hogy az okos ember hülyéskedik, a hülye meg okoskodik. Okoskodást olvasunk eleget, nézzük meg, mit hülyéskednek tudós kollégáink. Az ötletet kedvenc olvasmányaim, a Vagabund kiadó viccgyűjteményei adták: *Hallók Ákos* 16 kötetnyi viccet gyűjtött, kötetenként 1000-nél több viccel. Ha van is némi átfedés közöttük, akkor is legalább 1500 viccről van szó. Találtam közöttük jó néhány olyant, amely némi matematikai vagy fizikai előképzettség nélkül nemigen értékelhető, azután találtam még jó néhány hasonlót másutt is, leginkább a világhálón, íme egy rövid fizikusválogatás (és lesz még jópár).

Hogyan tekinti a fizikus a többi tudományt?

Biológia: ragadós-nyúlós fizika.

Geológia: hosszú lejárátú, lassú fizika.

Számítástechnika: virtuális fizika.

Pszichológia: emberes fizika.

Kémia: bűdös fizika.

Matematika: öncélú fizika.

Fizikusok bújócskáznak a másvilágon. *Newton* rajzol egy $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ -es négyzetet és beleáll. *Einstein* meglátja és odakiált: „Látlak, Newton”. Mire Newton: „Vesztettél Einstein, Pascal vagyok!”

Heisenberg autót vezet és megállítja a rendőr.

– *Tudja maga, milyen gyorsan ment?*

– *Nem, de azt pontosan tudom, hol vagyok.*

Hallottad, hogy már az entrópia sem a régi?

Az elméleti fizikus működési szabályzata:

1. Mihelyt sikerül kijávanod egy számítási hibát, felbukkan egy másik.

2. Minél jobb az eredményed, annál nagyobb valószínűséggel utasítja el a folyóiratod, viszont a hibásat azonnal közlik, hogy mások észrevehessék.

3. Minél hosszabb a cikked, annál valószínűbb, hogy számítógéped merevlemeze az irodalmi hivatkozások bevitelénél hal meg.

4. A másoktól átvett eredmények között lesz egy hibás.

5. A legjobb elméleted csak kettőnél kevesebb dimenzióban érvényes.

6. Amint összejön egy érdekes új részecskefizikai modell, az megjósol egy olyan részecskét, amelyet az elvégzett kísérletek már kizártak.

Igaza van a fizikatanáromnak: a közeledő autók fénye fehér, a távolodóké vörös.

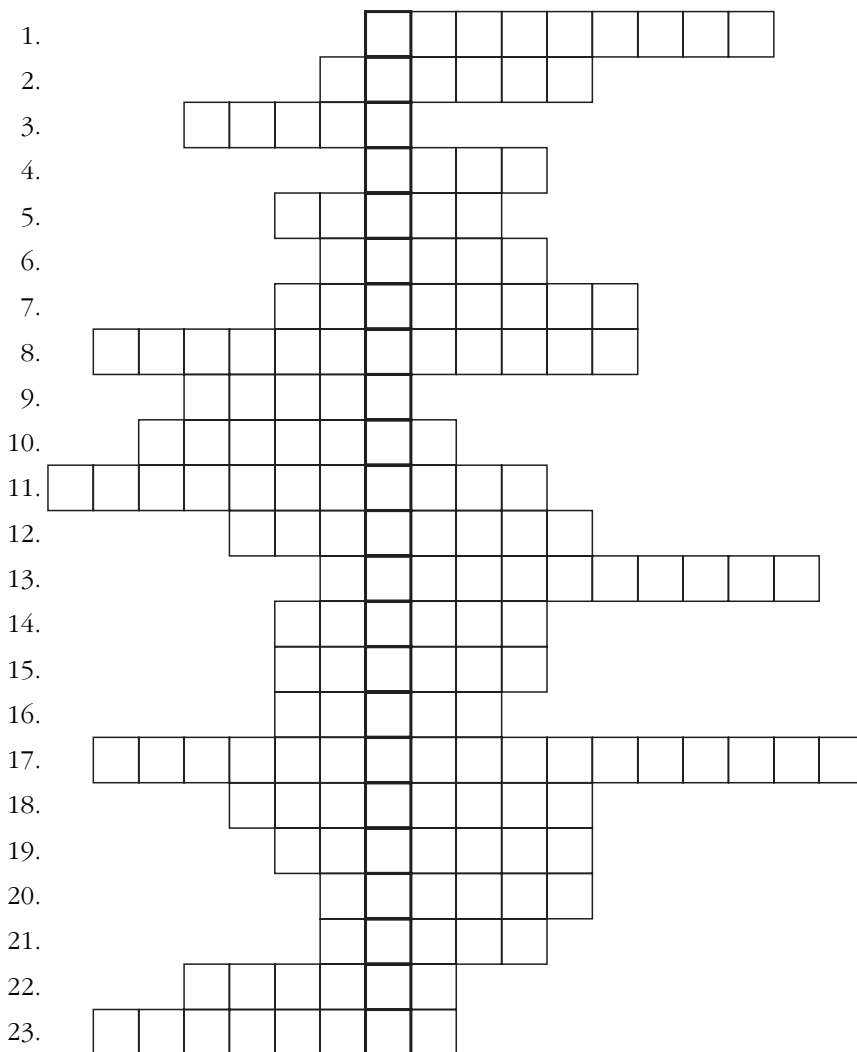
Finta András (1928–2009) fizikatanár-kollégámra emlékezve minden évben a végzős osztályok részére egy rejtvényt készítek, amelynek megfejtése *az a mondat, amit ő szokott a mondani minden órán.*

Finta András volt a matematika-fizika munkaközösség vezetője, amikor 1975-ben a Petrik Lajos Szakközépiskolába kerültem, mint frissen végzett matematika-fizika szakos tanár. Nagy tudású, rendkívül jó kísérletező, gyerekszerető tanár volt, akitől nagyon sokat tanultam. Szinte minden fizikatanári ankéton ott részt vett, saját eszközt mutatott be, díjakat nyert. Minden órához segített összeállítani a kísérletet, ha

kértem, elmondta, hogy ő miként szokta tanítani az adott anyagot. Ugyanakkor nagy szabadságot adott. Velem készítette el a tanmeneteket azokban az osztályokban, ahol tanítottam. Nagyon hangulatos, vidám órákat tartott, sokat tréfálgzott a diákokkal, amit szívesen én is hallgattam, a fizikaszertárban sokat mulattam lyukas óráimon. Szinte minden alkalommal elhangzott a a rejtvényben szereplő mondat, mindig valami gyakorlati problémához kötve az új anyagot. Megjegyeztem egy másik mondását is: „Mindig a legjobb meggyőződés szerint kell tanítani, nem kell azzal foglalkozni, hogy melyik kolléga mit szeretne hallani.”

Fizikarejtvény

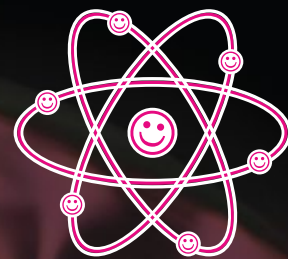
1. Ha a testre ható erők eredője nulla, akkor a test
állandó.
2. A gravitációs törvény felfedezője.
3. A tehetetlenség mértéke.
4. Az erő, amivel a test a függőleges felfüggesztést húzza, vagy a vízszintes alátámasztást nyomja.
5. Ha a felhajtóerő a test súlyával egyenlő, akkor a test a folyadék felszínén
6. Ha a folyadékba merülő test sűrűsége egyenlő a folyadék sűrűségével, akkor a test a folyadékban
7. Az út osztva az idővel az átlag.....
8. A megtett szögelfordulás osztva a megtételéhez szükséges idővel a
9. A mi galaxisunk.
10. Az ő egyik törvénye teszi lehetővé az aranyozást.
11. A villanymotor feltalálója.
12. A tárggyal azonos állású képet ad a
13. Az ernyőn fel nem fogható kép neve.
14. Az ő körfolyamata alapján működik a hőerőgép.
15. Két pólusa van.
16. Mariotte társa.
17. A fizika egyik legalapvetőbb törvénye az
18. Új atommag keletkezik, ha létrejön a
19. Saját fénye van.
20. A gravitációs erő is ilyen erő.



21. Térfogatmérték, ami éppen 1 dm^3 .
22. A fénytán görög eredetű neve.
23. A fajlagos töltés meghatározója.



Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat szervezésében



2020. ÁPRILIS 24-25. | A FIZIKA MINDENKIÉ 6.0



**A KORONAVIRUS-JÁRVÁNY
ELMÚLTÁVAL
MEGRENDEZZÜK!**



A fizika mindenkié 2020-ban is! A tiéd, miénk és mindenkié. Fizikázz a tanároddal, barátaiddal, szüleiddel; végezz kísérletet vagy építs új eszközt, hallgass vagy szervezz előadást! E két napban szóljon minden a fizikáról! Vegyél részt, regisztráld a programod és ünnepeljük együtt a fizika kérdéseit és csodás eredményeit! Hiszen a fizika segítségével adunk választ számos, a társadalmat érintő problémára, pl. energia, közlekedés, kommunikáció, környezetvédelem; amelyek mindannyiunk életét befolyásolják.
Mert a FIZIKA MINDENKIÉ!

Információért látogass el weboldalunkra:

AFIZIKAMINDENKIE.KFKI.HU



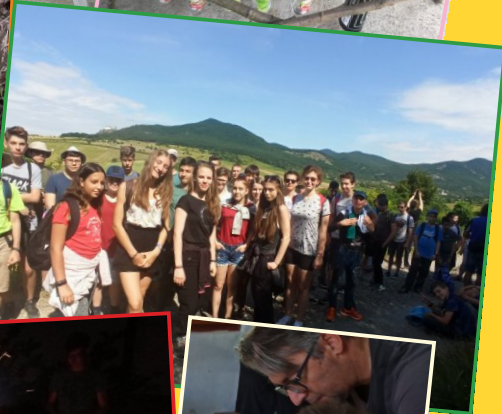
Támogatók:



2022 KREATÍV FIZIKA TÁBOR

A JÖVŐ MÉRNÖKEINEK TÁBORÁ

JÚL.
12-17.
PUSZTAFALU
Öregbence
Turistaház



Egy lenyűgöző környezetben megtartott, jól sikerült – elektronikai, robotépítő, programozó – tábor képei