

fizikai szemle

A photograph of the Space Shuttle Columbia being launched from the launch pad. The shuttle is oriented vertically, with a large plume of white smoke and fire trailing behind it. The launch pad structure is visible on the right, and a yellow service structure is on the left. The sky is blue with scattered white clouds.

2020/6

2020 KREATÍV FIZIKA TÁBOR

A JÖVŐ MÉRNÖKEINEK TÁBORA

elektronikai, robotépítő és
programozó foglalkozások és más
érdekes program egy lenyűgöző
környezetben



kreatív, csapatépítő és szabadidős
foglalkozások közül válogathatsz

3D-tervezés, -programozás és -nyomtatás
látványos fizika kísérletek, bemutatók és
gyakorlati foglalkozások

RÉSZVÉTELI DÍJ: 39600 Ft

JÚL.
12-17.

Építs eszközöket a fizika segítségével!

A fizika, technika, természet és informatika iránt
érelklődő 5-8. osztályos diákok számára,
és 8-12. osztályosok számára a Zemplénben

fizikai projektek, trükkös fizika, fizika a mindennapokban,
fizika a zenében, fizika a hétköznapokban

PUSZTAFALU
Öregbence
Turistaház

további részletek: www.facebook.com/kreativfizika/

<https://kreativfizika.webnode.hu/>

Jelentkezés: beszedaimre@gmail.com vagy stonawskiegmail.com
Beszeda Imre, tel.: 06 20 419 0224 vagy Stonawski Tamás 06 20 460 3552



ÚRÜGYEK

Mostani számunkban több cikk is az űrkutatáshoz és űriparhoz kapcsolódik. Az induló cikk *Bay Zoltán* 1987 augusztusában tartott előadásának átirata (köszönet *Kádár Györgynek* az anyagért és *Almár Ivánnak* a lábjegyzetekért és a megjegyzésekért), ezzel tisztelegve Bay Zoltán emléke előtt születésének közelgő 120. évfordulója alkalmából. 33 évvel ezelőtti előadásában Bay Zoltán némileg szomorúan állapítja meg, hogy a Challenger „ingajáratú űrhajó” felrobbanása (1986. január 28.) óta már másfél éve az Egyesült Államokban nem bocsátottak fel űrhajót. Napjainkban sok szó esett arról a sokkal hosszabb szünetről az amerikai űrhajózás történetében, ami az utolsó Amerikából pályára juttatott, embereket szállító űrhajó 2011-es indítása és a SpaceX Crew Dragon 2 május 30-i startja között telt el. Tulajdonképpen nehéz megérteni, hogy miért olyan nagy esemény az, hogy a világ vezető technológiai hatalma 9 év után újra képessé vált olyasmire, amit már 30-40 évvel ezelőtt is tudott. Ebben nyilván nem kis szerepe van annak, hogy az USA a hírgyártásban és marketingben is világszínvonalra emelkedett. (Mi sem vontuk ki magunkat a hatása alól, lásd címlapunkat.) Ugyanakkor a szakértők elismerik, hogy a Dragon 2 rengeteg lényeges technikai fejlesztést tartalmaz, ami *Elon Musk* Hold- és Marsutazásokat előkészítő víziójának megvalósulásához vezethet. (Számunk megjelenésekor a NASA még nem minősítette utasszállításra alkalmas járműnek a Dragon 2-t, e minősítés megszerzéséhez még több hétig tartó, kritikus műszaki és biztonsági ellenőrzéseknek kell megfelelnie. Ha ez sikerrel zárul, akkor augusztusban elindulhat a Crew-1 három amerikai és egy japán űrhajóssal a Nemzetközi Űrállomás felé.) A május 30-án indult misszió azonban csak akkor tekinthető majd sikeresnek, ha a két űrhajós a 110 napra tervezett utazás után épségben visszatér a Földre.

Talán nem mindenki tudja, hogy a SpaceX-et alapító – igaz némileg pályaelhagyó – fizikus kollégánk, *Elon Musk* 1971. június 28-án Pretoriában született dél-afrikai állampolgárként. Viszonylag fiatalon eldöntötte, hogy az USA-ba akar eljutni, ahol a nagyjelentőségű újítások jobban megvalósíthatók, mint bárhol máshol a világban. Ezért előbb kanadai édesanyja révén a kanadai, majd Kanadából továbbmenve az USA állampolgárságot is megszerezte. Egyetemi tanulmányait Pretoriában kezdte 17 éves korában, majd a kanadai Queen's University-re járt, végül a Pennsylvaniai Egyetemen szerzett 1995-ben közgazdasági és fizikusi BA, illetve BS alaplétszámát. 1995-ben a kaliforniai Stanford Egyetemen PhD tanulmányokra jelentkezett, ahol fel is vették az energetikai fizika és anyagtudomány programra, azonban az információtechnológiai forradalmat észlelve úgy döntött, hogy inkább üzleti vállalkozásba kezd. Így fivérével, *Kimballal* megalapította a Zip2 web szoftver vállalatot, amit 1999-ben a Compaq vásárolt meg 340 millió dollárért. Ezután jött az X.com online bank, amiből később a PayPal lett, és amit az eBay vett meg 2002 októberében 1,5 milliárd dollárért. Nem sokkal korábban, 2002 májusában alapította a SpaceX űrkutatási vállalatot. Nem ő alapította, de 2004-ben csatlakozott az elektromos és önvezető autóirol ismert Tesla vállalathoz, amelynek 2008 óta ő az elnök-vezérigazgatója és főtervezője. A Wikipedia szerint Musk mérnök, ipari tervező, technológiai vállalkozó és filantróp. Számos egyéb vállalkozása mellett hozzá kötődik a *Neuralink* (beültethető emberi agy-számítógép interfészeket fejlesztő vállalat), az *OpenAI* mesterséges intelligenciákat kutató-fejlesztő laboratórium, vagy a *Hyperloop* (vákuumozott csőrendszerben történő utas- és áruszállítás) ötlete. Napjainkban kezdi meg működését a SpaceX Starlink műholdasinternet-hálózata, amit a csillagászok nem egyértelmű lelkesedése kísér, viszont több milliárd olyan ember számára tenné lehetővé az internet elérését, akiknek erre egyébként nem lenne lehetőségük. Egy további víziója emberi település kialakítása a Marson, az emberiség kihalásának megelőzésére. A *Forbes* 2019-es „Amerika leginnovatívabb vezetői” listáján Musk az Amazont alapító *Jeff Bezos*-szal megosztva első helyezett. A világ autóiiparában leghosszabb ideje tölt be elnök-vezérigazgatói posztot. Vagyonát jelenleg 38,8 milliárd dollárra becsülik, amivel 31-ik a *Forbes* világ leggazdagabb emberei rangsorában. Vajon miért csak az USA-ban lesznek mindig Gatesek, Jobsok és Muskok?


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:

**Majd 9 év szünet után, 2020. május 30-án újból amerikai űrhajó szállít utasokat a Nemzetközi Űrállomásra. A start pillanatában kilenc Merlin hajtómű tolja magasba a Falcon-9 rakétát, miközben a visszaverődő hangrezgéseket abszorbeáló víz özönlük a startállás gödrébe.
(©Official SpaceX Photos)**

TARTALOM

<i>Lendvai János: Űrügyek</i>	181
<i>Bay Zoltán: A világűr kísérletek jövője</i> <i>Az 1987-es előadás a kísérletek jelentőségéről általában és az űrkutatás akkoriban előrelátható fejlődéséről szól.</i>	183
Az előadás-kézirat születési körülményeiről (<i>Kádár György</i>)	184
<i>Almár Iván: Megjegyzések Bay Zoltán kéziratához</i>	191
<i>Cseb József: A spontán szimmetriasértés és az atommagok deformációja</i> <i>Az atommagok deformációi mellett az írás a fizika más területeiről is felsorol példákat a szimmetriasértésre.</i>	193
<i>Horváth Gábor, Slíz-Balogh Judit, Horváth Dániel, Szabó Róbert: Az űrszemét égi mechanikája – 2. rész: A kisebb vagy a nagyobb űrszemét zuhan-e le előbb? Földre hulló, el nem égő vasgolyók dinamikájának modellezése</i> <i>Becslések és sok videoklippel szemléltetett modellszámítás űrszemétdarabok mozgásának jellemzésére.</i>	198

A FIZIKA TANÍTÁSA

<i>Gesztai Tamás, Jávora Márta: Hogyan tanítsuk a kovalens kötést?</i>	207
Schrödinger tigrise: a mozdulatlan mozgás <i>A fizika és kémia határán az egyszerre jobbra és balra ugró, és így egyhelyben álló tigrisnek van mozgási energiája.</i>	
<i>Radnóti Katalin, Hasznosi Tamásné: A diákok mint kis tudósok</i> <i>A bõtan témakör kutatás alapú feldolgozása és eredményei az általános iskolában.</i>	209

HÍREK – ESEMÉNYEK

In memoriam Farkas Győző (<i>Czitrovszky Aladár</i>)	216
--	-----

J. Lendvai: Space matters
Z. Bay: Future of space experiments
History of the lecture transcript (*Gy. Kádár*)
I. Almár: Comments on the manuscript of Zoltán Bay
J. Cseb: Spontaneous symmetry breaking and deformations of nuclei
G. Horváth, J. Slíz-Balogh, D. Horváth, R. Szabó: Celestial mechanics of space garbage – part 2

TEACHING PHYSICS

T. Gesztai, M. Jávora: How to teach covalent bonding? Schrödinger's tiger: the motionless motion
K. Radnóti, T. Hasznosi: Students as little scientists

EVENTS

In memoriam Gy. Farkas (*A. Czitrovszky*)

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

megjelenését támogatják:



A *Challenger* ingajaratú űrhajó¹ felrobbanása óta (1986. január 28.) a Cape Kennedy floridai rakétakilövő állomáson azelőtt nem tapasztalt csend uralkodik. Az Egyesült Államoknak eddig sok ezerre menő rakétaindítása most szünetel, de ez nem jelenti a kísérletezés feladását. Az állomást kiszolgáló iparok lázasan dolgoznak a kilövések technológiájának tökéletesítésén. A National Aeronautics and Space Administration (NASA) elkészült a Föld körül keringő űrlaboratórium² költség-előirányzatával, amely több mint 30 milliárd dollárra rúg. Az összegből körülbelül 10 milliárd a kibocsátások technikájának javítását és az űrben történő szerencsétlenségek esetén a kísérletező személyek megmentésének módjait szolgálja. A terv szerint az űrlaboratórium, amely az

edddigi Skylab pótlását, nagyobbítását és tökéletesítését célozza, a kilencvenes években kerül megvalósításra. A tervben benne van persze a Föld és az űrlaboratórium közötti közlekedést szolgáló ingajaratok tökéletesítése. Az előirányzat fő vonalaival az elnök tudományos tanácsadó bizottsága egyetért, és remélhető, hogy a költségvetést a Kongresszus elfogadja.

Örvendetes jelenségnek kell elkönyvelni, hogy a Kongresszus remélhetőleg végre ráébredt, hogy az űrkísérleteket támogatnia kell. Kiábrándító volt az utóbbi években az a renyhesség és szűkkeblűség, amely elzárkózott például a *Halley*-üstökös közéről való kipuhatólásától. Szerencsére a Szovjetunió, Japán és az európai államok pótolták az így előálló hiányt. Méltó, hogy a világ leggazdagabb állama továbbra is vállalja azt az élenjáró szerepet, amellyel az elmúlt évtizedekben az űrkutatást támogatta.

Az ilyen fajta kutatás eddigi sikere valóban bámulatra méltó. Bízvást mondhatjuk, hogy a Naprendszerben elért tudásunk 3 évtized alatt többet fejlődött, mint a *Galilei*, *Kepler*, *Newton* óta eltelt 3 évszázad alatt.

Mi az oka ennek a rohamos fejlődésnek? Nyilvánvalóan az, hogy a világűr kipuhatólásába be lehetett



Bay Zoltán előad 1981 májusában Budapesten, az MTE SZ Központi Asztronautikai Szakosztályának 4. Asztronautikai Tudományos Ülésszakán.

vezetni a kísérletezést. A természettudományok azóta fejlődtek ki, amióta az ember az ismeretszerzésben elkezdte a kísérletezést.

A klasszikus görög kultúra magas fokra jutott el az irodalomban, a képzőművészetekben, az építészetben, a geometriában, de a természettudományokban – a kísérletezés hiányában – megmaradt a kezdeti tapogatódzásoknál.

A kísérletezés módszere akkor indult el, amikor Galilei éles elméje észrevette, hogy a templomban a légáram által megmozgatott függőlámpa mindig azonos idő alatt végez egy lengést, függetlenül a kilengés nagyságától. Ezt nem tudták a régi görögök írásai és a reájuk épített skolasztikai tudomány. Tehát Galilei azt mondta, ha többet akarunk tudni, kérdezzük meg a természetet!

A kísérletezés bevezetése után mindjárt megvilágosodott annak két előnye:

1) a vizsgálandó folyamatot elkülönítjük a környezeti zavaró hatásától,

2) a kísérletet annyiszor ismételtetjük, ahányszor akarjuk. A többszöri ismétlés vezet rá, hogy a természeti jelenségek lefolyásában törvényszerűség van. E törvények megismerése a természettudomány célja és feladata.

Galilei olyan folyamatot indított el, amely nem állott meg: azóta a természettudományok mind a kísérletezésre épültek – egyetlen kivétellel.

A csillagászat a legújabb időkig nem tudta használni a kísérletezést, pusztán a megfigyelésre volt szorítva, mert a csillagászat tárgyai tőlünk messze vannak a világűrben. De nem lehetett kétséges, hogy ha a kísérletezés egyszer kiterjeszhető lesz a világűrre, attól rohamos fejlődés várható.

Az 1987-ben tartott előadásból született cikkben az űrkutatás akkori problémáiról, előzményeiről és a jövő lehetőségeiről esik szó. A kísérlet szót (amely tökéletesen illett 1946-os Hold-radar programjára) a szerző általánosan, mindenféle a világűrben végzett megfigyelésre és eseményre egyaránt használja. A magyar szaknyelv a világűr-kísérlet kifejezést nem használja. Az eredeti szövegben csak helyesírási és apró stiláris módosításokat hajtott végre a Szerkesztőség. Az írást *Almár Iván* lábjegyzeteivel közöljük.

¹Az „ingajaratú űrhajó” elnevezés a magyar szakirodalomban ismeretlen, űrrepülőgépeknek vagy űrsiklóknak nevezik.

²Mai magyar neve Nemzetközi Űrállomás (ISS).

A kísérletezésnek ezt a világűrre való kiterjesztését a radartechnika és a rakéatechnika kifejlődése hozta meg.

Amikor a második világháború folyamán, akkori tudományos elszigeteltségünkben, nehéz körülmények között, de a magyar lakosság és a magyar városok védelmének gondolatával, radartechnikánkat kifejlesztettük, elérkezettnek láttam az időt, hogy munkatársaimnak javasoljam: most, hogy egy új technika birtokába jutottunk, használjuk azt egy fundamentális fizikai feladat megoldására. Küldjünk mikrohullámú jeleket a Holdra, és észleljük azok visszaverődését. Ez 1944 tavaszán történt, s mindjárt el is kezdtük az elméleti vizsgálatokat és a szükséges műszerek megépítését. Az akkori idők viszontagságai és háborús pusztításai után végül is két év elteltével sikeres kísérleteket tudtunk végrehajtani.

Azóta sokan megkérdezték tőlem: mi indított engem erre a kísérletre, aki nem vagyok csillagász? Válaszom az volt, hogy bennem gyermekkoromtól fogva megvolt az érdeklődés a csillagos égből való tüneményei iránt.

Érdekes megemlíteni, hogy ugyanabban az időben volt valaki Amerikában is, aki nem volt csillagász, de akit hasonló módon vonzottak mindig (mint később megtudtam) a csillagos ég látványai: *J. H. Witt* műsza-

ki ezredes, az amerikai radartechnika egy kitűnő munkása. (Persze, ellenséges államok polgárai lévén, egymásról nem tudtunk.) Az amerikaiak 1946 január közepén, mi február elején végeztük az első sikeres kísérleteket. Az amerikaiak mikrohullámú felkészültsége jobb volt, viszont mi a „szegénységünket” olyan elv alkalmazásával pótoltuk, amely azóta általánosan elfogadott és használt: a jelisméltés és jelösszegzés módszere.

Az amerikai és a magyar holdradar-kísérletek nyomán a csillagászatnak egy új ága fejlődött ki az Egyesült Államokban, Angliában, Ausztráliában, Kanadában és a Szovjetunióban, a *radarcsillagászat*. Előbb a Naprendszer közeli bolygóit, utána a távoli bolygókat s azok holdjait ölelte fel a radarészlelés: sikeresen térképezte egyes bolygófelületek optikailag nem hozzáférhető részleteit.

Azelőtt el nem érhető pontossággal állapította meg a radarcsillagászat a bolygó- és holdpályák méreteit. A Nap-Föld-távolság (az úgynevezett asztronómiai egység, mintegy 150 millió kilométer) ma 1 kilométernél kisebb hibával ismeretes. A Föld és Hold között működő fényradar segítségével ma a Holdnak mindenkori tőlünk való távolsága (körülbelül 400 ezer kilométer) néhány centiméteres hibahatárral adható meg.

Az előadás-kézirat születési körülményeiről

Bay Zoltán 120 évvel ezelőtt, 1900. július 24-én született. A sorsom úgy hozta, hogy 1986–1987-ben két évig a George Washington University (Washington D.C.) vendégprofesszora voltam, és személyes jó viszonyba kerülhettem az amerikai fővárosban élő Bay Zoltánnal. 1987 augusztusában részt vehettem az Amerikai Egyesült Államokban és Kanadában élő magyarok „Magyar Baráti Közösség” nevű szervezetének szokásos évi összejövetelén, ahol Bay Zoltánt egy előadás megtartására kérték fel a szervezők. A 87 éves Bay professzor az előadáshoz elkészítette *A világűr-kísérletek jövője* című, mechanikus írógéppel szerkesztett kéziratát, és az Ohio állambeli Lake Hope (Reménység Tava) pihenőparkjában az észak-amerikai magyarok egyhetes találkozásán megtartotta előadását. Az ehhez készített kézirat egy példányát dedikálva feleségemnek, *Kádárné Nagy Annának* és nekem ajándékozta. Tudomásom szerint ez a gondolatokban gazdag írás eddig nyomtatásban nem jelent meg.

Bay Zoltán születésének 120. évfordulóján méltónak és igazságosnak tartom, hogy ez a 33 éve született, minden bizonnyal egyedi, gondolatokban gazdag, eddig nem publikált kézirat a *Fizikai Szemlében* nyilvánosságra kerüljön. A teljes faksimile kéziratot, annak címlapjára kattintva töltheti le a Tisztelt Olvasó.

Kádár György
kutató professzor emeritusz
EK Műszaki Fizikai és
Anyagtudományi Intézet

Annának és Györgynek
Bay Zoltán
Bay Zoltán, The American University,
Washington, D.C.

A világűr-kísérletek jövője.

at
A Challenger ingajáratu űrhajó felrobbanása óta (1986, január) a Cape Kennedy floridai rakétakilövő állomáson azelőtt nem tapasztalt csend uralkodik. Az Egyesült Államoknak eddig sok ezerre menő rakétakibocsátása most szünetel, de ez nem jelenti a kísérletezés feladását. Az állomást kiszolgáló iparok lázasan dolgoznak a kilövések technológiájának tökéletesítésén. A National Aeronautics and Space Administration (NASA) elkészült a Föld körül keringő űrlaboratórium költségelőkészítéssel, mely több, mint 30 milliárd dollárba kerül. Az összegből kb. 10 milliárd a kibocsátások technikájának javítását és az űrben történő szerencsétlenségek esetén a kísérletező személyek megmentésének módjait szolgálja. A terv szerint az űrlaboratórium, mely az eddigi Skylab pótlását, nagyobbítását és tökéletesítését célozza, a kilencvenes években kerül megvalósításra. A tervben benne van, persze, tökéletesítése az ingajáratoknak, melyek a Föld és az űrlaboratórium közötti közlekedést szolgálják. Az előirányzat fő vonalaival az elnök tudományos tanácsadó bizottsága egyetért és remélhető, hogy a költségvetést a Kongresszus is elfogadja.

Örvendetes jelenségnek kell elkönyvelni, hogy a Kongresszus remélhetőleg végre ráébredt, hogy az űrkísérleteket támogatnia kell. Kiábrándító volt az utóbbi években az a renyhesség és szűkkeblűség, mely elzárkózott pl. a *Halley* üstökös közelről való kiphatolásától. Szerencsére a Szoviet Unió, Japán és az európai államok pótolták az így előálló hiányt. Méltó, hogy a világ leggazdagabb állama továbbra is vállalja azt az élen járó szerepet, mellyel az elmúlt évtizedekben az űrkutatást támogatta.

Bay Zoltán eredeti kéziratának címlapja a Kádár Györgynek és feleségének szóló ajánlással.

Nagy ugrást jelentenek ezek és más hasonló eredmények a Naprendszer ismeretében. De ezeken kívül a radarcsillagászat elkönnyvelhet 3 olyan eredményt, amelyek már nem csupán csillagászati fontosságúak, hanem fizikai tudásunk alaperedményei is.

1) Bebizonyosodott, hogy a naptányér³ közelében elhaladó rádióhullámok az ottani erős gravitációs térben *késnek*. Igazolja ez az általános relativitáselméletnek azt az elgondolását, hogy a gravitáció a tér szerkezetének megváltozásával azonos értékű. Ha a gravitáció régi felfogása szerint azt mondanánk, hogy a fénynek tömege van és azt a Nap gravitációja gyorsítja, akkor a fénynek *sietnie* kellene, ellentétben a radarmegfigyeléssel. Tehát: a tér a Nap nagy tömege közelében „nemeuklideszi” (úgy is szokás mondani, hogy „görbült tér”), és a fénynek ott hosszabb utat kell bejárnia. Ez a kísérlet, amelyet *I. I. Szapiro* amerikai fizikus végzett el a Mars bolygóra leszállott *Viking* űrhajók⁴ segítségével, igazolja *Einstein* általános relativitáselméletét, de igazolja a magyar *Bolyai János* is, kinek egy több mint 100 évvel ezelőtti kéziratában *Toró Tibor* temesvári elméleti fizikus a következő kijelentést fedezte fel: „... a nehézkedés törvénye szoros összeköttetésben mutatkozik az űr természetével.” Bolyai János tehát nemcsak első volt a nemeuklideszi geometria gondolatával, de megsejtette annak a természetben való jelentőségét is.

2) Bebizonyosodott, hogy a Föld és a Hold a Nap gravitációs terében egyforma gyorsulással esnek. A Föld és Hold között működő fényradar említett igen pontos méréseit analizálva *K. Nordtvedt* amerikai fizikus a két igen különböző test gyorsulásait megegyezőnek találta, és rámutatott, hogy ez az eredmény *Eötvös Loránd* földi kísérleteinek egy celesztialis⁵ méretekre való kiterjesztését jelenti: a gravitációs és a tehetetlen tömeg azonos.

3) Bebizonyosodott, hogy annak dacára, hogy a Naprendszerünk a Galaxisban igen nagy sebességgel (körülbelül 300 kilométerrel másodpercenként) mozog, a rendszer két pontja (bolygója) között mért egyirányú fénysebesség *invariáns* (független a rendszer sebességétől). Betetőzése ez azoknak a földi kísérleteknek, amelyek a speciális relativitáselmélet empirikus megalapozására szolgáltak, de amelyek ezt az invarianciát nem tudták bizonyítani.

A radarkísérleteknek az űrre való kiterjesztése után rövidesen megindult az űrkísérletek⁶ másik faja: rakétáknak az űrbe való kibocsátása.

A nagyfokú technológiát, amely ahhoz szükséges, csupán a két szuperhatalom tudta kifejleszteni: az Egyesült Államok és a Szovjetunió. Az Egyesült Államok rakétasorozatai⁷ az *Apollo*, *Pioneer*, *Mariner*,

Viking, *Voyager* nevet viselték. A Szovjetunió rakétákat bocsátott ki a Hold, Mars, Vénusz felé, utóbbiak neve *Venera*⁸ és *Vega*.

Legismertebb az űrrakéták között az embereket a Holdra juttató *Apollo* sorozat. (Az utasokat vivő rakéták költsége 50-100-szorosa a műszereket a világűrbe kivívó űrhajóknak, mert előbbiek sok óvintézkedést és igen bonyolult és biztos számítástechnikát igényelnek.) Mindkét nagyhatalom fenntart egy viszonylag nem nagy magasságban (néhány száz kilométer) keringő űrlaboratóriumot,⁹ főleg annak kikísérletezésére, hogy az emberi szervezet hogyan reagál a hosszú ideig tartó súlytalanságra. Fontos ez a későbbi emberi utazásokra, ha bolygók meglátogatására fog sor kerülni.

Az *Apollo* misszió keretében már összesen 12 emberünk járt a Holdon. Értékes holdanyagot hoztak vissza, amelynek laboratóriumi kipróbálása még tart, s információkat hozhat a Hold geológiájának és a Naprendszer keletkezésének megértésére. Ez a misszió az előkészítés, tervezés és kivitelezés diadala volt. Amikor a Holdra leszállott kisebb űrhajó visszatért a Hold körül keringő nagyobb egységhez (amely azután az utasokat hazahozta), másodpercnyi pontossággal és a felemelkedés technikájának rendkívül szűk határok közötti alkalmazásával kellett elérni, hogy a két jármű a Hold körüli térben találkozzék. Olyasmi volt ez, mint a cirkuszi trapézművészek mutatványai, hogy egymást a különböző kötélíngák lengései közben elérjék. Az *Apollo-13* járaton a Hold közelében egy nem várt robbanás meghiúsította a leszállást, s lenn a Földön technikusok és laikusok lélegzetvisszafojtva várták, mi fog történni. Végül is az ottani és a földi irányítók lélekjelenléte és intézkedései megmentették a misszió 3 utasát: azok épen hazajöttek. Sokan azt mondtuk akkor, talán ez nagyobb teljesítmény volt, mint a Holdra leszállás.

A többi említett űrhajósorozat¹⁰ nem embereket, hanem műszereket vitt a Naprendszer bolygóihoz. A rádióval visszajelentett információk tömegének feldolgozása még folyik, de máris érdekes kép van kialakulóban a Naprendszer keletkezéséről.

Hogy Naprendszerünk (és mi magunk is) egy *nóvák* és *szuperenovák* által a világűrbe kilövellt gáztömegből alakult ki, nem kétséges. Mialatt ez a gáztömeg a gravitáció következtében összehúzódott, felmelegedett. A gáztömeg közepén alakult ki a Nap, s a Nap közelében levő melegebb gáztömegben kondenzál(ód)tak a nehéz fémek és fémvegyületek. Ezért a Naprendszer belső bolygóinak nagy a sűrűsége, míg a külső bolygók főképpen könnyebb elemeket tartalmaznak.¹¹ A belső bolygók a könnyű elemeket, fő-

³A magyar szakirodalomban napkorong.

⁴Az ember nélkül közlekedő, bolygóközi űrjárműveket nem űrhajóknak, hanem űrszondának nevezzük.

⁵Magyarul égi.

⁶Egy hordozórakéta indítása ebben a korszakban már nem tekinthető rakétakísérletnek (űrkísérletnek se).

⁷Ezek nem rakéták, hanem a velük végrehajtott űrprogramok nevei.

⁸Magyarul Venera.

⁹Valójában akkor még csak a Szaljut-7 és a Mir űrállomások keringtek a Föld körül.

¹⁰Helyesen űrszonda.

¹¹Azóta az exobolygók tömeges felfedezése kiderítette, hogy a mienktől nagyon eltérő bolygórendszerek is léteznek a Tejútrendszerben. Ezért a Naprendszer keletkezésének korábban elfogadott elmélete aligha lehet általános érvényű folyamat.

képpen a hidrogént, még keletkezésük után elvesztik, különösen, ha kis tömegük nem tudja azokat gravitációval visszatartani. A Merkúrnak és a Holdnak ezéért nincs légköre.

Azt lehetne gondolni, hogy a Vénusz, Föld, Mars, amelyek egyforma tömegűek s amelyek a Nap sugárzásában is nagyjából egyforma módon részesülnek, hasonló klímát élveznek. Mégis, a Szovjetunió *Venera* űrhajói és az amerikai *Mariner-2* azt tanúsítják, hogy a Vénuszt forró, sűrű légkör veszi körül (90–100 atmoszféra nyomáson és 450 °C hőmérsékleten). Példája ez egy elszabadult „üvegház”-effektusnak: a széndioxid-légkör áttereszti a Nap látható sugárzását, de visszatartja a bolygó infravörös kisugárzását.

A Vénuszt a sok hasonlóság miatt szokás a Föld iker-testvérének is nevezni, de ezek a legújabb űrvizsgálatok megmutatták, hogy a wagneri ária „édes alkonycsillaga” a földi ember „pokol” elképzeléséhez jár közelebb: a forró sűrű széndioxid-légkörben kénsav- és fluorsav-eső esik a bolygó felületére, amelynek hőmérsékletén megolvad az ólom. A Vénusra leejtett *Vega* műszerpróbák egy-két óra hosszúig „éltek”, de azalatt értékes információkat jelentettek vissza a Földre.

Mi van a Föld másik iker-testvéreivel, a Mars bolygóval?

Schiaparelli olasz csillagásznak múlt századi megfigyelései és látomásai óta az emberi képzeletet Mars-csatornák és Mars-lakók népesítik be.

Az Egyesült Államok két *Viking* missziót küldött a Marsra, főképpen azzal a céllal: keressenek ott életmegnyilvánulásokat. Mindkét misszió tökéletes volt technikailag; a Mars körüli keringésre beállított űrhajók¹² kisebb műszerhajókat¹³ küldtek le, amelyek sikeresen leszállottak a bolygó felületére, és kísérleteket végeztek a Földről jövő utasításokra. A műszerhajók fotográfiái bizony nem mutattak a gép körül ólálkodó Mars-lakókat, de még a talajból felvett anyagok kémiai vizsgálata sem árult el semmi olyan anyagcsérét, amelyet a legegyszerűbb biológiai „élet”-nek lehetne nevezni.

A Marsnak igen ritka, főleg széndioxidot tartalmazó légköre van (a légnyomás mintegy fél százaléka a mi atmoszféránknak). A bolygófelület ma sivatag, de olyan hegyekkel és völgyekkel, amelyek arra mutatnak, hogy a múltban erőteljes vízfolyások alakították a felszínt. Ha a Marsnak a múltban tengerei és folyamai voltak, persze az sincs kizárva, hogy élet volt a bolygón, amelynek nyomai megtalálhatók lesznek további missziók révén. Az Egyesült Államok a 90-es évekre tervez egy Mars-megfigyelő és -térképező missziót. Kiterjedtebb vállalkozás van tervezés alatt a Szovjetunióban. A 2000. évvel kezdődően 6 űrhajó fog menni a Marshoz, amelyek léggömbökkel műszereket ejtenek le a felületre.¹⁴

¹²űrszondák

¹³A „műszerhajók” nem használt kifejezés, magyarul „leszálló egység”.

¹⁴A tervek időközben módosultak, de több amerikai űrszonda működik Mars körüli pályán, illetve a Mars felszínén.

A Mars geológiájának és esetleges múltbeli életjelenségeinek további megismerése arra az időre vár, amikor majd emberek fognak oda utazni és adatokat gyűjteni.

A Naprendszer külső bolygóinak és azok holdjainak eddigi megismerése a *Pioneer-10* és *-11*, főleg azonban a *Voyager-1* és *-2* misszióknak köszönhető.

Megfelelően a bolygórendszer kialakulása fent mondott elméletének, a hideg világműködésben csupán a könnyű elemek tudtak kondenzálni, ezért a Naptól távolos bolygók főleg hidrogént, héliumot, metánt, ammóniákat, széndioxidot tartalmaznak.

A hatalmas ismeretanyagból, amely az ember birtokába jutott, s melynek részletei még feldolgozásra várnak, kiemeljük, hogy

1) A Jupiternek erős mágneses tere van, több mint 10-szer erősebb, s 100-szor messzebbre kiterjedő, mint a Földé.

2) A Jupiternek s az Uránusznak is vannak gyűrűi, nem csak a Szaturnusznak, melynek gyűrűi a Földről könnyen láthatók.

Érdekes megemlíteni, hogy a *Voyager* űrhajók¹⁵ hogyan kaptak addicionális sebességet, hogy elérjék a külső bolygókat. Ha a Földről való alkalmas irányítással az űrhajót a Jupiter erős gravitációs terében engedjük esni, az felgyorsul. Ha a Jupiter állana az űrben, az űrhajó ezt a sebességtöbbletet elveszítené, miközben a Jupitertől eltávolodik. De ha közben a Jupiter mozdul el a pályáján, a nyert sebességtöbblet nemvész el (nevezzük ezt magyarosan gravitációs paritityának¹⁶).

A *Voyager-2* így érte el az Uránuszt 1986-ban, s így fogja elérni a Neptunuszt 1989-ben. Utána kijut a csillagközi térbe, s pályáját folytatja megszakítás nélkül, míg esetleg egy más csillag bolygói között értelmes lények elfogják.

Említésre méltó, hogy ezt a parititya-elvet a jövő világműurasai is használhatják olyan gyorsításra, amelyben ők „súlytalanok” maradnak, tehát semmi olyan erős behatásnak nem lesznek kitéve, mint a rakétamotorral való gyorsítás esetén.

A közelmúlt űrkutatósi eredményei között érdekes volt a *Halley-üstökös* már említett megközelítése a Szovjetunió, Japán és az európai államok kiküldött műszerei által.

Halley angol csillagász *Newton* kortársa volt. A múltbeli feljegyzéseket visszakövetve az időben, észrevette, hogy a Földet 76 évenként látványos üstökös látogatta meg. A pályaelemeket is egybevetve rájött, hogy egyazon égitestnek hosszúra nyúlt ellipszispályájáról van szó, amely a földközeltől a Neptunusz távolságáig terjed. Megjósolta a következő visszatérés idejét, amit ő ugyan már nem fog megélni, de ami tényleg be is következett. Utána ez a visszatérő üstökös a *Halley* nevet kapta.

Az üstökösök megjelenését az emberi babona félelemmel szokta fogadni. Minket, magyarokat érdekel,

¹⁵űrszondák

¹⁶Magyarul általában hintamanővernek nevezzük.

hogy a *Halley*-üstökös megjelent Nándorfehérvár híres ostroma idején 1456-ban. Szerencsére nem Hunyadi harcosaira, hanem a török seregre hozott „katasztrófát”.

Nagyon látványos volt ez üstökös 1910-es megjelenése, mert akkor a földközélemben haladt el. Én visszaemlékszem, hogy egy májusi hajnalon az üstökös farka¹⁷ a fél eget beborította. Mivel csillagászok megállapították, hogy május 19-én a Föld áthalad az üstökös farkán, amely cianvegyületeket is tartalmaz, megszületett a jóslat: elpusztul a világ. Gyulaváriban ezen csak mosolyogtunk, mert a magyar sajtó a témát értelmesen kezelte, mondva, hogy az üstökös igen ritka sűrűségű gázai ellen a Föld légköre teljes védelmet nyújt. Nem volt ilyen egyértelmű az amerikai közönség reakciója. Voltak, akik befüggönyözték ablakukat, ajtóikat; voltak, akik pirulákat árultak a mérges gázok ellen; egy túlfűtött képzeletű középnyugati szekta ártatlan szüzlányt akart feláldozni, hogy az üstökös gonosz szellemét kiengesztelje, de ennek szerencsére véget vetett a seriff megjelenése.

Az üstökös 1986-os visszatérése nem volt olyan látványos, mint az 1910-es. Én magam, aki ugyan büszke lehettem volna, hogy az üstököst másodjára látom, inkább kiábrándítónak éreztem, hogy a washingtoni csillagdába kellett elmennem, hogy lássam.

De annál érdekesebbek voltak az űrvizsgálati eredmények: az üstökös magja mintegy 15 kilométer hosszú és 8 kilométer széles krumpli alakú test. A nyert tapasztalatok alapján mai elgondolásunk az, hogy az üstökös mag „szennyes hógolyó”. A „hó” megfagyott vizet, szén-dioxidot és ammóniákat jelent, a „szenny” pedig igen kis koncentrációban azokat a nehéz elemeket, amelyek a világműködésben,¹⁸ amiből alakultunk, jelen vannak. Az üstökösök megismerése ennél fogva fontos adatokat szolgáltat a világműködés összetételére és a Naprendszer keletkezésére.

Ha a szennyes hógolyó a Nap közelébe jut, a felülete párolgás által anyagot veszít. Az elpárolgott atomokat és molekulákat a Nap sugárnyomása és a Napból kiáramló *ion-szél* a napközélemből kifelé fújja. Így képződik az üstökös farka, amely mindig a Nappal ellentétes irányba mutat.



Nem kell optimistának lennünk, hogy az eddigi sikerek után a világműkísérletek hathatós folytatását reméljük. De a részletek tekintetében csak olyasmi jóslást tehetünk, mint amikor valaki azt mondja áprilisban: hogy milyen idő lesz holnap, azt nem tudom, de abban biztos vagyok, hogy néhány hónapnyi meleg időjárás jön.

Biztosabbak lehetünk a kísérletek nyomán felvetéhető perspektívában: az ember olyan lépés megtételéhez jutott el, amely a földi életben eddig csak egyszer történt, amikor az élet a tengervízből, ahol megszületett, kijött a szárazföldre. Ez mintegy félmilliárd évvel

ezelőtt történt. *John Platt* bostoni biofizikus jóbarátom mutatott rá arra, hogy az ember most hasonló elhatározó lépés előtt áll.

A biológusok túlnyomó többsége egyetért abban, hogy a földi élet a tengervízben keletkezett. Bennünk vannak mai napig ennek emlékei. Szemünket még ma is sós ízű könnyekkel, tengervízzel mossuk. Sejtjeink fiziológiás oldata lényegében tengervíz.

A világűrbe kilépve az ember most is magával viszi földi környezetét, atmoszféráját, táplálékait, amelyek lassú megváltozásnak, az űrhöz való alkalmazkodásnak lesznek alávetve. Miért gondoljuk, hogy ez így lesz? Miért lesz az így kialakuló élet fejlődőképesebb, szabadabb?

A mi életünk a szárazföldön magasabb rendűvé fejlődött, mint a vízben maradt élet, mely csupán a halak értelmi fejlettségéig jutott el.

A szárazföld azt adta nekünk, hogy kiszabadultunk a tengervíz „börtönéből”, nagyobb mozgékonyásra, könnyebb energiafelvételre tettünk szert.

Könnyű a párhuzamot követni. Amikor *Kopernikus* a Földet a többi bolygók közé sorolta, az ember önértetén ütött csorbát: bezárta a teremtés koronáját a kis földgolyó „börtönébe”. Galilei elmélyítette a képet, miáltal szorosabbra zárta a börtönajtót, azért kellett visszavonnia tanait. Az akkori ember számára könnyebb volt elhessegetni, ignorálni a tudást, nem hinni el a bizonyítékokat, mint örökre bezárva lenni.

De miért örökre? Az akkori ember nem merte elképzelni, hogy a börtönajtó valaha kinyitható lesz. S ez az, amihez ma elérkeztünk.

A Holdra való menetel után már tervek, elgondolások vannak a bolygókhoz való utazásra. Az ember a világűrben sokkal könnyebb mozgékonyásra tesz szert, mint a Földön. Tanúi voltunk, hogy az űrhajókból az asztronauták kiléptek, és tápvezeték, „köldökzsinór” nélkül tudtak a közelben sétálni és az űrhajóba visszatérni, miközben csupán egy gyöngé nitrogéngáz-sugár volt szükségük az ide-oda való mozgásra. Nemrégiben kozmonauták hártottak el egy technológiai akadályt a Mir szovjet űrállomás és a felküldött, utánpótlást vivő űrhajó között, 4 órai munkavégzéssel az űrben.

A napsugárzást az ember az űrben könnyű energiafelvételre használhatja a Föld fellegei és éjszakai nélkül. De használhatja a mozgás meggyorsítására is. A Nap sugárnyomásával vitorlázni lehet az űrben. Használhatók gyorsításra az említett gravitációs parittyák is. Leghatásosabbak lesznek a nukleáris energiával hajtott rakétamotorok.

A nukleáris energia úgyszólván korlátlan bősége (amelynek felhasználása nem fizikai, hanem technológiai kérdés) lehetővé teszi a Hold és a Mars lakhatóvá tételét is, ha a jövő embere az ott lévő kőzetekből nitrogént és oxigént tartalmazó légkört hoz létre. Még a kis tömegű (tehát gyöngé gravitációs erejű) Holdon is az egyszer létrehozott légkör sok ezer éven át megmarad, mert mindig csak az igen nagy sebességű, de kis számban jelenlevő molekulák tudnak onnan elszabadulni.

¹⁷Magyarul az üstökösnek nem „farka”, hanem „csóvája” van.

¹⁸A „világműködés” kifejezés nem használatos a magyar csillagászati nyelvben, de érthető, hogy a szerző mire gondolt.

Az ember tehát csinálhat magának lakóhelyet a Naprendszer bolygóin vagy holdjain, de a világűrbe való kitelepedésnél ez csak ideiglenes segítség lenne az ember ma tapasztalt exponenciális (hatványozott) túlszaporodása ellen.

Visszaemlékezem ezzel kapcsolatban néhány beszélgetésemre *Szent-Györgyi Alberttel*.

A társadalmi problémákra fogékony Albertet két téma állandóan és visszatérően foglalkoztatta.

Egyik, persze, az *atomveszély*. A 60-as és 70-es években erről több előadást tartott, legtöbbször arra a végkövetkeztetésre jutva, és azt meg is mondvá, hogy nem tudunk végleges és biztos módot találni a veszély elhárítására.

Amikor én azt kérdeztem tőle, miért nem megoldás az atomfegyverek közmegegyezéssel és nemzetközi ellenőrzéssel való kiküszöbölése, válasza az volt, hogy az ilyen megegyezés lehetősége reménytelen.

A Föld népei között mindig akadnak olyanok, amelyek önmagukat a többi népek fölött állóknak képzelelik. Igaz, a német „Herrenvolk” már elvesztette a háborút, s egyelőre visszaszorult, de lesznek mindig, akik a többi népek fölött uralkodni akarnak, a többieket arra igyekeznek megszervezni, hogy nekik dolgozzanak. Természetesen a többiek ellenszegülnek, s így keletkeznek a háborúk.

Sokszor elmondta: sovány vigasz, ha azt mondjuk, hogy a Világegyetemnek mindössze egy kicsiny bolygójáról van szó, ahol az fog történni, hogy a kialakult élet megszűnik, de alig várhatunk mást.

Amikor a 70-es évek folyamán egy technológiai elgondolásokban ötletes tervet publikáltak a világűrben létesítendő kolóniákról, elmondtam Albertnek, hogy ez a terv reménysugarat nyújthat arra, hogy az emberi nem mégis meg tudja menteni önmagát.

A terv abban állott, hogy az űrben hatalmas lakóhelyek építhetők fel, amelyeket akár világvárosoknak is nevezhetünk. Hogy a Földnek nemcsak a légkörét, de mezőit, hegyeit is átvigyük az űrbe, hatalmas, néhány kilométer átmérőjű és sok kilométer hosszú henger belső felületén létesülne az űrkolónia. A henger tengely körüli forgása centrifugális (azaz gravitációs) erőt létesít, s természetesen a henger atmoszférikus nyomású levegővel volna megtöltve. Ez a terv a mai ember biológiájához van alkalmazva, még csak súlytalanságot sem kíván a kivitelezése, nem tenné szükségessé semmiféle új természettörvény felfedezését. Technológiai felkészültséget igényelne s azt, hogy ezt a hatalmas méretű lakóhelyet, persze, kinn az űrben kellene felépíteni. Az anyagát nem szükséges a Földről vinni, ki lehetne azt termelni a kisbolygókból, amelyeknél könnyű volna megküzdeni azok gyöngye gravitációjával.

Albertnek a tervet elmondva rámutattam, hogy ez segíthet egy olyan kérdésben, amely eddig megoldhatatlannak látszott: az emberiség exponenciális szaporodásában.

Ez volt a második téma, amelyről fentebb mondtam, hogy Albertet tartósan foglalkoztatta. Egyszer kongresszusi hívásra el is jött Washingtonba, hogy a témával kapcsolatos kérdésekre válaszoljon.

E téma félelmes volta abban áll, hogy az exponenciális függvény növekedése a már elért számmal arányos. Az emberek száma napjainkban eléri az 5 milliárdot, s az évi szaporodás ennek a számnak felel meg, tehát most 25 százalékkal nagyobb, mint körülbelül 12 évvel ezelőtt volt, amikor a Földön 4 milliárd ember élt. Tehát ha ezen a számnövekedésen úgy próbálnánk segíteni, hogy 1 milliárd embert elhelyezünk (mondjuk) a Holdon, ez csak 12 évre segítene. (Itt most nem térünk ki az egyéb segítségekre, mint például a népszaporodás korlátozása, ami ismét politikába torkollik.) Az exponenciális függvénnyel csak egy másik exponenciális függvény veheti fel a versenyt, s ez az, amire akkor rámutattam.

Azt mondtam Albertnek: ha kolóniák létesülnek az űrben, azok létesíthetnek új kolóniákat. Tehát itt az új exponenciális törvény, amelynek korlátozása csak a végtelen űr volna. Reméljük tehát az emberiségnek csak annyi időt a túlélésre, míg elkezdheti a tér meghódítását, s akkor megmaradhat.

Nem tagadom, az én optimizmusom erősebb volt, mint az övé. Albert a világűr meghódítását csak a nagyon távoli jövőben remélte. Én közelebb láttam, mert manapság a „gyorsuló idő” korszakában élünk. Ennek a megnevezésnek magyarázata az, hogy a fejlődés törvénye is exponenciális: a további fejlődés irama arányos a már eddig elért fejlődéssel. Századunk kezdetén nem volt rádió, nem volt repülés, s íme, már a Holdra leszállott emberekkel beszélhetünk, azokat televízióon láttuk.

Az űrvárosok létesítéséhez nem kell új fizika, csak új technológia. Adjunk neki még 100 évet? Ebben a „gyorsuló időben” ez nagyon hosszú időtartam!



A világűr kísérletek által felvetített jövő egyik legérdekesebb s talán legfontosabb kérdése: van-e a világban a Földön kívül más helyen is élet? Van-e rajtunk kívül más civilizáció? A Naprendszerünkben illet eddig hiába kerestünk, de a Naprendszerünk elenyésző kicsiny része a Világegyetemnek.

Jobb ezt a kérdést egy másik, elvi kérdésre visszavezetni: keletkezhetik-e élet az élettelenből újabb beavatkozás (teremtés) nélkül? Mai felfogásunk az, hogy *igen*.

Érdekes megemlíteni, hogy a múlt században *Louis Pasteur* végzett egy híressé vált kísérletet, amelyből azt a választ nyerte: *nem*. Két kémcsőbe azonos tápanyagokkal ellátott folyadékot tett; egyiket elzárta a külső levegőtől, másikat nyitva hagyta. Egy idő eltelté után a nyitott csőben baktériumokat észlelt, a zárt cső élettelen maradt.

Jelen századunk kísérletezői másképpen nyúltak a témához. *Stanley Miller* és *Harold Urey* Chicagóban, *Melvin Calvin* Berkeley-ben vízgőz, metán és ammóniák keverékét (a Föld feltehetően primordiális atmoszféráját utánóza) zárták üvegedénybe, amelyben elektromos kísérleteket, vagy energikus elektron-sugárzást létesítettek. Néhány nap elteltével a gázokat meganalizálták, és meglepetésükre a kezdetiek-

nél bonyolultabb molekulákat észleltek a keverékben, többek között *aminosavakat*. Az aminosav a proteinnek, az élet organizációjának egyik téglája. Későbbi kísérletekben *nukleotidák* is előállottak, amelyek a manapság sokat emlegetett *DNS*-molekula téglái. Igen érdekesek a *polimerizáció* kísérletei. A mérsékelt nagy molekuláknak megvan a tendenciája, hogy egymáshoz való rendezés útján molekulaláncokba fejlődjenek.

Tehát: miután a primordiális atmoszférában villámok vagy radioaktivitás létrehozták az élő szervezet alaptégláit, polimerizáció által bonyolultabb molekulák épültek fel. Minél bonyolultabb egy óriásmolekula, annál kisebb a valószínűsége, hogy felépül. De ha a kis valószínűséget egy nagy időtartammal szorozzuk, akkor már nagy valószínűséggel mondhatjuk, hogy a polimermolekula előáll, sőt hogy végül olyan molekula áll elő, amely önmagát reprodukálni képes. Az ehhez szükséges időtartamok milliárd évekre rúgnak, de a Föld négy és fél milliárd évnyi életkorából telik erre idő.

Tehát a mai kísérletek alapján azt mondhatjuk: Pasteur híres kísérletéből hiányzott a több milliárd év, amit ma úgy is szokás mondani, hiányzott a történelmi momentum. De a Földön létrejött az élet.

Szemléltetés céljából én szeretem ezt a folyamatot egy nap időtartamára összehúzni.

Ha a Föld bolygó a múlt éjfélkor keletkezett, a hajnali órákban megindult egy *kémiai evolúció*. Tart ez még a reggeli, déli órákban is. Délután 5-6 óra körül kezdődik egy értelmesebb folyamat, létrejönnek az egysejtűek, majd a flóra és fauna hierarchiájában megkezdődik a *darvini evolúció*, megjelennek a magasabb rendű, egyre életképesebb lények, utoljára az emlősök s legvégül az ember. Az ember kialakulására a valóságban néhány millió év kellett, de ebben a képben az ember éjfél előtt tíz másodperccel jelenik meg, az ember írásos történelme pedig, a fáraóktól mostanáig mindössze egyetized másodperc.

Ilyenek az arányok. A természet nem csak térben, időben is óriási méretekkel dolgozik!

Tegyük fel most már ismét a kérdést: van-e máshol is élet a világban?

Fentiek alapján azt kell mondanunk, élet minden olyan bolygón kialakulhatott, amelynek a világláncból való kifejlődése a mi bolygónkéhoz hasonló s amely napjának (csillagának) úgynevezett „életzónájában” van, nem túl erős és nem túl gyöngye sugárzásban. Mennyi ezeknek száma a mi Galaxisunkban, amely száz milliárd csillagot tartalmaz?

A kérdésre közelebbi ismeretek hiányában csupán valószínűségi becslést adhatunk. A csillagevolúció elmélete szerint bolygórendszerek kialakulása nem kivételes, a mi Napunk is átlagos csillag; talán a mi létünk sem kivételes, ha nem is átlagos eredménye a csillagképződésnek. A valószínűségi becsléseket a *Drake-egyenlet* egyesíti magában, *Frank Drake* amerikai csillagász kezdeményezése alapján, aki e kérdések buzgó kutatója. Az egyenlet valószínűségek szorzatát tartalmazza, s aszerint, hogy a valószínűségek

milyen becsléseket adunk, nagyon különböző végeredményhez juthatunk. Valóban, vannak becslések, amelyek szerint a Tejútrendszerben *egyedül vagyunk*, de vannak olyanok is, amelyek a hozzánk hasonló civilizációk számát *ezrekre*, sőt *százazrekre* teszik. Szerintem nehezebb elfogadni azt, hogy egyedül vagyunk, mert ezáltal magunknak nagy kivételezettséget tulajdonítanánk.



A 60-as évek óta sok vita tárgyát képezi, hogy ha vannak rajtunk kívül intelligens lények a világban, hogyan juthatunk azokkal kapcsolatba? Két eset lehetséges, odamenni, vagy jelekkel érintkezni.

Odamenni a fizika törvényei szerint lehetséges, de ha nem akarjuk az utazást vég nélkülre kinyújtani, akkor a fényvel összemérhető sebességre kell felgyorsulni, amihez még atomi mértékekben is óriási energiára volna szükség. Ilyesmitől a mi mai felkészültségünk messze távol áll.

Ellenben itt van a rádió. De még ebben is erőltlen a mai technológiánk arra, hogy „jelentkezzünk” a világba kiküldött jeladásunkkal. Tehát Frank Drake javaslatára kezdjük el „hallgatózni” a világból jövő értelmes jelekre. Ha nem kis számmal vannak más civilizációk, azok már egy „klubot” szervezhetnek. Próbáljunk a jelközléseikbe bekapcsolódni. Így jött létre a *SETI* (Search for Extra Terrestrial Intelligence) program. Persze, itt sok kérdés van. Milyen csillag felé irányítsuk vevőantennánkat, milyen hullámhosszon keressünk, miről ismerjük fel az „értelmes” adást stb...?

A *SETI* mintegy 50 egyéni próbálkozásából, amely sok ezer órára terjedő hallgatódzásból állott, eddig egy sem vezetett eredményre. De a keresést nem szabad föladnunk a megtalálás említett nehéz volta miatt. A keresést segíteni fogja az irányított rádióvételnek egy újabban kifejlett formája: a *fázisegyeztetés*. A mai komputerizált világban sok egymástól távoli rádióantennánál, amelyek mindegyike nagy parabolaátnyér, lehet így fázisban összehangolni, s ez megfelel egyetlen, de sokszoros méretű tányérnak. Kitűnő eszköz ez a rádióasztrológiában, de a *SETI* kereséseiben is.

A 60-as évek tudományos vitái a Földön kívüli civilizációkról átkerültek a köztudatba is, és megindult a fantázia a világlakókkal¹⁹ való találkozás felé. A képzelet szüleménye volt a sok *UFO* (Unidentified Flying Object) látomás. Mai napig olvassuk őket. Vizsgálat alá vette azokat egy tudományos bizottság a Colorado Egyetemen, s kiderült, hogy egyetlen evidencia sincs közöttük. Érthető, hogy nincs, mert ezek a látomások rendkívül naivak voltak. Ha valaki annyira előrehaladott a civilizációjában, hogy át tudja hidalni a csillagok közötti távolságokat, az nem azért jön ide, hogy néhány látványos mutató után elmenjen.

De komolyan is kérdezhetjük: miért nincs mind ez ideig egy Kolumbuszunk? Erre két esélyes választ adhatunk. Egyik, hogy a Tejút szélén vagyunk, sok

¹⁹Magyarul megszokott „az idegenekről” beszélni és írni.

ezer fényévyire a csillagokban népes középtől. Másik, hogy mindössze alig több mint fél századdal ez előtt a Föld embere még rádiócsöndben élt. Ki tudhatta, hogy élünk?

Persze izgató kérdés: ha nem vagyunk egyedül, mit várhatunk a világ többi lakóitól?

A kérdés akadémikus, a válasz sem lehet más.

A pesszimista ebben is rémeket lát. A fejlettebb képességű lények ellen nem tudnánk védekezni, tehát jobb lenne létezésünket letagadni: nem jelentkezni. De eltekintve attól, hogy mai rádióink, kommunikációink és televízióink akarva, nem akarva jeleket küld ki a világba, mi ellen kellene védekeznünk? Az Idegen nem akarhat tőlünk sem helyet, sem energiát kapni, mindenből van elege. S ha sok fényévnyi távolságban van tőlünk, sok-sok évig tartana, míg jelentkezésünk után idejön.

Másik félelem, hogy az idegen civilizáció fölényes tudásának birtokába jutva megállana a mi további igyekezetünk a fejlődésre. De miért állana meg? Az eddigi kutatásunk annál erőteljesebb lett, minél magasabb szintre jutottunk.

Olyasmi félelem is felmerült, hogy ha Földünk valamelyik népe először jut fölényes tudás birtokába, azt fölhasználhatja, hogy a többi népeket legyőzze. A bizalmatlanságnak ilyen csúcsa csak igazolja azt a félelmünket, hogy mi földi lények talán mégsem vagyunk túlélésre teremtve!

De nézzük meg az aggodalmak ellentétét: mit nyerhetünk? Én itt arra szeretnék felelni, mit nyerhetünk tudományban?

A válaszom persze egyéni: én a nálunk fejlettebb idegentől azt várnám, tanítson minket a pszichológiai és fizikai jelenségek összefüggésének megértésére.

Fogalmazzunk világosabban. Van a Világegyetemnek minden eddig megismertnél bonyolultabb képződménye, az emberi agy. Valóban agyunk bonyolultabb, mint a csillagok, bolygók, galaxisok rendszere, összes asztrofizikai történéseikkel együtt. Most nemcsak arra a mára általánosan ismert tényre gondolok, hogy emberi agyunk 10-100 milliárd neuronsejtet tartalmaz (hasonló vagy nagyobb szám, mint ahány csillag van a Tejútrendszerünkben), amelyek mindegyike mintegy száz más sejttel van fonalakkal (telefonvezetékekkel) összekapcsolva. E vezetékek összes hossza, ha egymás után raknánk őket, túlmenne a Hold távolságán.

Nem erre az anatómiai bonyodalomra gondolok, hanem arra a régóta felismert, de meg nem értett talányra, amelynek neve *pszichofizikai parallelizmus*. Agyunk és érzékszerveink történései fizikaiak; lelki világunk velük párhuzamosan folyik. Hogyan jön létre közöttük a kapcsolat? A kérdés megítélése nagymértékben függ attól, hogyan gondoljuk a természeti jelenségek lefolyását. E tekintetben jelen századunk mélyreható változást hozott. Századunk fizikájának legnagyobb élménye a kvantumelmélet, amelynek gyümölcsei még megérlelésre várnak. A *Heisenberg*-féle határozatlansági relációk megszüntették az addigi fizika *kauszális* voltát.

Immanuel Kant filozófiájában a kauzalitás az emberi gondolkodásnak *a priori kategóriája*. Ma kijavíthatjuk ezt a nézetet: a kauzalitás a klasszikus fizika *alappoztulatuma*, ami az égi mechanika átütő sikerei alapján átment a természettudományos gondolkodásba. Így jött létre a természetfilozófiában a *materialista determinizmus*.

E filozófia szerint a világ bonyolult gép, amelynek minden történése (az élőlényeké is, az emberé is) előre meg van határozva. *Laplace* mondotta, hogyha tudnánk minden atom helyzetét és sebességét egy időpillanatban, meg tudnánk mondani a teljes jövőt. Mint ahogy a bolygórendszerben ki tudjuk számítani, hogy 2000 évvel előre-hátra mikor kerül sor egy napfogyatkozásra.

Az ilyen filozófia mellett minden, ami lelki jelenség, *illúzió*. *Spinoza* mondta szellemesen, hogy ha a feldobott kőnek öntudata volna, azt gondolná, hogy saját szabad akaratából esik vissza. Szabad akarat és az összes egyéb pszichikai jelenségek csupán illúziók a materialista determinizmusban.

A természettudományok determinizmusa a múlt század végén lett teljes, és érdekes megemlíteni, hogy több jeles fizikus próbált megszabadulni annak kényszerítő voltától. A fizika determinista jellegét nem tudták megváltoztatni, de a lelki jelenségekben kerestek valami újat, ami később az *ESP* (Extra Sensory Perception) elnevezést kapta. Közéjük tartozott a fizika két közismert nagysága *J. W. Strutt* (a későbbi *Lord Rayleigh*) és *J. J. Thomson*, de más kitűnő fizikusok is. Az *ESP* kutatói azt keresték, vannak-e olyan lelki jelenségek, amelyek nem az érzékszerveken keresztül nyilvánulnak meg, például *telepátia* vagy *pszichokinézis* (az akarat beavatkozása a természet jelenségeibe). Említett fizikusok tagjai lettek annak a kutatócsoportnak (Parapszichológiai Társaság), amely 1882-ben alakult. Azóta ilyen társaságok a világ sok államában gomba módra elszaporodtak. Száz év óta sok folyóirat és könyv közli a legkülönbözőbb kísérleteket. Ezek sokszor a spiritizmus, sokszor az ügyes bűvészet, csalás határain mozognak. E vizsgálatokat összegző és bíráló irodalom általában hiányolja a természettudományokban megkívánt objektív realizmust. Gyakori konklúzió, hogy a bűvészek be tudják csapni az elméleti fizikusokat, de nem a bűvészeket; és hogy eddig nem látható olyan eredmény, amely az objektív tudományos világ érdeklődésére számíthat.

Mégis mutatja e kérdések nagy népszerűsége, hogy a ma emberében él a vágy, hogy a lelki jelenségekben valami többet lásson, mint illúziót. Eszünkbe juttatják az ilyen törekvések az alkimisták igyekezetét, hogy aranyat csináljanak. Ma tudjuk, hogy próbálkozásaik sikertelenek maradtak, mert vegykonyháikban nem rendelkeztek elegendő energiákkal. Azt is biztosan állíthatjuk, hogy az alkimista, aki sikert mutatott fel, csalt. És mégis: van elemátalakítás; ma tudunk aranyat csinálni (igaz, hogy többbe kerül, mint aranyat bányászni), az elvi akadály elhárult. Lehetséges, hogy az *ESP* sikertelensége hasonló: nem elvi, hanem gyakorlati? Például a pszichokinézist a makroszkopikus történések helyett az atomok világában kellene keresni!

A kvantumelmélet akauzális volta most más megvilágításba helyezi a pszichofizikai parallelizmusról való felfogásunkat. Laplace mégoly kiváló matematikusa sem tudná kiszámítani a teljes jövőt, mert nincs teljesen meghatározott kezdő helyzet, amelynek összes koordinátái adottak. A fizikai jelenségek lefolyására csak valószínűségi törvények vannak, ami azt jelenti, hogy azokban szerepe van a véletlennek.

Kérdés: ad-e ez az indeterminizmus lehetőséget arra, hogy a lelki jelenségek lefolyásában valamilyen szabadságot lássunk?

Századunk egyik legkiválóbb csillagásza és kitűnő elméleti fizikusa, *Arthur Stanley Eddington* próbálkozott, hogy az akarat szabadságára (amit intuitíve érzünk) lehetőséget találjon a kvantummechanika indeterminizmusa alapján. Kihívta ezzel *Bertrand Russel* elutasító bírálatát.

Én Eddington pártjára állok, már csak azért is, mert úgy gondolom, hogy a természetben nincs olyan lehetőség, amely ne volna kihasználva. Ezért mondtam: örömmel vennék az emberiség számára e tekintetben előrehaladottabb tudásból tanítást, ha az idejében jön. Hogy magunk értsük meg e kérdés rendkívüli bonyodalját, az talán még a „gyorsuló” időben is hosszan elnyúló kutatásra vár!



Agyunknak, az észlelt világ eme legbonyolultabb képződményének folyamánya, hogy van értelmünk, hogy szeretjük a szépet, és hogy ki tudunk alakítani életfilozófiát, világnézetet, erkölcsöt.

A világűrbe kilépő ember annyi életteret, boldogulást fog tudni találni magának, amennyire az agyából folyó tudása, művészete és erkölce képessé teszi.

MEGJEGYZÉSEK BAY ZOLTÁN KÉZIRATÁHOZ

Almár Iván

Bay Zoltán-díjas úrkutató

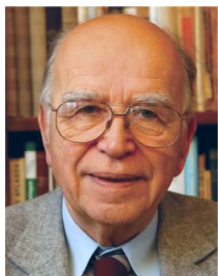
Bay Zoltán 1946-ban, a világháború utáni nyomorúságos körülmények között sikeresen végrehajtott Hold-radar kísérlete méltán szerzett világhírt a magyar fizikusnak. Mindenütt úgy hivatkoztak rá, mint a radarcsillagászat egyik megalapítójára. Az 1946-os kísérlet publikációja bekerült abba a kis csomagba is, amelyet 1980-ban, éppen 40 éve vitt magával az első magyar űrhajós hazájának büszkeségeit jellemző egyik tárgyként a világűrbe. A Bay-kísérlet ötvenedik évfordulójára, 1996-ban magyarul és angolul megjelent *Ötven éves a magyar űrkutatás* könyv szerint is ettől az eseménytől számítjuk a magyar űrkutatás hivatalos történetét. Az ember azt hinné, hogy ezek után mindenki számára világos, hogy mi történt és mi nem történt 1946. február 6-án Budapesten, a Tungstram gyár tetején.

De a helyzet sajnos korántsem ilyen egyértelmű. A magyar forrásokban újra és újra felbukkan az a kiirt-hatatlan tévedés, hogy Bay Zoltán 1946-ban (gyakran azt is hozzátéve, hogy elsőként!) *megmérte a Hold távolságát a Földtől*. Ha „felütjük” a Google lapjait, ijesztő mennyiségben találunk olyan közleményeket, amelyek címében szerepel ez a hiba. Nézzünk né-

hány példát: „1947 február 6-án Bay Zoltán és kutatócsoportja radarral megmérte a Föld–Hold távolságot” (*wiki startlap*, ahol még az évszám is téves). „Bay Zoltán 70 éve mérte meg a Föld–Hold közti távolságot” (*infostart 2018. febr. 6.* – az évszám itt is téves). A *Múlt-kor* 2016. február 6-i száma ezt írja: „Hetven éve, 1946. február 6-án Bay Zoltán fizikus és kutatócsoportja saját fejlesztésű radarral a világon egyedülálló eljárással mérte meg a Föld–Hold távolságot, ez a kísérlet alapozta meg a *rádiócsillagászat* tudományát.” (Téves, a rádiócsillagászat passzív vételt jelent, és korábban indult fejlődésnek.)

Ha az oktatási segédanyagokat olvassuk, ott sem jobb a helyzet: „Elsőként Bay Zoltán és tőle függetlenül egy amerikai kutatócsoport gondolt arra, hogy a radarhullámok nemcsak repülőkről, hanem égitestekről is visszaverődhetnek. A rádiójel kibocsátása és visszaverődése közti időkülönbség alapján mérte meg elsőként a Hold távolságát a Földtől 1946-ban mindkét kutatócsoport.” (*A Fizika 9* tankönyv *A távolságok és az idő mérése* fejezetében.) Végül, de nem utoljára a *Nemzeti Köszölgélati Egyetem* idén megjelent kiadványa, az *Új távlatok a magyar űrparban* azt írja, hogy „A magyar űrsztori valamikor 1946-ban kezdődött, amikor Bay Zoltán és kutatócsoportja radarral megmérték a Föld és a Hold távolságát”. Azért azt is meg kell említeni, hogy a *Fizikai Szemle* 2001/3-as számában megjelent ugyan egy korrekt cikk arról, hogy a HM Haditechnikai Intézet megismételte Bay Zoltán Hold-radar kísérletét, de azt is ilyen címmel közzölték: *A Föld–Hold távolság megmérése*.

Mi volt valójában Bay Zoltánék célja ezzel a kísérlettel? Mivel jól ismerték saját radarjuk teljesítményét,



Almár Iván úrkutató, csillagász, a fizikai tudományok doktora, címzetes egyetemi tanár, a CSFK Csillagászati Intézet emeritusz kutatója, a Nemzetközi Asztronautikai Akadémia tiszteleti tagja, a Magyar Asztronautikai Társaság örökös tiszteletbeli elnöke.

de meglehetősen pontossággal tudták a Hold távolságát is, könnyen kiszámították, hogy az antennájukkal a Hold felé küldött mikrohullámú jelük milyen mérhetetlenül kis töredéke érkezik csak vissza a vevőjükre. (A tervezés idején még nem is tudhatták, hogy 2,5 m-es hullámhosszú jeleik átjutnak-e egyáltalán a földi ionoszférán. De a Hold felszínének visszaverőképességére viszonylag jó becsléseik voltak.) Tudták, hogy egyetlen jel visszaérkező maradéka nem fog kiemelkedni a zajból, ezért Bay javaslatára mintegy ezer jelet küldtek, és folyamatosan összegezték coulométerükben. Majd ugyanezt a kísérletet megisméltették nem a Hold felé irányítva az antennát. Az eredmény az volt, hogy amikor a Hold a látómezőben volt, a mért jel valamivel erősebbnek bizonyult, vagyis annak, amit a Hold felé kisugároztak, egy része valóban visszaérkezett a vevőbe. Mivel a beérkezés idejét részben az összegzés, részben az akkori időmérési technika korlátai miatt nem lehetett pontosan meghatározni, csak arra következtethettek, hogy a mikrohullámú sugárzásuk egy része tényleg eljutott a Holdig, és visszaverődött onnan. Ezzel valóban elsőként (bár a hasonló amerikai kísérlet után néhány nappal) eljuttattak valamit – konkrétan fotonokat – a Földről a Holdra. Alig 13 évvel később jutottak el az első tárgyak, majd újabb 10 évvel később az első emberek is égi kísérőnk felszínére – megkezdődött az űrkorszak.

De ki és mikor mérte meg valóban elsőként a Hold távolságát? Talán meglepő, de már a Kr. e. 3. században élt *Arisztarkhosz*, majd később *Hipparkhosz* és *Ptolemaiosz* görög tudósok is eredményesen dolgoztak a problémán primitív mérőeszközökkel és ragozó ötleteikkel. Természetesen nem kaptak km pontosságú eredményt, de körülbelül meghatározták a Hold távolságát és ennek következtében a Hold méretét is. Kiderítették, hogy a Hold valódi nagysága összehasonlítható a Földével, tehát nem valami titokzatos képződmény az égen, hanem távoli égitest. A különféle eljárásokat a későbbi korok csillagászai tovább pontosították mindaddig, amíg napjainkra a Hold felszínén elhelyezett lézertükrök pillanatnyi távolsága a feléjük irányított lézergyűk fotonjainak futási ideje alapján cm-nyi pontossággal meghatározhatóvá vált.

Ma már érdekesen hangzik Bay Zoltán felháborodása azon, hogy másfél évvel a Challenger katasztrófája után még mindig nem indulnak űrrepülőgépek Floridából. Elkeseredetten említi a NASA szűkkeblűségét és renyhességét. Vajon mit szolt volna ahhoz, hogy az amerikai űrrepülőgép 2011 júliusában végrehajtott utolsó útja óta csaknem 9 év telt el anélkül, hogy a NASA saját eszközeivel űrhajósokat küldött volna a világűrbe? Ehelyett az orosz Szozjuz rakétákon volt kénytelen helyeket vásárolni, hogy űrhajósai eljuthassanak a Nemzetközi Űrállomásra. E sorok írásakor már tudjuk, hogy a SpaceX cég Dragon űrhajójával 2020. má-



Bay Zoltán átveszi a Fónó Albert-plakettet.

jus 30-án végre sikerült két amerikai űrhajóst hazai földről elindítva a Nemzetközi Űrállomásra küldeni.

Ismerve az asztronautika fejlődésének görögnyövs útját, Bay Zoltán bölcsen tette, hogy ebben a nagyívű áttekintésben csak érinti a jövő emberes küldetéseit a szomszéd bolygók, különösen a Mars felé, nem említve a várható időpontokat. Nyilván ő sem sejtette, hogy 48 évvel az Apollo-program befejezése után még mindig csak különféle tervek léteznek majd a Holdra való visszatérésre, nem is beszélve a Mars-utazásokról. De az is érezhető, hogy ugyanakkor mennyire lelkesítik az űrszondás bolygókutatás (VEGA, Viking, Voyager) valóban korszakalkotó sikerei. Tanulságos az is, amit a kísérletek jelentőségéről ír a fizika történetében, valóban igaz az is, hogy a Naprendszer megismerése gyökeresen megváltozott, amióta műszerek jutottak a Hold, a Vénusz, a Mars, valamint egyes holdak, üstökösök és kisbolygók felszínére. Ebben nem volt késlekedés és megállás, az űrszondák szinte mindenüvé eljutottak már a Naprendszerben, ahová érdemesnek látszott.

Nagyon érdekesek Bay gondolatai az emberiség jövőjéről, az „idegenekkel” való esetleges kapcsolatfelvétel tulajdonképpen nem létező veszélyeiről, és arról, hogy ő mit szeretne megtudni egy nálunk fejlettebb civilizáció révén a minket ma is izgató, legmélyebb problémákról.

Végül megemlítem, hogy Bay Zoltán a hazai űrkutatótást személyesen is támogatta. Örömmel emlékszem vissza találkozásunkra 1981 májusában Budapesten, a MTESZ Központi Asztronautikai Szakosztályának 4. Asztronautikai Tudományos Ülésszakán, ahol érdekes előadást tartott, majd átvette a Szakosztály (mai nevén Magyar Asztronautikai Társaság) legmagasabb kitüntetését, a Fónó Albert-plakettet.

Bay Zoltán és a magyar űrkutatótás szoros kapcsolatát az is mutatja, hogy 2002-ben a Magyar Űrkutatótási Iroda akkori főhatósága, az Informatikai Minisztérium, a legkiválóbb magyar űrkutatótók elismerésére Bay Zoltán-díjat alapított. A díjat szabálytalan időközönként azóta is kiadják az egymást főhatóságként váltó minisztériumok.

A SPONTÁN SZIMMETRIASÉRTÉS ÉS AZ ATOMMAGOK DEFORMÁCIÓJA

Cseh József
ATOMKI, Debrecen

A spontán szimmetriasértés egy olyan fontos jelenség, amivel a fizika több területén is találkozunk. Legismertebb példája a Higgs-mechanizmus, ami megmagyarázza, hogy a kvarkok és leptonok miként tesznek szert tömegre a standard modellben, az elemi részecskék és az alapvető kölcsönhatások egyesített elméletében. Ennek tisztázásáért ítéltek oda a 2013. évi Nobel-díjat, miután a CERN kísérlete igazolta az elmélet helyességét.

Ebben az írásban a spontán sértés mechanizmusát egy egyszerű példán mutatjuk be. A vizsgált szimmetria a – mindenki által ismert – forgási szimmetria. Az elméleti keret pedig az Elliott-modell adja, ami az atommagok leírását már több mint 60 éve szolgálja sikeresen. (Mégis úgy tűnik, hogy még mindig léteznek rejtett vonásai.) Mikroszkopikus, azaz a nukleonokat tekintetbe vevő nézőpontból ennek keretében sikerült először számot adni a magok kollektív tulajdonságairól, vagyis arról, hogy különböző alakjuk lehet és parányi folyadékcseppek módjára rezegnek-forognak.

A mikrovilág viselkedését a kvantummechanika írja le. E szerint a fizikai állapotot egy vektor jellemzi, a fizikai mennyiséget egy olyan operátor, ami az állapotvektorok terén hat (az egyikhez egy másikat, vagy önmagát rendeli hozzá). Az elmélet alapegyenlete pedig sajátérték-egyenlet, ami arról ad számot, hogy egy állapotvektoron a fizikai mennyiséget képviselő operátorral hatva ugyanazt kapjuk vissza (valamelyest megnyújtva vagy rövidítve). Tehát az elmélet két lényeges eleme az operátor és annak sajátvektora(i). Az operátorok közül különösen fontos az energia operátora, másként a Hamilton-operátor; ez kormányozza a rendszert viselkedését. Az eddigiek alapján most már könnyen definiálhatjuk a spontán szimmetriasértést.

Spontán szimmetriasértésről – egyszerűen szólva – akkor beszélünk, ha egy fizikai rendszer Hamilton-operátora rendelkezik valamely szimmetriával, de a rendszer alapállapota nem. Például: az energiaoperátor gömbszimmetrikus, de az alapállapot nem az [1].

A jelen munka a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból biztosított támogatással, a K18 pályázati program finanszírozásában, a K 128729 számú projekt keretében valósult meg.



Cseh József az ATOMKI tudományos tanácsadója. Kutatási területe az atommagok szerkezete és a szimmetriák szerepe. Mostanában főként azt a kérdést tanulmányozza, hogy miként tudnak kapcsolatot teremteni a szimmetriák különböző soktestmodellek között. A magszerkezet alapvető leírásai ugyanis eltérő fizikai képekre épülnek (héjszerkezet, folyadékcsepp, fűrtösödés), ám – úgy tűnik – ezeket alkalmas szimmetriák képesek egységbe foglalni.

A legtöbb atommag esetében ez a helyzet. A kölcsönhatás gömbszimmetrikus, tehát a Hamilton-operátor is az, mégis, a magok alapállapota legtöbbször nem gömbölyű, hanem deformált. Például szivar alakban megnyúlt, vagy zsömle alakban belapult. (Ha nagyon körültekintően járunk el, akkor modellünk nem csupán gömbszimmetrikus erőket vesz figyelembe, de ezen finom eltéréseknek most nincs jelentősége. A deformált magalak ugyanis már a forgási szimmetriával rendelkező modellekből is kiadódik.) Vagyis a magok alapállapoti deformációja (a gömbalaktól való eltérése) a spontán szimmetriasértés megnyilvánulása. Hogyan valósul ez meg?

Korábban két elméleti keretben tanulmányozták a jelenséget (az önkonzisztencia-közelítésben és a kölcsönhatóbozon-modellben). A közelmúltban került sor a spontán sértés feltárására az Elliott-modellben [2]. Ez régebbi, mint az említett modellek. Lényegesen egyszerűbb is, tankönyvi fejezet, a szimmetriákra alapozott magmodellek prototípusa. Ennek alapján a szimmetriasértés mechanizmusa valószínűleg áttekinthetőbb, és egyszerűbben megfogalmazható.

Az Elliott-modell

James Philip Elliott modellje héjmodell: alapfeltevése, hogy a nukleonok egy átlagpotenciált éreznek, amelyet az összes többi nukleon vonzóereje alakít ki, és a nukleonpárok között olyan kölcsönhatás is működik, amely az átlagpotenciálba nem foglalható be [3]. Az átlagteret a harmonikus oszcillátor potenciálja írja le. A maradék kölcsönhatás pedig kvadrupólus típusú. Ennek magyarázata igen egyszerű: az ismeretlen nukleon-nukleon erőt (multipólusok szerint) sorba fejtjük, és az első el nem tűnő tagot tartjuk meg. Az energiaoperátor tehát két tagból áll: egy harmonikusoszcillátor-tagból, és egy kvadrupólus nukleon-nukleon kölcsönhatási tagból:

$$H = H_{HO} + \kappa Q Q.$$

Itt Q az összes nukleonra történő összegzésből származó kvadrupólus-operátor.

Most vegyük szemügyre a modell operátorait. Fontos az impulzusmomentum operátora L , hiszen az impulzusmomentum a magállapotok mérhető jellemzője. Ezen operátornak három komponense van L_i , $i = -1, 0, 1$, és amint a kvantummechanika alapjaiból tudjuk, ez a három operátor és azok lineáris kombinációi a felcserélési relációra nézve zártak. Az operátorok ilyen készlete egy Lie-algebrát alkot. Az L_i , $i = -1, 0, 1$ operátorok algebrájának neve $SO(3)$. A kvadrupólus-operátornak öt komponense van Q_j , $j = -2, -1, 0, 1, 2$. Ezek az impulzusmomentum három operáto-

rával együtt a felcserélési relációra nézve szintén zárt halmazt, vagyis Lie-algebrát alkotnak, amelynek neve $SU(3)$. Ha még hozzávesszük az oszcillátorkvantumok számának operátorát n -et, akkor az így nyert 9 operátor is zárt a felcserélési relációra nézve, vagyis Lie-algebrát alkot, amelynek neve $U(3)$. Nyilvánvaló, hogy az $U(3)$ -nak az $SU(3)$ részalgebrája, annak pedig az $SO(3)$ szintén részalgebrája:

$$U(3) \supset SU(3) \supset SO(3).$$

Az impulzusmomentum-algebra példáján megtanultuk, hogy létezik egy olyan L^2 operátor, amely az algebra minden elemével felcserélhető. Ilyen operátor, amit invariáns operátornak hívunk, minden Lie-algebrában található (legalább egy). Az $SU(3)$ -ban ez az L^2 és Q^2 súlyozott összege:

$$\frac{3}{4} L^2 + \frac{1}{4} Q^2,$$

az $U(3)$ -ban pedig ilyen az n .

Az impulzusmomentum értékét (vagy matematikai szóhasználatlalt az $SO(3)$ algebra ábrázolását) egyetlen L egész számmal tudjuk megadni. (Itt most csak pályamomentumról van szó.) Ezt a fizika nyelvén kvantumszámmak nevezzük, a matematikusok ábrázolási indexnek hívják. Az $SU(3)$ -nak és az $U(3)$ -nak is egész számok adják az ábrázolási indexeiket. Az előbbinek a szokásos jelölése (λ, μ) , az utóbbié $[n_1, n_2, n_3]$. Ezek a kvantumszámok – amint az L esetében is – egyértelmű kapcsolatban vannak a szóban forgó algebraik invariáns operátorainak sajátértékeivel.

Az n például az $U(3)$ invariáns operátora, az oszcillátorkvantumok száma a három térirányra összegezve: $n_1 + n_2 + n_3$. (Az ábrázolási indexek egy speciális állapotban mutatják a kvantumok megoszlását.) Az algebrai kvantumszámok egyértelműen jellemzik a rendszer bázisállapotait. A jelen esetben a bázisállapotokat az $[n_1, n_2, n_3]$, (λ, μ) , K, L indexek definiálják. Ezek egymáshoz való viszonya a matematikából egyértelműen ismeretes:

$$\lambda = n_1 - n_2, \mu = n_2 - n_3,$$

$$K = \min(\lambda, \mu), \min(\lambda, \mu) - 2, \dots, 1 \text{ vagy } 0,$$

$$L = K, K + 1, \dots, K + \max(\lambda, \mu), \text{ ha } K \neq 0 \text{ és}$$

$$L = \max(\lambda, \mu), \max(\lambda, \mu) - 2, \dots, 1 \text{ vagy } 0, \text{ ha } K = 0.$$

Az invariáns operátorok felhasználásával átírhatjuk a Hamilton-operátorunkat:

$$H = C^{(1)}(U3) + aC^{(2)}(SU3) + bC^{(2)}(SO3).$$

Itt C az invariáns operátorra utal (amelynek másik neve megalkotójáról Casimir-operátor), a felső index azt mutatja, hogy hányadik fokon tartalmazza az algebra elemeit, az algebra pedig zárójelben szerepel.

Mit mondhatunk e Hamilton-operátor (és következőképpen a rendszer) szimmetriatulajdonságairól? H felcserélhető az impulzusmomentum mindhárom komponensével, vagyis forgásinvariáns. Hiszen három olyan algebra Casimir-operátorával fejeztük ki,

amelyek mindegyike tartalmazza az impulzusmomentum-operátorokat, és az invariáns operátor felcserélhető az algebra minden elemével. Az impulzusmomentum tehát jó kvantumszám. Így is kell lennie, így alkottuk meg a modellt, ez követelményünk volt. Ezt a tényt másként úgy is fogalmazhatjuk, hogy az $SO(3)$ a rendszer egzakt szimmetriája. De mi a helyzet az $SU(3)$ és az $U(3)$ szimmetriákkal? Ezek nem egzakt szimmetriák. Például az $SU(3)$ nyolc bázisoperátora (L_i és Q_i) felcserélhető a

$$C^{(2)}(SU3) = \frac{3}{4} L^2 + \frac{1}{4} Q^2$$

invariáns operátorral, de a és b tetszőleges értéke mellett nem feltétlenül felcserélhető

$$a\left(\frac{3}{4} L^2 + \frac{1}{4} Q^2\right) + bL^2$$

operátorral, amit a Hamilton-operátor tartalmaz. Azt mondjuk, hogy az $U(3)$ és $SU(3)$ szimmetriák dinamikailag sérülnek, mert az energiaoperátor olyan kölcsönhatásokat tartalmaz, amelyek sértik ezen szimmetriákat.

Mégis, ez a fajta Hamilton-operátor, amely egyetlen algebrai invariáns operátoraival fejezhető ki, nagyon speciális és nagyon fontos. Ugyanis igen előnyös tulajdonságai vannak. Ilyen esetben az energia sajátérték-egyenlete analitikus (zárt képlettel kifejezhető) megoldással rendelkezik. Azt mondjuk, hogy a rendszer dinamikai (vagy más szerzők megfogalmazása szerint dinamikailag sérült) szimmetriával rendelkezik.

A spontán szimmetriasértés

A Hamilton-operátor két tag – egy belső és egy kollektív – összegére bontható fel:

$$H = H_{intr} + H_{coll}.$$

Az első, H_{intr} tag az $U(3)$ és $SU(3)$ algebra invariáns operátorát tartalmazza, és belső (intrinsic) Hamilton-operátornak nevezzük:

$$H_{intr} = C^{(1)}(U3) + aC^{(2)}(SU3).$$

Ez szabja meg a mag alakját, és a spektrumban a kollektív sávfejek helyzetét. Ez a tag egy kollektív sáv minden tagjának ugyanazt az energiát adja.

A második részt kollektív Hamilton-operátornak nevezzük:

$$H_{coll} = bC^{(2)}(SO3).$$

Ez hasítja fel a kollektív sáv állapotait. Ez a jól ismert L^2 operátor, amelynek sajátértéke $L(L+1)$. Mivel a kollektív forgás lassúbb, mint a nukleonok egyéni mozgása azt is mondhatjuk, hogy a Hamilton-operátorban szeparáltuk a gyors és lassú szabadsági fokokat. Érdekes hangsúlyozni, hogy az Elliott-modellben ez a felbontás egzaktul elvégezhető.

Fontos tény, hogy nemcsak a teljes, hanem az intrinsic és kollektív Hamilton-operátor is gömbszimmetriával rendelkezik, a már említett ok miatt: az impulzusmomentum-operátorokat tartalmazó algebraik invariáns operátoraival vannak kifejezve, tehát azokkal felcserélhetők.

Ezen a ponton érdemes rögzítenünk, hogy melyek a spontán szimmetriasértés mechanizmusának lépései:

I. A Hamilton-operátort két tag összegére bontottuk.

Ezután

II. Az egyik (intrinsic, vagy belső, avagy gyors) rész sajátérték-egyenletét vizsgáljuk.

Mint láttuk, a H_{intr} operátor forgásinvariáns. De mit mondhatunk általában a sajátállapotairól, valamint az alapállapotáról?

Az Elliott-modell a laboratóriumi vonatkoztatási rendszerben fogalmazták meg. Például az L érték a mérésel nyerhető impulzusmomentum. Ha a mag alakjára vagyunk kíváncsiak, akkor azt – értelem szerint – a testhez rögzített rendszerben kell szemügyre vennünk. Alkalmazhatunk például derékszögű koordináta-rendszert, és megvizsgálhatjuk az oszcillátor-kvantumok eloszlását az x , y és z irányban. Ez informál bennünket a mag alakjáról. Valójában a mag alakját az $SU(3)$ algebra két kvantumszáma (λ , μ) egyértelműen megszabja. A $(0, 0)$ kvantumszámok a gömbszimmetrikus alaknak felelnek meg, a $(\lambda, 0)$ egy hosszszában megnyúlt forgási ellipszoidot jellemez, $(0, \mu)$ egy belapult alakot ír le. Az általános (λ, μ) eset pedig olyan ellipszoidra vonatkozik, amelynek mindhárom főtengelye különböző hosszúságú. A magfizika-tankönyvek a kvadrupólus-deformációt általában a β és γ paraméterekkel jellemzik, ahol β a gömbszimmetriától való eltérés mértéke, γ pedig azt mutatja meg, hogy mennyire megnyúlt vagy belapult alakkal van dolgunk, és az mennyire tér el a hengersizmetrikustól. E két paramétert a (λ, μ) kvantumszám párr egyértelmű meghatározza.

Gömbszimmetrikus alakkal, $(0, 0)$ $SU(3)$ kvantumszámokkal csak a mágikus proton- és neutronszámú magok rendelkeznek, mint a ${}^4\text{He}$, ${}^{16}\text{O}$, ${}^{40}\text{Ca}$ stb. Ezek alapállapotában a nukleonok valamilyen szintig teljesen betöltik a héjakat, a fölött pedig minden héj üres. Az alapállapot impulzusmomentuma $L = 0$. Az elkövetkezők szempontjából megjegyezzük, hogy ebből az állapotból természetesen csak egy van, nem lép fel degeneráció. Az összes többi mag esetében vagy a proton-, vagy a neutronhéj, vagy mindkettő csak részben van betöltve. Ha a (λ, μ) kvantumszámok egyike vagy mindkettőjük különbözik nullától, a mag nem gömbölyű, hanem deformált, vagyis bekövetkezik a spontán szimmetriasértés: egy gömbszimmetrikus Hamilton-operátor alapállapota nem gömbszimmetrikus. Ekkor a H_{intr} operátor sajátállapota nem rendelkezik határozott impulzusmomentummal, hanem különböző impulzusmomentumú állapotok lineáris kombinációja. Azokat mind ki lehet vetíteni belőle, ök

alkotják a rotációs sávot. Amíg azonban csak a H_{intr} operátor vizsgálatára szorítkozunk, addig ezek mind azonos energiával rendelkeznek, vagyis degeneráltak. Azt látjuk tehát, hogy

III. A spontán szimmetriasértés akkor lép fel, ha degeneráció van jelen.

A spontán szimmetriasértés kapcsán gyakran hallunk Goldstone tételéről és a Goldstone-bozonról. Goldstone tétele dióhéjban azt mondja: ha egy globális folytonos szimmetria spontán sérül, akkor egy nulla tömegű bozon lép fel.

A forgási szimmetria folytonos, globális (nem változtattuk a forgatási szögeket a mag különböző pontjain), és mint láttuk, spontán sérül. Akkor a tétel szerint lennie kell Goldstone-bozonnak. Hol van?

Vegyük szemügyre a H_{intr} alapállapotát, jelöljük ezt ϕ -vel, és vizsgáljuk meg, hogyan hatnak ezen az állapoton az impulzusmomentum-operátorok! Az egyszerűség kedvéért nézzünk egy megnyúlt alakot, amelynek $SU(3)$ kvantumszámai $(\lambda, 0)$ és a szimmetriatengelye a z irányban áll. Ekkor az L_z operátor hatása igen egyszerű: $L_z\phi = 0$, vagyis eltünteteti az állapotot. A helyzet azonban más az L_x és L_y operátorokkal. Az $L_x\phi$ és $L_y\phi$ állapotok új állapotok, ám ugyanahhoz az energiához tartoznak. Vagyis az a gerjesztési kvantum, ami a ϕ -ből az $L_x\phi$ -be, vagy az $L_y\phi$ -be visz nulla energiával rendelkezik [3]. Ezek az Elliott-modell Goldstone-bozonjai.

Térjünk vissza a teljes Hamilton-operátor vizsgálatához! Amikor a H_{intr} -hoz hozzáadjuk a H_{coll} -t, akkor a különböző impulzusmomentumú állapotok felhasadnak, kialakul a tipikus, $L(L+1)$ szerint növekvő energiaspektrum, megszűnik a degeneráció, nincs spontán szimmetriasértés. A teljes Hamilton-operátor a laborrendszerben írja le a magot, ott annak $L = 0$ alapállapota van (az egyszerűség kedvéért páros proton- és páros neutronszámú magokat tekintünk). Vagyis a spontán szimmetriasértés mechanizmusának záró tétele:

IV. Amikor a teljes Hamilton-operátort tekintjük, akkor a szimmetria helyreáll.

Más konfigurációk

Abból adódóan, hogy az Elliott-modell hasonló szimmetriavezérelt szerkezetmodellek megalkotásához mutatott utat, az itt bemutatott gondolatmenet más esetekben is alkalmazható. Most két olyan problémát veszünk szemügyre, amelyek az Elliott-modell kiterjesztésével tárgyalhatók, ezáltal a kvadrupólustól eltérő deformációk is elemezhetők a spontán szimmetriasértés szemszögéből. A korábban alkalmazott elméletek – az ökonzisztencia-közelítés és a kölcsönható-bozon-modell keretében – csupán a kvadrupólus-deformációt tanulmányozták.

A körtealaknak megfelelő oktapólus-deformáció is leírható az Elliott-modellen belül. Ez a felismerés szintén a közelmúltból származik [4]. Nevezetesen: nem

egy, hanem két főhéjat kell tekintetbe vennünk, amelyek egymást követő oszcillátor kvantumszámmal rendelkeznek: $N-1$ és N .

Két ilyen valenciahéj állapotaival megvalósítható az okkupólus-deformáció leírása a gömbszimmetrikus héjmodell keretében, ahhoz nagyon hasonló módon, ahogyan a kvadrupólus-deformációt tárgyaltuk egyetlen főhéj terében. Nevezetesen: létezik egy algebraiánc:

$$U(\Omega^2) \supset G \supset SO(3),$$

itt $\Omega = N+1$, amelynek invariáns operátoraival kifejezhető az okkupólus-kölcsönhatást tartalmazó Hamilton-operátor, és a sajátérték-problémája analitikusan megoldható. Ez ismét egzaktul felbontható belső és kollektív tagra, az utóbbi megint csak az $L(L+1)$ rotációs tag:

$$H = H_{intr} + H_{coll}, \text{ ahol } H_{coll} = bC^{(2)}(SO3).$$

Újra az a helyzet, hogy a teljes Hamilton-operátor – csakúgy mint mindkét összetevője – rotációs szimmetriával rendelkezik, ám a H_{intr} alapállapota nem gömbölyű (ha degeneráció van jelen), hanem okkupólus-deformációt mutat. Vagyis az $SO(3)$ szimmetriája spontán sérül, és körte alakú deformációt eredményez.

Ugyancsak az Elliott-modell kiterjesztésének tekinthető a félmikroszkopikus algebrai klasztermodell [5], amely a magok fűrtösödését, vagyis molekulyszerű konfigurációit írja le. Ez egy kicsit összetettebb: az Elliott-modellt a klaszterek belső szerkezetének leírására alkalmazzuk, a relatív mozgásukról szintén algebrai tárgyalással adunk számot, nevezetesen a vibron modellel, amelynek bázisállapotait az

$$U(4) \supset U(3) \supset SO(3)$$

algebraiánc definiálja. Vagyis a relatív mozgás leírására $U(3)$ oszcillátorbázist használunk. (A $U(4)$ algebraira pedig úgy kell tekintenünk, mint az $U(3)$ kiterjesztésére, amire ahhoz van szükség, hogy az oszcillátor-probléma spektrumát tudjuk generálni, hiszen az $U(3)$ csupán az oszcillátorkvantumok egy adott számához tartozó állapotok szimmetriája.) Ha tehát egy két-klaszter-konfigurációt tekintünk, akkor a modellünk algebrai szerkezetét az

$$U_1(3) \otimes U_2(3) \otimes U_R(4) \supset U_C(3) \otimes U_R(3) \supset U(3) \supset SO(3)$$

adja. Itt az 1 és 2 indexek az első és második klaszterre utalnak, C a klaszterek (összesített) belső szerkezetét, R pedig a relatív mozgást jelöli.

Eddig csak a térbeli szerkezet leírására koncentráltunk. Természetesen tekintetbe kell vennünk a nukleonok spin és izospin szabadsági fokait is, csak úgy tudunk számot adni a Pauli-elvről. A modell elnevezésében a félmikroszkopikus jelző arra utal, hogy az mikroszkopikusan megszerkesztett térrel dolgozik, vagyis tekintetbe veszi a Pauli-elvet. (Az operátorok felírásában viszont vannak fenomenologikus paraméterek, ami miatt nem teljesen mikroszkopikus). A klaszterproblémák tárgyalásánál azonban nagyon gyakran olyan helyzettel találkozunk, amikor a modelltérnek csak egyetlen spin és izospin kvantumszámmal jellemzett értéke játszik fontos szerepet. Ezért itt eltekintünk attól, hogy

a formalizmus részletezésével bonyolítsuk a leírást, hiszen mostani mondanivalónk szempontjából is a térbeli rész játssza a döntő szerepet.

Ez az algebraiánc, az előzőekhez hasonlóan, meghatároz egy dinamikai szimmetriát, amikor a Hamilton-operátor az invariáns operátoraival van kifejezve. Ilyenkor az energia zárt képlet segítségével megadható. Számos atommag klaszterspektruma e dinamikai szimmetria keretében (némiképpen meglepő módon) sikeresen leírható. A Hamilton-operátor vizsgálata ismét pontos analógiát mutat az Elliott-modellével: a teljes operátor egzaktul felbontható intrinsic és kollektív tagok összegére, oly módon, hogy a kollektív tag megint a rotációs operátor:

$$H = H_{intr} + H_{coll} \text{ ahol } H_{coll} = bC^{(2)}(SO3).$$

Mindkét rész gömbszimmetriával rendelkezik, de a H_{intr} alapállapota nem gömbölyű, hanem súlyzó- vagy molekulaalakú. Valójában a klaszterek általános kvadrupólus-deformációval rendelkeznek, és relatív orientációjuk is tetszőleges lehet, tehát egy részletesebb és pontosabb fűrtösödésleírást kapunk, mint amit az egyszerű hasonlatok sugallnak. És az elmondottak alapján ez a fajta, a gömbszimmetriától markánsan eltérő magalak ismét csak a spontán szimmetriasértés eredménye, ugyanolyan módon, ahogyan az egyszerű kvadrupólus-deformáció megjelenését láttuk az eredeti Elliott-modellben.

Más jelenségek

E részben néhány spontán szimmetriasértő példát említünk a fizika más területeiről.

A ferromágnesek esetében szintén spontán módon sérül a rotációs szimmetria. Nevezetesen: egy makroszkopikus méretű ferromágnes belsejében a Hamilton-operátor forgási szimmetriával rendelkezik. Mégis a kritikus hőmérséklet alatt a spinek egy irányba rendeződnek, és a gömbszimmetria spontán sérül.

A spontán szimmetriasértés legrégebbi ismert példája a Jahn–Teller-effektus [6]. Ez a többatomos molekula geometriai torzulására vonatkozik. Ha egy molekula több azonos atomból épül fel, akkor azoknak szimmetrikus alakzata várható, amit egy diszkrét szimmetriacsoport jellemez. A szimmetria következménye megjelenik az elektronállapotokban is: azok olyan degenerációt mutatnak, ami a szimmetriacsoport reprezentációinak felel meg. Ez a szimmetria spontán sérülhet, a molekula deformálódik. Ezt a jelenséget nevezik Jahn–Teller-disztorciónak. Itt a Hamilton-operátor szétválasztása a gyors és lassú szabadsági fokokat tartalmazó részre még inkább szemléletes. Az atommagok és az elektronok az elektromos erők révén hatnak kölcsön, de a magok több mint ezerszer nehezebbek, ezért ugyanazon erő hatására lassabban mozognak. A probléma megoldása során olyan közelítést alkalmaznak, amelyben kihasználják az ebből fakadó egyszerűsödéseket. Például: az elektronok mozgásának leírása során feltételezik, hogy az atommagok rögzített térbeli hely-

zettel rendelkeznek, vagyis az $\vec{0}$ mozgásuktól eltekintenek [1]. A gyors és lassú szabadsági fokok ilyen fajta szétválasztását általában adiabatikus közelítésnek nevezik a kvantummechanikában, de a molekulafizikában külön neve is van: Born–Oppenheimer-közelítés. E szétválasztás miatt következik be a molekula szimmetriájának spontán sérülése, és mint más esetekben is, amikor a teljes Hamilton-operátort vizsgáljuk, akkor a szimmetria helyreáll.

Egy kvantummechanikai rendszernek nemcsak térbeli vagy geometriai szimmetriái lehetnek, hanem másfajta is. Mértéktranszformációnak azt nevezik, ha a ψ állapotvektort egy $e^{i\alpha}$ úgynevezett fázissal szorozzuk: $\psi \rightarrow e^{i\alpha} \psi$. Ezek a transzformációk az egydimenziós forgás $U(1)$ csoportját alkotják. Ha α állandó, akkor globális mértéktranszformációról beszélünk, míg ha helyfüggő: $\psi \rightarrow e^{i\beta(x)} \psi$, akkor lokálisról. A Schrödinger-egyenlet, a kvantummechanika alap-egyenlete invariáns a globális mértéktranszformációval szemben, mert a konstans fázisfaktor „átcsúszik” a differenciálás operátorán: $\partial(e^{i\alpha} \psi) = e^{i\alpha} (\partial \psi)$. (A Schrödinger-egyenlet megadja az állapotvektor időbeli változását is; az energia korábban említett sajátérték-egyenlete ennek az időfüggetlen határesetre.) A lokális mértéktranszformáció nem hagyja változatlanul az egyenletet (szemben a globálissal), mert ebben az esetben a differenciálás hat a fázisra is. Az egyenlet azonban változatlan marad, ha a fázistranszformációval együtt az operátort is transzformáljuk [7]:

$$\partial \rightarrow D = \partial + \frac{iq}{\hbar c} A.$$

D -t kovariáns deriválnak nevezik, A pedig a Maxwell-elmélet vektorpotenciálja, míg q az elektromos töltés.

Ezt az eljárást úgy is meg lehet fogalmazni, hogy a Schrödinger-egyenlet invarianciájának megkövetelése a lokális mértéktranszformációval szemben generálja a vektorpotenciált, vagyis az elektromágneses kölcsönhatást. Ha pedig $\beta(x)$ nem egy egyszerű skálár, hanem többkomponensű transzformáció, akkor az egydimenziós $U(1)$ mértékszimmetria helyett többdimenziós $U(n)$ szimmetriát nyerünk. (Ez az alapvető kölcsönhatások kvantumtérelméletének alapötlete; ily módon áll elő a standard modell $U(1) \otimes SU(2) \otimes SU(3)$ szimmetriája.)

Egy szuperfolyékony rendszerben a globális, egy szupravezetőben pedig a lokális mértékszimmetria sérül spontán módon.

Amikor egy lokális mértékszimmetria spontán módon sérül, akkor a mértéktér „megegyezik” a Goldstone-bozont, „kövér” lesz, vagyis tömegre tesz szert [7]. Ez a mechanizmus jelentkezik a szilárdtest-fizikai Meissner-effektusban. A szupravezető kitaszítja magából a mágneses teret, az csak véges mélységig képes behatolni a szupravezető tartományba. A behatolás mélységét a foton (inverz) tömege adja meg [7]. A foton tömege a lokális mértékinvariancia spontán sérüléséből adódik.

A szupravezetés és a Meissner-effektus megértése segítette az alapvető kölcsönhatások térelméletének kidolgozását is. Az elektromágnesség, a gyenge és az

erős kölcsönhatás elmélete lokális mértékinvarianciával rendelkezik, amely szimmetria megköveteli, hogy az alapvető építőkövek (kvarkok és leptonok) tömege zérus legyen. Tömegre a spontán szimmetriasértés révén tesznek szert; ez a bevezetőben már említett Higgs-mechanizmus.

Ezen a ponton érdekes visszagondolnunk a tömegfogalom átváltozásaira. A klasszikus mechanikában a tömeg az anyag változtathatatlan attribútuma. A relativitás elmélete kapcsán felmerült a sebességfüggése. A kvantummechanikában paraméter (lásd Schrödinger-egyenlet), nem jutott neki operátor, mint az igazi fizikai mennyiségeknek. A mértékelméletben olyan tulajdonság, ami bizonyos fázisban jellemzi az anyagot, de fázisátmenet során el is tűnhet.

Összegzés

Írásunkban a spontán szimmetriasértés jelenségét tárgyaltuk a magfizikai Elliott-modell keretében. A dolog magfizikai érdekességét az adja, hogy ez a modell a magszerkezet egyik legrégebb és legegyszerűbb elmélete. Gömbszimmetrikus héjmodell, egyszerű kölcsönhatással, analitikus megoldással az energia sajátérték-problémájára. Mégis nagyon sokrétű. Születésekor azzal aratott nagy sikert, hogy az atommag kollektív jelenségeit, a deformált magalakot, az együttes forgást stb. mikroszkopikus szempontból, azaz a nukleonok szabadsági fokaira alapozva magyarázta meg. A 60-ik születésnapja környékén pedig új, és mindeddig rejtett vonásaira derült fény. Segítségével nemcsak a kvadrupólus-deformációt, hanem az oktapólusalakot is egyszerűen lehet leírni. Az is kiderült, hogy ebben a keretben a spontán szimmetriasértés mechanizmusa is pontosan tárgyalható.

A szimmetriák vizsgálatának a szempontjából is érdeklődésre tarthat számot az itt vázolt gondolatmenet. Úgy tűnik, hogy a spontán szimmetriasértés mechanizmusát egy, az eddigieknél egyszerűbb példán, a forgási szimmetrián szemlélteti. A forgási szimmetriáról szemléletes képpel rendelkezünk, az elméleti háttér pedig egy aránylag egyszerű kvantummechanikai modell szolgáltatja. Mégis, benne a szimmetriasértés mechanizmusának lényeges elemei – beleértve még a Goldstone-bozonok megjelenését is – sorra fellelhetők. (Érdekes tudománytörténeti tény, hogy Elliott és szerzőtársa kitűnő tankönyve a szimmetriákról [1] számos példáját taglalja a spontán szimmetriasértésnek, de nem említi az Elliott-modellt.)

Irodalom

1. J. P. Elliott, P. G. Dawber: *Symmetry in Physics*. Chippenham: MacMillan Press (1986).
2. J. Cseh, *Phys. Lett. B* 793 (2019) 59.
3. J. P. Elliott, *Proc. Roy. Soc. A* 245 (1958) 128, 562.
4. P. Van Isacker, S. Pittel, *Physica Scripta* 91 (2016) 023009.
5. J. Cseh, *Phys. Lett. B* 281 (1992) 173; J. Cseh, G. Lévai, *Ann. Phys.* (NY) 230 (1994) 165.
6. H. A. Jahn, E. Teller, *Proc. Roy. Soc. A* 161 (1937) 220.
7. K. Huang: *Fundamental Forces of Nature*. Singapore: World Scientific (2007).

AZ ŰRSZEMÉT ÉGI MECHANIKÁJA – 2. RÉSZ

A kisebb vagy a nagyobb űrszemét zuhan-e le előbb?

Földre hulló, el nem égő vasgolyók dinamikájának modellezése

Horváth Gábor,¹ Slíz-Balogh Judit,² Horváth Dániel,¹ Szabó Róbert¹

¹ELTE Biológiai Fizika Tanszék

²ELTE Csillagászati Tanszék

Kétrészes cikkünk első felében az űrszemét keletkezését, jellemzőit, sorsát és mennyiségének időbeli fejlődését foglaltuk össze. E második részben a légkörben el nem égő, gömb alakú űrszemétrészecskék (vasgolyók) Földre hullásának dinamikáját vizsgáljuk számítógépes modellezéssel a légellenállás figyelembevételével. Meghatározzuk egy el nem párolgó vasgolyó becsapódási idejét, sebességét és irányát a mérete, indítási magassága, kezdőiránya és -sebessége függvényében.

A Föld körül keringő űrtárgyak előbb vagy utóbb a légkörbe lépve, a légellenállás miatt folyamatosan süllyedve köröznek és egy idő után a Földnek ütköznek. Gyakorlati szempontból fontos lenne ismerni a Föld légkörébe visszatérő és a Földre zuhanó űrszemét tömegét, összetételét, alakját, sebességét, mozgásirányát és becsapódási idejét. Mivel mindezek mérése rendkívül nehéz, ezért a témában érdekelték gyakran számítógépes szimulációhoz fordulnak. Azon egyszerűnek tűnő kérdésre kerestük a választ, hogy a nagyobb vagy a kisebb űrtárgyak esnek-e le előbb? Nem magától értetődő a válasz, mert mozgásuk sok tényezőtől függ. E kérdés eldöntése céljából számítógéppel modelleztük különböző méretű vasgolyók Földre hullásának dinamikáját a légellenállás figye-

lembevételével [1]. Meghatároztuk az űrbéli kibocsátásuktól a Földbe ütközésükig eltelt becsapódási idejüket, a becsapódási sebességüket és a függőlegestől mért becsapódási irányukat a sugaruk, kezdőmagasságuk, -irányuk és -sebességük függvényében. Eredményeink a kozmikus por el nem égő/párolgó gömb alakú szemcséi [6] földi atmoszférabeli viselkedésének leírására is alkalmazhatók. Habár számos különböző analitikus és számítógépes modell is ismert a műholdak és az űrszemétdarabok mozgásának légellenállást elhanyagoló, illetve figyelembe vevő leírására (például [4, 7–10]), modellezésünk eredményei és videoklipjei könnyen érthetően és szemléletesen válaszolják meg az említett kérdést.

Számítógépes modellezés

Légsűrűség a magasság függvényében

A gravitációs gyorsulás térbeli változásától és a légkör geometriájától függően, a $\rho_{\text{lég}}$ légsűrűség a Föld felszíne fölötti h magasság függvényében a következő:

– állandó gravitációs gyorsulás esetén, síkpárhuzamos légkörben:

$$\rho_1(h) = \rho_0 e^{-\frac{M \gamma m_F h}{RT r_F^2}}, \quad (1)$$

Hálásak vagyunk Slíz Miklósnak (szoftverfejlesztő, Graphisoft) a számítógépes szimulációban nyújtott segítségével.



Horváth Gábor fizikus, az MTA doktora, egyetemi tanár, az ELTE Biológiai Fizika Tanszék Környezetoptika Laboratóriumának vezetője. A vizuális környezet optikai sajátosságait és az állatok látását tanulmányozza, továbbá biomechanikai kutatásokat folytat. Számos szakmai díj és kitüntetés tulajdonosa. Évtizedek óta aktív tudományos ismeretterjesztői munkát is folytat előadások és cikkek formájában.



Horváth Dániel szabadúszó autodidakta informatikus.



Slíz-Balogh Judit a BME-n végzett matematikus-mérnökként, majd menedzserként dolgozott a Graphisoft SE szoftverfejlesztő cégnél. Azután az ELTE-n szerzett csillagász diplomát, ahol 2020 őszén fog doktorálni a Fizika Doktori Iskola Részecskefizika és Csillagászat programjában. Fő kutatási területe az égi mechanika, azon belül a Naprendszer Lagrange-pontjainak kaotikus dinamikája és képkötő polarimetriája.



Szabó Róbert az ELTE hatodéves fizikátörténelem szakos hallgatója. Több cikke jelent meg a *Fizikai Szemle* és a *Természet Világa* folyóiratokban. I. díjat nyert a 2019. évi OTDK Humántudományi Szekciójában, illetve ugyanekkor II. díjat a Tanulás- és Tanításmódszertani – Tudástechnológiai Szekcióban. Természettudományos kutatási területe a fizika és történelem összekapcsolása a tanítás-szakmódszertanban.

– változó gravitációs gyorsulás esetén, síkpárhuzamos légkörben:

$$\rho_2(h) = \rho_0 e^{-\frac{M\gamma m_F}{RT}\left(\frac{1}{r_F} - \frac{1}{r_F+h}\right)}, \quad (2)$$

– változó gravitációs gyorsulás esetén, gömbszimmetrikus légkörben:

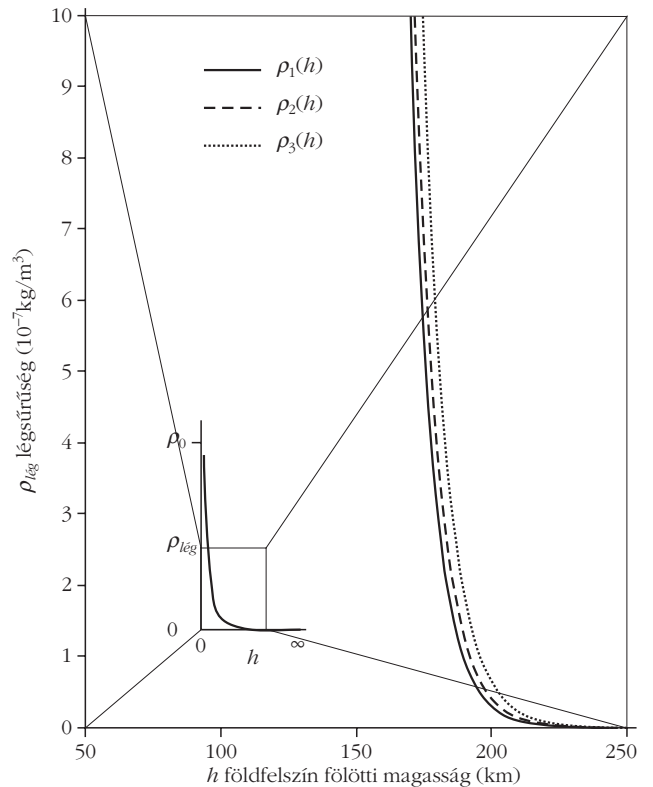
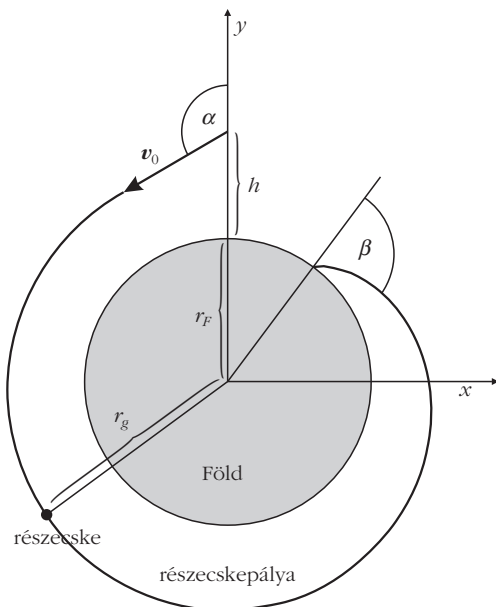
$$\rho_3(h) = \rho_0 \left(\frac{r_F}{r_F+h}\right)^2 e^{-\frac{M\gamma m_F}{RT}\left(\frac{1}{r_F} - \frac{1}{r_F+h}\right)}, \quad (3)$$

ahol $\rho_0 = 1,23 \text{ kg/m}^3$ a levegő sűrűsége a Föld felszínén normál körülmények között (lég hőmérséklet: $T = 300 \text{ K}$, légnyomás: $p = 1 \text{ bar}$), $r_F = 6,371 \cdot 10^6 \text{ m}$ a Föld átlagsugara, $M = 29 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$ a levegő moláris tömege, $\gamma = 6,67408 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ az univerzális gravitációs állandó, $m_F = 5,972 \cdot 10^{24} \text{ kg}$ a Föld tömege, $R = 8,314 \text{ J/K/mol}$ az egyetemes gázállandó. A 8. ábra az (1), (2) és (3) alapján számított $\rho_{\text{lég}}(h)$ légsűrűséget mutatja a h magasság függvényében. Mivel az (1), (2) és (3) szerint egy adott h -ra számított légsűrűségek csak jelentéktelen mértékben különböznek egymástól, ezért számítógépes modellünkben a legegyszerűbb (1) formulát használtuk.

Vasgolyók mozgásegyenlete a Föld légkörében

Számítógépes modellünkben az űrszemét részecskéit r sugarú, $\rho_{\text{vas}} = 7,9 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ sűrűségű vasgolyóknak tekintettük. Csak gömb alakú részecskéket modelleztünk, mert areodinamikai szempontból e forma a legegyszerűbb. Egy bukácsoló űrszemétdarab a sűrűbb légrétegekbe süllyedve a légellenállás miatt

9. ábra. Az (x, y) kétdimenziós számítógépes modellünk geometriája, amiben egy vasgolyót \mathbf{v}_0 kezdősebesség-vektorral indítottunk a Föld felszíne fölött h magasságból, a helyi függőlegestől mért α irányszögben. A részecske a függőlegessel β szöget bezárva csapódik a Földbe. Az ábrán r_F a Föld sugarát, r_g a vasgolyó Föld középpontjától mért távolságát jelöli.



8. ábra. A $\rho_{\text{lég}}$ légsűrűség a Föld felszíne fölötti h magasság függvényében, ahol a $\rho_1(h)$, $\rho_2(h)$ és $\rho_3(h)$ függvényeket az (1), (2) és (3) kifejezések írják le. A kis betétábrán a $\rho_{\text{lég}}(h)$ függvény látható, aminek csak a jelentősebben változó részét nagyítottuk fel a nagy ábrán.

fölhevül és kisebb darabok szakadhatnak le róla. A levált darabok véletlenszerű irányváltozásai miatt lehetetlen előre jelezni alakjuk és forgásuk időbeli változását. Ezáltal tehát a pontos mozgáspálya, becspódási hely és idő sem számítható. Nem vizsgáltuk a modellvasgolyók légkörbeli elégését, elpárolgását. Ehelyett azt feltételeztük, hogy a Föld körül mozgó, majd lezuhanó vasgolyók r sugara végig állandó. Az űrszemét égése/párolgása nagyon összetett kémiai, termo- és areodinamikai folyamat, ami függ az űrszemét alakjától, kémiai minőségétől, valamint a légkör térben változó összetételétől és sűrűségétől is [4].

A Föld felszíne fölötti $h = 50, 100, 150, 400, 1000$ és $36\,000 \text{ km}$ magasságokból induló vasgolyók zuhanó mozgását szimuláltuk, ugyanis e magasságokon kering az űrszemét zöme: az ember által irányított űrmissziók főként az alacsony Föld-pályákon (LEO), azaz 400 km magasság alatt vannak, miközben a Föld-megfigyelő műholdak 800 és 1500 km magasságok között működnek, amely régió fölött, $h = 35\,786 \text{ km}$ magasságban húzódik a geostacionárius pálya.

Az űrszemétrészek \mathbf{v}_0 kezdősebesség-vektora helyi függőlegestől mért α irányszögének (9. ábra) egyik lehetséges csoportját a majdnem vízszintes irányok ($\alpha \approx 90^\circ$) képezik. Ez például akkor fordulhat elő, amikor két, közel egyforma irányban mozgó űrtárgy egymás útját keresztezi és a gyorsabb ütközik a lassabbal.

A \mathbf{v}_0 kezdősebesség-vektor irányának egy másik lehetséges esete, amikor a kezdeti α irányszög 0° és 360° között egyenletesen oszlik el. Ez például egy

műhold robbanásakor következhet be, vagy amikor két ellentétes irányban mozgó űrtárgy egymás útját keresztezve összeütközik. Mindkét esemény a szélrózsza minden irányában számos űrszemétdarab szétrepülését eredményezi.

A 9. ábra szerinti (x, y) kétdimenziós koordináta-rendszerben tekintsünk egy \mathbf{v}_0 kezdősebesség-vektorral, α irányszöggel, a Föld felszíne fölött h magasságból induló vasgolyót, aminek helyzeti energiája

$$U = -\frac{\gamma m m_F}{r_g}, \quad (4)$$

ahol r_g a vasgolyó távolsága az m_F tömegű Föld középpontjától és

$$m = \frac{4\pi\rho_{vas}r^3}{3} \quad (5)$$

az r sugarú vasgolyó tömege. A golyóra ható légellenállási erő nagysága

$$S = \frac{Ac\rho_{lég}v^2}{2}, \quad (6)$$

ahol $\rho_{lég}$ a már említett légsűrűség, v a golyó sebessége, $c = 0,4$ a gömb közegellenállási tényezője és

$$A = \pi r^2 \quad (7)$$

a golyó homlokfelülete. A golyó $\mathbf{r}_g(t) = [x(t), y(t)]$ helyvektorának mozgásegyenlete a földi gravitációs mezőben és légkörben

$$m \frac{d^2\mathbf{r}_g}{dt^2} = \mathbf{G} + \mathbf{S}, \quad (8)$$

ahol

$$\mathbf{G} = -\frac{\gamma m m_F}{r_g^2} \frac{\mathbf{r}_g}{r_g} \quad (9)$$

a golyóra ható gravitációs erő és

$$\mathbf{S} = -\frac{0,4\pi r^2 v^2}{2} \rho_0 e^{-\frac{M\gamma m_F}{RT r_F^2} h} \frac{\mathbf{v}}{v} \quad (10)$$

a rá ható légellenállási erő a Föld felszíne fölött

$$h = r_g - r_F \quad (11)$$

magasságban. A (8), (9), (10) és (11) egyenletekből adódik a vasgolyó mozgásegyenlete:

$$\frac{d^2\mathbf{r}_g}{dt^2} = -\frac{\gamma m_F}{r_g^3} \mathbf{r}_g - \frac{0,15\rho_0}{\rho_{vas}r} e^{-\frac{M\gamma m_F(r_g-r_F)}{RT r_F^2} h} \mathbf{v}\mathbf{v}. \quad (12)$$

(12)-ből a vasgolyó $x(t)$ és $y(t)$ koordinátáira a 9. ábra koordináta-rendszerben a következő differenciálegyenletek adódnak:

$$\begin{aligned} \frac{d^2x(t)}{dt^2} &= -\frac{\gamma m_F}{r_g(t)^3} x(t) - \\ &\quad - \frac{0,15\rho_0}{\rho_{vas}r} e^{-\frac{M\gamma m_F[r_g(t)-r_F]}{RT r_F^2} h} v(t) v_x(t), \\ \frac{d^2y(t)}{dt^2} &= -\frac{\gamma m_F}{r_g(t)^3} y(t) - \\ &\quad - \frac{0,15\rho_0}{\rho_{vas}r} e^{-\frac{M\gamma m_F[r_g(t)-r_F]}{RT r_F^2} h} v(t) v_y(t), \end{aligned} \quad (13)$$

$$r_g(t) = \sqrt{x(t)^2 + y(t)^2},$$

$$v(t) = \sqrt{v_x(t)^2 + v_y(t)^2},$$

$$v_x(t) = \frac{dx(t)}{dt},$$

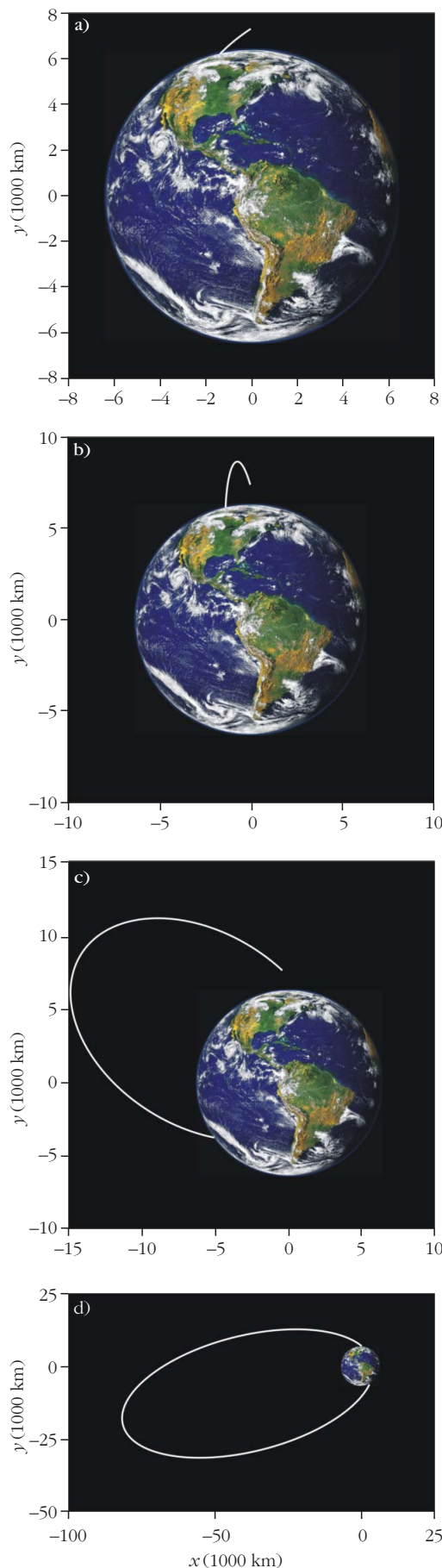
$$v_y(t) = \frac{dy(t)}{dt},$$

ahol $\gamma = 6,67408 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}\text{s}^{-2}$, $m_F = 5,972 \cdot 10^{24} \text{ kg}$, $r_F = 6,371 \cdot 10^6 \text{ m}$, $\rho_0 = 1,23 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{vas} = 7,9 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$, $M = 29 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$, $R = 8,314 \text{ J/K/mol}$, $T = 300 \text{ K}$. A (13) mozgásegyenleteket numerikusan oldottuk meg Runge–Kutta–Fehlberg-integrátorral [11], amiben a lépésközt az $\varepsilon = 10^{-16}$ pontosság, vagyis az egységnyi lépésre elfogadható hibaérték szabályozta. Egy előzetes szimulációknban figyelembe vettük a Föld geoid (nem gömb alakú) alakját is, ám azt találtuk, hogy vasgolyóink becsapódási idejére e geoidnak csak elhanyagolható (0,01%) hatása van. Ezért a továbbiakban a Földet gömb alakúnak tekintettük.

Feltételezésünk szerint a vizsgált homogén, tömör vasgolyók kezdetben nem forogtak, így rájuk csak a földi gravitációs erő és a légellenállási erő hat, mindkettő támadási pontja átmegy a golyók tömegközéppontján, ami megegyezik a gömbök geometriai középpontjával. Következésképpen, a vasgolyókra nem hat eredő forgatónyomaték, miáltal nem jönnek forgásba. Ha nem forognak, akkor az aerodinamikai Magnus-erő sem lép föl rajtuk. Ezáltal mozgásuk megegyezik egy tömegpontéval, amire az említett két erő hat.

Eredmények

A 10. ábra a Föld felszíne fölött $h = 1000 \text{ km}$ magasról, különböző v_0 kezdősebességgel és α irányszöggel induló, $r = 1 \text{ cm}$ sugarú vasgolyók pályáit mutatja. A Föld légkörén kívül (gyakorlatilag 300 km-nél magasabban) e pályák elliptikusak (mert v_0 kisebb a $h = 1000 \text{ km}$ magasság 10,446 km/s szökési sebességénél), de balisztikussá válnak, miután a golyók belépnek a sűrűbb légrétegekbe. Az indítás és a Földbe csapódás között



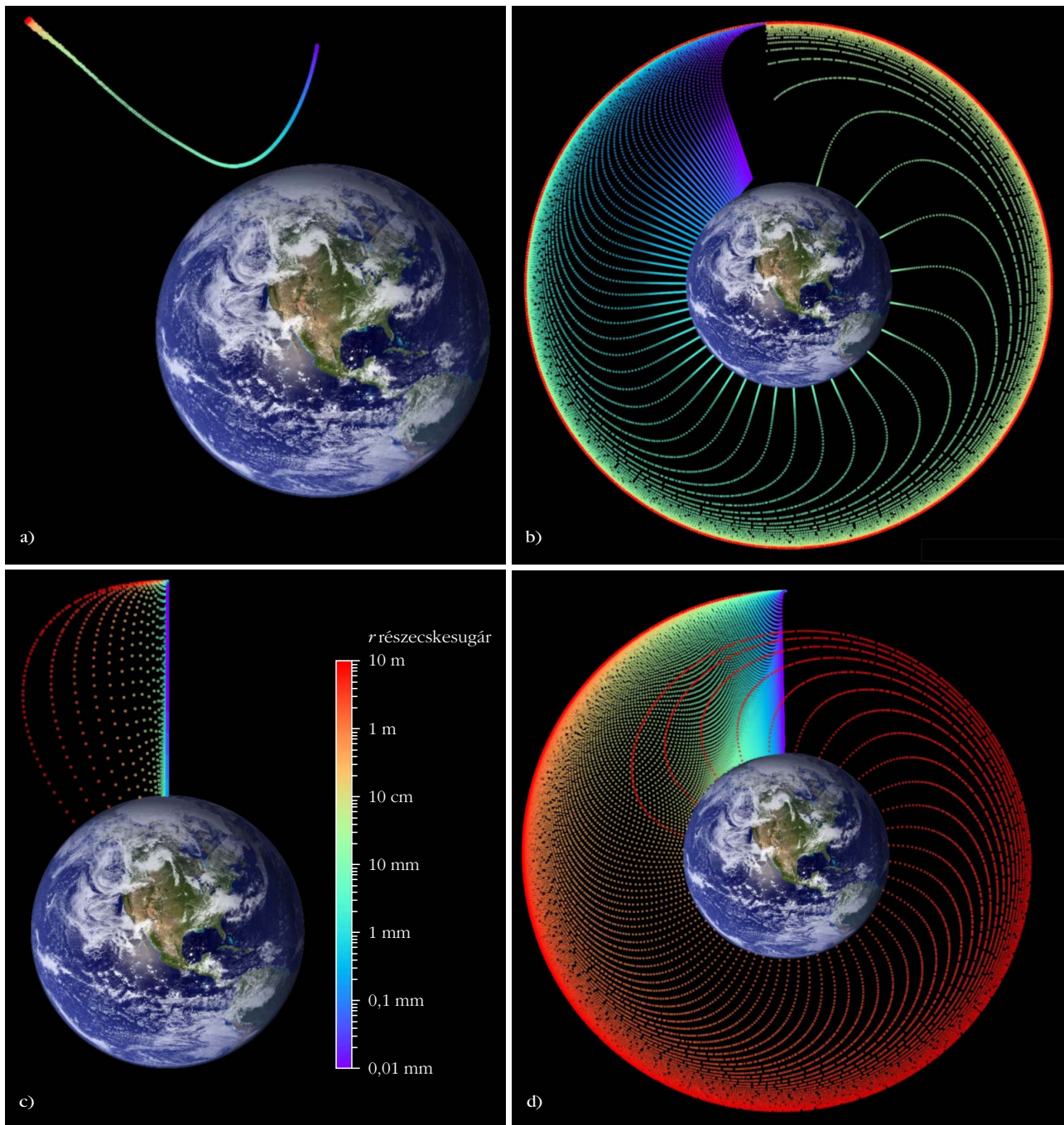
eltelt t időtartamot a továbbiakban becsapódási időnek nevezzük, ami érthetően rövidebb (7,2, illetve 27,4 perc) vagy hosszabb (135,4, illetve 1540,8 perc), ha a vasgolyó pályája rövidebb (10.a és 10.b ábra) vagy hosszabb (10.c és 10.d ábra).

A 11.a ábra vízszintesen ($\alpha = 90^\circ$), $v_0 = 7,847$ km/s kezdősebességgel, $h = 100$ km magasan lévő azonos pontból indított 1000, különböző r sugarú vasgolyó helyzetét mutatja az indításuk után 10 perc 22 másodperccel. Ennek érdekében, hogy a Föld átmérőjéhez képest a földfelszín fölötti vékony rétegben lejátszódó mozgásokat jobban láthatóvá tegyük, e réteg vastagságát ábrázolásakor a 100-szorosára nagyítottuk (természetesen a számításainkban nem). Habár mind az 1000 vasgolyó azonos pontból indult, egymáshoz képesti helyzetük jelentősen megváltozott a méretfüggő légellenállás miatt. A mozgáspályák e méret szerinti elkülönülése következtében a vasgolyók eltérő helyének sorozata kezdetben egy parabolászerű láncot formál (11.a ábra). E lánc legalsó része zöldes, mely színárnyalat az $5 \text{ mm} < r < 50$ mm sugarakat kódolja. Tehát az ilyen méretű vasgolyók esnek először a Földre (lásd az 1. videoklipet, <http://fizikaiszemle.hu/extra/Horvath2006/1>).

A 11.b ábra vízszintesen ($\alpha = 90^\circ$), $v_0 = 7,817$ km/s kezdősebességgel, $h = 150$ km magasan lévő azonos pontból indított 100, különböző r sugarú vasgolyó helyzetét mutatja az indításuk után 1 h 28 perc 24 másodperccel, amikor a Föld felszíne fölötti régiót 66-szorosára nagyítottuk. A különböző méretű vasgolyók – méretfüggő légellenállás miatt eltérő – pályái jól kivehetők, amelyek mindegyike látszólag majdnem merőlegesen ($\beta \approx 0^\circ$ becsapódási szöggel) éri el a Föld felszínét. E virtuális meredek becsapódást azonban csak a Föld fölötti tartomány 66-szoros nagyítása okozza, valójában ennél jóval laposabb, mert a β becsapódási szög erősen függ a vasgolyók r sugarától és alig függ a h indítási magasságtól (lásd később: 13. ábra). A 11.b ábrán elsőként az $5 \text{ mm} < r < 50$ mm sugarú (zöld) vasgolyók csapódnak a Földre, majd az egyre kisebbek (kék-lila), illetve egyre nagyobbak (narancssárga-piros), végül a legnagyobb, $r = 10$ m sugarú (vörös) golyó (2. videoklip, <http://fizikaiszemle.hu/extra/Horvath2006/2>).

A 11.c ábra vízszintesen ($\alpha = 90^\circ$), $v_0 = 7,877$ km/s kezdősebességgel, $h = 50$ km magasan lévő azonos pontból indított 20 különböző r sugarú vasgolyó helyzetét mutatja az indításuk után 36 perc 8 másodperccel, amikor a Föld felszíne fölötti régiót 200-szorosára nagyítottuk. Ebben az esetben először az $50 \text{ mm} < r < 100$ mm sugarú (zöld-citromsárga) vasgolyók zuhannak a Földre, majd az egyre nagyobbak (narancs-piros), illetve az egyre kisebbek (lila-kék), végül a legkisebb, $r = 0,01$ mm-es (lila) golyó (3. videoklip, <http://fizikaiszemle.hu/extra/Horvath2006/3>).

10. ábra. Egy 1 cm sugarú, a Föld felszíne fölött $h = 1000$ km magasságról indított, $7,9 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ sűrűségű vasgolyó néhány jellemző pályája különböző v_0 kezdősebességek és a helyi függőlegestől mért α irányiszögek esetén. Kezdeti feltételek: a) $v_0 = 6,87$ km/s, $\alpha = 122,6^\circ$, b) $v_0 = 4,1$ km/s, $\alpha = 16,38^\circ$, c) $v_0 = 8,18$ km/s, $\alpha = 45^\circ$, d) $v_0 = 9,95$ km/s, $\alpha = 54,4^\circ$. Az indítástól a földbeesésig eltelt idő: a) 7,2 perc, b) 27,4 perc, c) 135,4 perc és d) 1540,8 perc.



11. ábra. a) Vízszintesen ($\alpha = 90^\circ$), $v_0 = 7,847$ km/s kezdősebességgel, a Föld felszíne fölött $h = 100$ km magasságban indított 1000 különböző r sugarú vasgolyó helyei az indításuk után 10 perc 22 másodperccel (hozzá tartozik az 1. videoklip, ami indításuk után 2 óra 18 perc 14 másodpercig követi a golyók útját, a videó a részabrára kattintva indul). A Föld felszíne fölötti régiót ($h \geq 0$) 100-szorosára nagyítottuk a jobb láthatóság kedvéért.

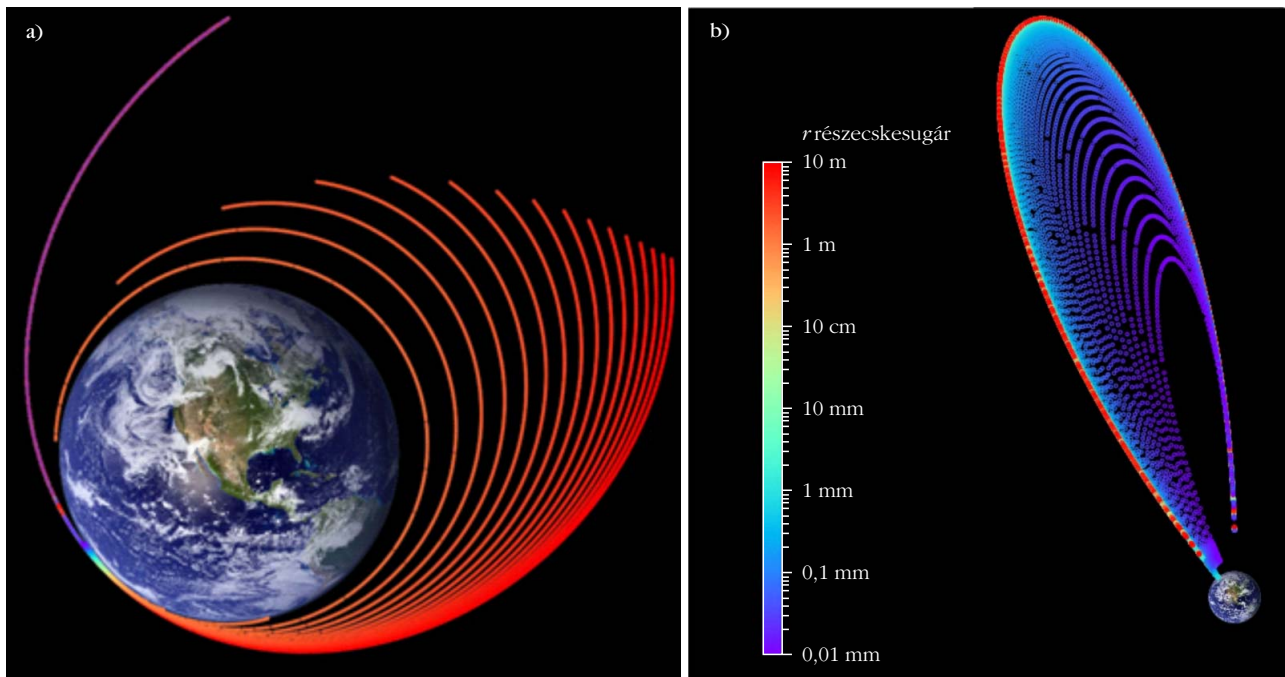
b) Vízszintesen ($\alpha = 90^\circ$), $v_0 = 7,817$ km/s kezdősebességgel, $h = 150$ km magasságból indított 100 eltérő r sugarú vasgolyó pályája 1 óra 28 perc 24 másodperccel az indításukat követően (hozzá tartozik a 2. videoklip, ami indításuk után 6 óra 19 perc 18 másodpercig követi a golyók útját, a videó a részabrára kattintva indul). A Föld fölötti régiót 66-szorosára nagyítottuk.

c) Vízszintesen ($\alpha = 90^\circ$), $v_0 = 7,877$ km/s kezdősebességgel, $h = 50$ km magasságból indított 20 különböző r sugarú vasgolyó pályái az indításuk után 36 perc 8 másodperccel (hozzá tartozik a 3. videoklip, ami indításuk után 2 óra 10 perc 27 másodpercig követi a golyók útját, a videó a részabrára kattintva indul). A Föld fölötti tartományt 200-szorosára nagyítottuk.

d) Vízszintesen ($\alpha = 90^\circ$), $v_0 = 7,847$ km/s kezdősebességgel, $h = 100$ km magasságból indított 100 eltérő r sugarú vasgolyó pályái az indításuk után 1 óra 48 perc 8 másodperccel (hozzá tartozik a 4. videoklip, ami indításuk után 2 óra 18 perc 14 másodpercig követi a golyók útját, a videó a részabrára kattintva indul). A Föld fölötti tartományt 100-szorosára nagyítottuk.

A különböző r sugarakat az ábrán és vele egyezően a videoklipeken eltérő színekkel kódoltuk a lila legkisebttől (0,01 mm) a piros legnagyobbig (10 m).

A 11.d ábra vízszintesen ($\alpha = 90^\circ$), $v_0 = 7,847$ km/s kezdősebességgel, $h = 100$ km magasan lévő azonos pontból indított 100, különböző r sugarú vasgolyó helyét mutatja az indításuk után 1 óra 48 perc 8 másodperccel,



12. ábra. a) A függőlegestől $\alpha = 122,6^\circ$ szögben, $v_0 = 4,57$ km/s kezdősebességgel, a Föld fölött $h = 10000$ km magasból indított 100 különböző r sugarú vasgolyó pályája az indítás után 2 óra 24 perc 8 másodperccel (hozzá tartozik az 5. videóklip, ami indítás után 6 óra 44 perc 38 másodpercig követi a golyók útját, a videó a részabrúra kattintva indul). A Föld fölötti régiót ($h \geq 0$) méretarányos.

b) A függőlegestől $\alpha = 45^\circ$ szögben, $v_0 = 5,65$ km/s kezdősebességgel, a Föld fölött $h = 100$ km magasból indított 100 eltérő r sugarú vasgolyó pályája az indításukat követően 36 perc 8 másodperccel (hozzá tartozik a 6. videóklip, ami indítás után 2 óra 31 perc 29 másodpercig követi a golyók útját, a videó a részabrúra kattintva indul). A Föld fölötti régiót 100-szorosára nagyítottuk.

A különböző r sugarakat az ábrán és vele egyezően a videóklipeken eltérő színekkel kódoltuk a lila legkisebbtől (0,01 mm) a piros legnagyobbig (10 m).

amikor a Föld felszíne fölötti régiót 100-szorosára nagyítottuk. Ekkor először az $5 \text{ mm} < r < 50 \text{ mm}$ sugarú (zöld) vasgolyók zuhannak a Földre, majd az egyre kisebbek (zöld-kék-lila), illetve az egyre nagyobbak (citromsárga-narancssárga-piros), végül a legnagyobb ($r = 10 \text{ m}$, piros) és a legkisebb ($r = 0,01 \text{ m}$, lila) golyó (4. videóklip, <http://fizikaiszemle.hu/extra/Horvath2006/4>).

A 12.a ábra az $\alpha = 122,6^\circ$ irányszöggel, $v_0 = 4,57$ km/s kezdősebességgel, $h = 10000$ km magasan lévő azonos pontból indított 100, különböző r sugarú vasgolyó helyét mutatja az indításuk után 2 óra 24 perc 8 másodperccel, amikor a Föld felszíne fölötti régió méretarányos. A golyók mozgáspályái ellipszisek, amelyek Földtől legtávolabbi pontjának (apogeumának) iránya nem fordul el. A légkörön kívül a különböző méretű golyók együtt mozognak. Amikor azonban a légkörbe lépnek, először az $1 \text{ mm} < r < 800 \text{ mm}$ sugarú (zöld-citromsárga) golyók esnek a Földre, aztán az egyre kisebbek (kék-lila), végül a legnagyobb ($r = 10 \text{ m}$, piros) golyó (5. videóklip, <http://fizikai szemle.hu/extra/Horvath2006/5>).

A 12.b ábra az $\alpha = 45^\circ$ irányszöggel, $v_0 = 5,65$ km/s kezdősebességgel, $h = 10000$ km magasan lévő azonos pontból indított 100, különböző r sugarú vasgolyó helyét mutatja az indításuk után 36 perc 8 másodperccel, amikor a Föld felszíne fölötti régiót 100-szorosára nagyítottuk. Az $\alpha = 45^\circ$ kezdőszög következtében a pályák elnyúlt ellipszisek, amelyek a Föld felszínén végződnek. Ekkor először az $1 \text{ m} < r < 10 \text{ m}$ sugarú (piros) golyók zuhannak a Földre, majd az

egyre kisebbek (lila-kék), végül a legkisebb ($r = 0,01 \text{ mm}$, lila) golyó (6. videóklip, <http://fizikaiszemle.hu/extra/Horvath2006/6>).

A 13.a ábra a vízszintesen ($\alpha = 90^\circ$),

$$v_0(h) = \sqrt{\frac{\gamma m_F}{r_F + h}}$$

körpályasebességgel (1. táblázat), h magasságból indított vasgolyók t becsapódási idejét mutatja az r sugaruk függvényében. Az először a Földbe csapódó golyó r^* sugara 1 mm-ről 500 mm-ig nő, amint h 150 km-ről 10 km-re csökken. Az r sugar r^* -hoz képesti fokozatos növekedése vagy csökkenése a t becsapódási idő fokozatos növekedését eredményezi. Ha $h \geq 100 \text{ km}$, akkor a legnagyobb golyók fognak a Földbe csapódni

1. táblázat

A körpályán történő keringés $v_0(h) = (\gamma m_F / (r_F + h))^{1/2}$ sebessége a Föld felszíne fölötti h magasság függvényében					
h (km)	v_0 (km/s)	h (km)	v_0 (km/s)	h (km)	v_0 (km/s)
10	7,902	60	7,871	110	7,841
20	7,896	70	7,865	120	7,835
30	7,890	80	7,859	130	7,829
40	7,883	90	7,853	140	7,823
50	7,877	100	7,847	150	7,817

legutoljára (11.b ábra, 2. videoklip). Ha $h = 100$ km, akkor legutoljára a legnagyobb ($r = 10$ m, piros) és a legkisebb ($r = 0,01$ mm, lila) golyó egyszerre ütközik a Földdel (11.c ábra, 3. videoklip). Amennyiben $h < 100$ km, akkor a legkisebb golyók esnek le legutoljára (11.d ábra, 4. videoklip).

A 13.b ábra a vízszintesen ($\alpha = 90^\circ$),

$$v_0(h) = \sqrt{\frac{\gamma m_F}{r_F + h}}$$

körpályasebességgel (1. táblázat), h magasságból indított vasgolyók v becsapódási sebességét mutatja az r sugaruk függvényében. Adott r sugárnál v csak csekély mértékben függ h -tól. h növekedésével v nő, különösen a nagyobb vasgolyók esetén.

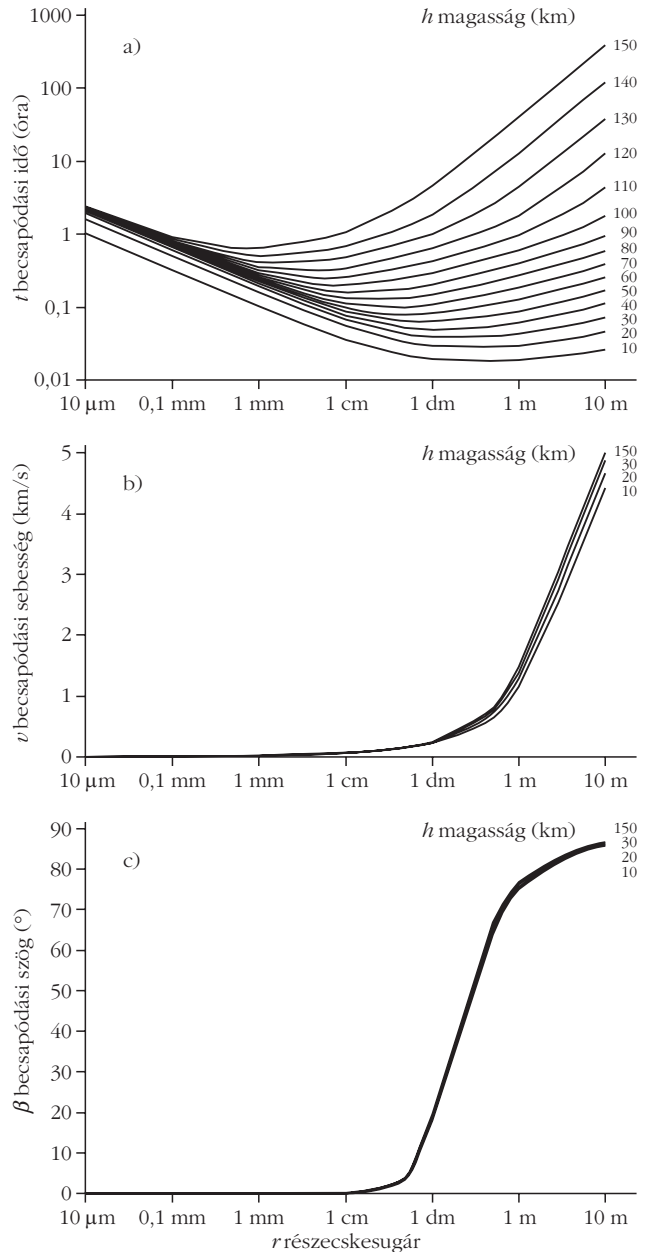
A 13.c ábra a vízszintesen ($\alpha = 90^\circ$),

$$v_0(h) = \sqrt{\frac{\gamma m_F}{r_F + h}}$$

körpályasebességgel (1. táblázat), h magasságból indított vasgolyók függőlegestől mért β becsapódási szögét mutatja az r sugaruk függvényében. β gyakorlatilag független h -tól, és 0° -ról 85° -ra nő, miközben r 0,01 mm-ről 10 m-re növekszik. Az $r < 10$ mm sugarú vasgolyók gyakorlatilag függőlegesen ($\beta \approx 0^\circ$) zuhannak a Földre.

A 14. ábra egy $h = 1000$ km magasságban felrobbant űrszemét vasgolyókkal modellezett részecskéinek pályáit mutatja a robbanás után 1 óra 12 perc 8 másodperccel, amikor a Föld felszíne fölötti régió méretarányos. Minden golyó $v_0 = 7$ km/s kezdősebességű volt, sebességvektoruk irányszöge $\alpha = 0^\circ$ és $\alpha = 360^\circ$ között egyenletesen oszlott el $\Delta\alpha = 12^\circ$ lépésközzel (7. videoklip, <http://fizikaiszemle.hu/extra/Horvath2006/7>). A légkörön kívül minden golyó azonos ellipszispályán mozog, mert csak a Föld gravitációja hat rájuk. Miután beléptek a légkörbe, a különböző sugarú golyók eltérő ballisztikus pályát követnek a méretfüggő légellenállás okán.

A 15. ábra a Föld fölött $h = 100, 400, 1000$ és 36000 km magasságban felrobbant űrszemét vasgolyókkal modellezett részecskéi becsapódási idejének térképeit mutatja. Ha egy golyó $v_0(v_0, \alpha)$ kezdősebesség-vektor



13. ábra. Vízszintesen ($\alpha = 90^\circ$), v_0 körpályasebességgel (1. táblázat), a Föld fölött különböző h magasságból kilőtt vasgolyók indításuktól mért t becsapódási ideje (a), v becsapódási sebessége (b) és a helyi függőlegestől mért β becsapódási szöge (c) az r sugaruk függvényében.

ra a v_0 - α térképen feketével jelölt területre esik, akkor a golyó 50 napon belül a Föld felszínére hull.

A 2. táblázat a Föld felszíne fölött $h = 100, 400, 1000$ és 36000 km magasságban felrobbant űrtárgy $r = 0,01$ és 10 m sugarú, vasgolyókkal modellezett részeinek átlagos $\langle t \rangle$ becsapódási idejét tartalmazza, amikor a golyók kezdősebessége $v_0 = 0$ -tól 23 km/s-ig változik $\Delta v_0 = 0,23$ km/s lépésközzel, míg a helyi függőlegestől mért α irányszöge $\alpha = 0^\circ$ -tól 360° -ig $\Delta\alpha = 3,6^\circ$ lépésközzel. Egy adott h magasságról általában a kisebb, $r = 0,01$ mm sugarú golyók esnek később a Földre ($\langle t \rangle = 317, 313, 314, 546$ perc), mint az $r = 10$ m-es nagyobbak ($\langle t \rangle = 135, 157, 143, 401$ perc). Ugyanakkor, adott

2. táblázat				
A Föld felszíne fölött h magasságban felrobbant űrtárgy r sugarú vasgolyókkal modellezett részeinek átlagos $\langle t \rangle$ (perc) becsapódási ideje				
r	h			
	100 km	400 km	1000 km	36 000 km
0,01 mm	316,8 perc	313,3 perc	314,4 perc	545,6 perc
10 m	134,5 perc	156,5 perc	143,0 perc	401,2 perc

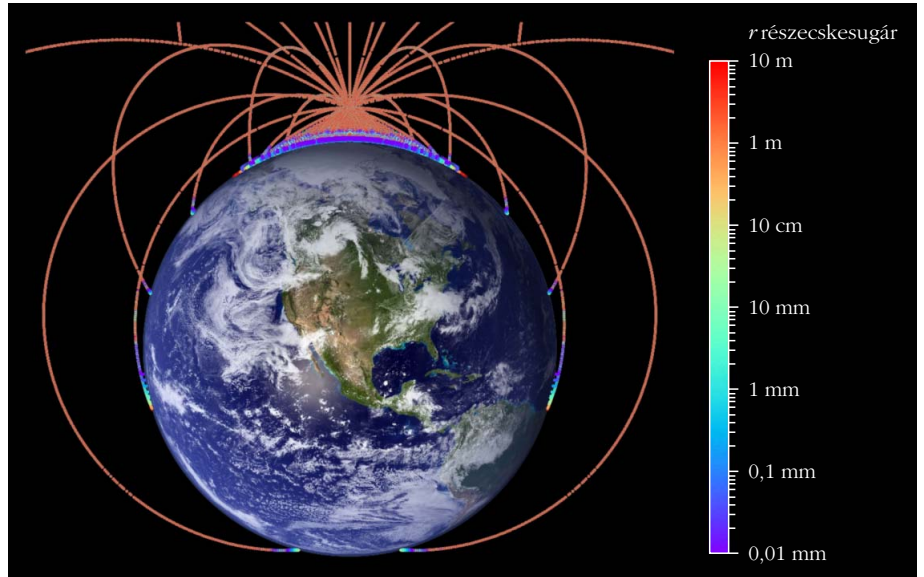
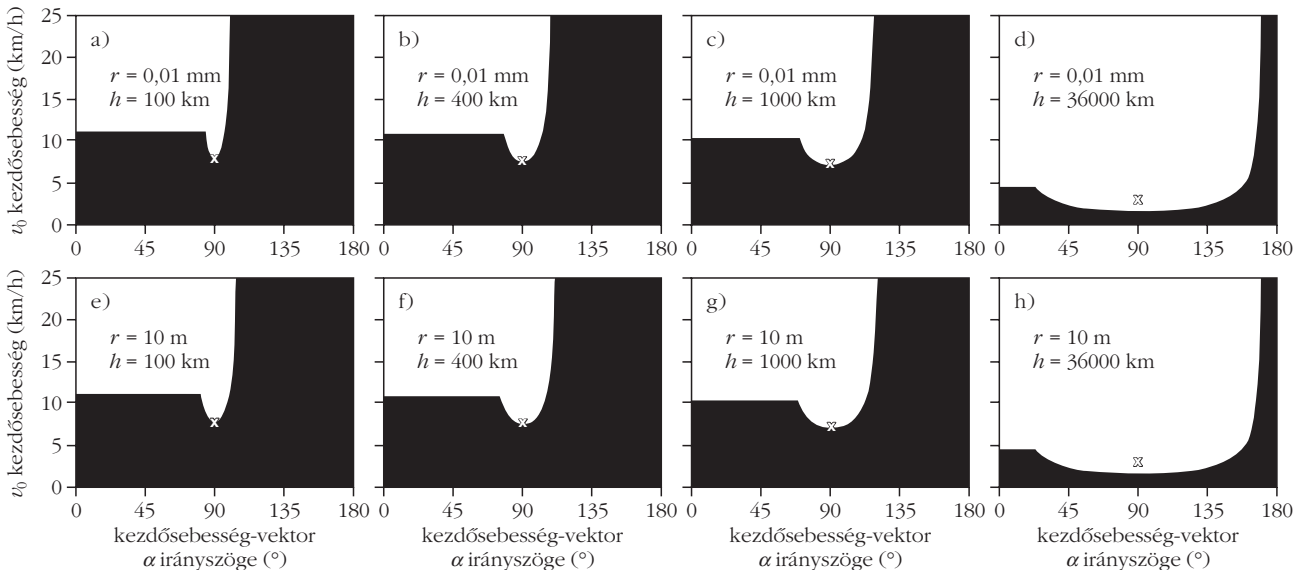
A vasgolyók sűrűsége $7,9 \cdot 10^3$ kg/m³, $v_0(v_0, \alpha)$ kezdősebesség-vektorának nagysága $v_0 = 0$ -tól 23 km/s-ig változik $\Delta v_0 = 0,23$ km/s lépésközzel, míg a helyi függőlegestől mért α irányszöge $\alpha = 0^\circ$ -tól 360° -ig $\Delta\alpha = 3,6^\circ$ lépésközzel.

sugár mellett az átlagos becspodási idők gyakorlatilag azonosak (313–317 vagy 135–157 perc) $h = 100, 400$ és 1000 km esetén, míg $\langle t \rangle = (546$ vagy 401 perc) sokkal nagyobb a $h = 36\,000$ km magasságról történő leeséskor.

Elemzés

A fentiekből látszik, hogy nincs egyetlen jó válasz a következő kérdésre: a nagyobb vagy a kisebb űrszemét esik-e le előbb a Földre? Ugyanis a 13.a ábra szerint a helyes válasz attól függ, hogy milyen magasságból történik a zuhanás. Nagyobb (110–150 km) magasságokon keringő tömör vasgömbök esetén az 1 mm körüliek hullanak le legelőször, majd őket követik az ennél kisebbek és nagyobbak, végül a legnagyobbak (10 m körüliek) csapódnak a Földbe. 100 km körüli magasságon való keringéskor az 1 cm körüli vasgömbök esnek le leghamarabb, utánuk jönnek a kisebbek és nagyobbak, végül a legkisebbek (0,01 mm körüliek) és a legnagyobbak (10 m körüliek) egyszerre hullanak le. 50 km-nél alacsonyabban történő keringéskor az 1 dm és 1 m körüli vasgolyók pottyannak le legelőbb, utánuk a kisebbek és nagyobbak, végül a legkisebbek (0,01 mm körüliek) esnek a Földre.

15. ábra. A Föld fölött $h = 100, 400, 1000$ és 36000 km magasságokban bekövetkezett robbanás szimulációs eredményei, amikor a szélrózsa irányában egyenletesen szétrepülő vasgolyók r sugara $0,01$ mm és 10 m között, v_0 kezdősebessége 0 km/s $\leq v_0 \leq 23$ km/s között $\Delta v_0 = 0,23$ km/s lépésközzel és függőlegestől mért kezdő irányszögük $0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ között $\Delta \alpha = 3,6^\circ$ lépésközzel változott. Ha a $\mathbf{v}_0(v_0, \alpha)$ kezdősebesség-vektor a v_0 - α térképen feketével jelölt területre esik, akkor a robbanás darabjai 50 napon belül esnek a Föld felszínére. Az \times szimbólum a vízszintes ($\alpha = 90^\circ$) $v_0(h) = (\gamma m_F / (r_F + h))^{1/2}$ körpályasebességet (1. táblázat) jelzi egy adott h magasságban.



14. ábra. A Föld fölött $h = 1000$ km magasságban történt robbanáskor szétrepülő 30 (különböző r irányszögű) $\times 11$ (különböző r sugarú) = 330 darab vasgolyó pályája 1 óra 12 perc 8 másodperccel a robbanás után (hozzá tartozik a 7. videóklip, ami a robbanás után 1 óra 54 perc 20 másodpercig követi a golyók útját, a videó az ábrára kattintva indul). A vasgolyók kezdősebessége $v_0 = 7$ km/s, kezdősebesség-vektoruk irányszöge pedig $\alpha = 0^\circ$ és 360° között változik $\Delta \alpha = 12^\circ$ lépésközzel. A Föld fölötti régió ($h \geq 0$) méretarányos.

A különböző r sugarakat az ábrán és vele egyezően a videóklipeken eltérő színekkel kódoltuk a lila legkisebbtől (0,01 mm) a piros legnagyobbig (10 m).

A legelső gömb alakú űrszemét az első Föld körüli szovjet mesterséges hold, az 1957 októberében indított Sputnik-1 (átmérő: 58 cm, tömeg: 83,6 kg) lett, miután befejezte küldetését. E 96,2 perc keringésidőjű műhold Föld körüli elliptikus pályájának földközeli (perigeum) és földtávoli (apogeum) pontja 215 és 939 km magasságban volt. 1440 keringést követően, 1958. január 4-én, indítása után 92 nappal belépett a földi légkörbe s elégett (https://en.wikipedia.org/wiki/Sputnik_1).

1980 és 1988 között a szovjet RORSAT műholdak nukleáris reaktorai 900–950 km magasságban folyékony NaK hűtőanyag-keveréket bocsátottak az űrbe 900 kg/m³ sűrűségű apró NaK golyócskák formájában [4]. A kisebb, azaz nagyobb felület/tömeg arányú NaK golyócskák a nagy sugárnyomás és légellenállás miatt hamar a Földre hullottak. Az 1990-es napaktivitás csúcsakor megnövekedett légellenállás hatására a milliméternél nem nagyobb golyócskák mennyisége 1992-re 70%-kal csökkent.

Egy rádiókommunikációs kísérletben 1961-ben és 1963-ban két különböző Föld körüli pályára telepítettek 1,78 cm hosszú és 17,8–25,4 μm átmérőjű réztűk (Westford Needles, 5. ábra az első részben) millióit. E réztűk csak rövid ideig tartózkodtak pályájukon a nagy felület/tömeg arányuk miatt jelentős sugárnyomás és légellenállás következtében [4].

Egy űrszemét háromféleképpen tud előidézni problémát: (1) ütközik egy űrhajóval vagy műhoddal, (2) a Földre esik, mielőtt teljesen elégme/elpárologna, vagy (3) ütközik egy másik űrszeméttel és növeli a további károk okozására képes űrszemétmennyiséget.

Az ESA 2019-es becslése szerint a Föld körüli pályákon keringő, 10 cm-nél nagyobb űrszemétből közel 34 000 darab van, az 1 és 10 cm közöttiekből 900 000 darab, míg az 1 mm-től 1 cm-ig terjedőkből 128 000 000 [12]. A kisebb méretű űrszemétdarabok zöme teljesen elég a légkörben, ám a nagyobbak elérhetik a felszínt. Az űrszemét jelenleg még csak ritkán jelent gondot az embereknek, mert amelyek nem égnek el a légkörben, nagy valószínűséggel a Föld felszínének 70%-át kitevő óceánokba vagy ritkán lakott területekre esnek. Az űrszemét egyre növekvő mennyisége miatt azonban a kutatók megoldásokat keresnek az űrszemét légkörben való elégetésére. Az űrszemét csökkentésének módja nagymértékben függ a mérettől és alaktól. A legkevésbé valószínű a nagy és áramvonalas űrszemétdarabok elégetése. A forgalomból már kivont, alacsony Föld-pályás (LEO) műholdaknál például passzív fűtéssel elérhető, hogy a műhold darabjai elveszítsék áramvonalas formájukat [13]. Lássunk néhány konkrét ötletet az űrszemét mennyiségének csökkentésére:

1. A $h < 400$ km Föld-pályákon keringő űrszemétdarabok úgy tűntethetők el, hogy beléptetik őket a légkörbe, miközben a kevésbé forgalmas geostacionárius pályákon lévő biztonságosan elhelyezhető a „temetőpályákon”, amelyeken sosem találkoznak más űrtárgyakkal. Ugyanakkor a MEO közép magas Föld-pályákon ($2000 \text{ km} < h < 35000 \text{ km}$) keringő űrszemét hosszabb időtartamok esetén már veszélyes lehet a Hold és a Nap gravitációs zavarása okozta pályaelhagyás miatt [14].

2. A nagyobb űrszemétdarabokat űrvitorlával lehetne ellátni, miáltal erősebben lassulnának, süllyednének és égnének el a légkörben, mint vitorla nélkül [15].

3. Egy űrszemétdarabkára a Földről nagyenergiájú lézernyaláb fókuszálható, aminek következtében párologni kezd, lelassul, belép a légkörbe és elég [16].

4. Az első RemoveDEBRIS nevű aktív űrszeméltávolító technológiát a Surrey Space Center próbálta ki 2018. szeptember 16-án (<https://www.sstl.co.uk/>

[media-hub/latest-news/2018/removedebris-space-junk-net-capture-success](https://www.sstl.co.uk/media-hub/latest-news/2018/removedebris-space-junk-net-capture-success)), amikor egy SpaceX Falcon-9 rakéta egy közel 100 kg tömegű műholdat vitt a Nemzetközi Űrállomásra.

5. Annak érdekében, hogy az említett Remove-DEBRIS műhold ne váljon űrszemétté, egy nagyfelületű vitorlával látnák el, amit héliummal töltött léggömb alkotna. E léggömb a műhold működésének végén nyílna ki, lelassítaná a műholdat, miáltal az egyre alacsonyabb pályára süllyedne, végül elégne a légkörben [17].

6. A műholdakat látásalapú navigációval is fel lehetne szerelni, ami képes lenne közvetlenül megfigyelni és irányítani a veszélyes űrszemétdarabokat [4].

7. A takarítóműholdak egy szigonnyal kapnak el, majd vinnék alacsonyabb pályára a megcélzott űrszemétdarabokat [18].

A fentiek szerint is az űrszemétprobléma és a Kessler-szindróma [3] egyik legnyilvánvalóbb megoldása, hogy az űrszemétet a Föld légkörébe vezetik, ahol az elég. Ezért is fontos tudni, hogy miként mozognak az űrszemétdarabok. Cikkünkben becsléseket és szemléletes képet adtunk a gömb alakú űrszemétdarabokra (vasgolyókra) jellemző mozgáspályákra, becsapódási időkre, sebességekre és irányokra az indítási magasság, irány, sebesség és méret függvényében.

Irodalom

- Grün E., Gustafson B., Dermott S., Fechtig H.: *Interplanetary Dust*. Springer: Berlin, Heidelberg, New York (2001).
- King-Hele D.: *Satellite Orbits in an Atmosphere: Theory and Applications*. Blackie, Glasgow, UK (1987).
- Brumberg V.: *Analytical Techniques of Celestial Mechanics*. Springer: Berlin, Heidelberg, New York (1995).
- Rossi A., Cordelli A., Pardini C., Anselmo L., Parinella P.: Modeling of the space debris evolution: two new computer models. *Advances in the Astronautical Sciences* 15 (1995) 1217–1231.
- Montenbruck O., Gill E.: *Satellite Orbits – Models, Methods, and Applications*. Springer: Berlin, Heidelberg, New York (2000)
- Fehlberg E.: Classical fifth-, sixth-, seventh-, and eighth-order Runge–Kutta formulas with stepsize control. *NASA Technical Report* (1968) R-287.
- ESA: *Space debris by the numbers*. European Space Agency, 5 March 2019. (https://www.esa.int/Our_Activities/Operations/Space_Safety_Security/Space_Debris/Space_debris_by_the_numbers)
- Monogarov K. A., Pivkina A. N., Grishin L. I., Frolov Yu. V., Dilhan D.: Uncontrolled re-entry of satellite parts after finishing their mission in LEO: Titanium alloy degradation by thermite reaction energy. *Acta Astronautica* 135 (2017) 69–75.
- Witze A.: The quest to conquer the space junk problem. *Nature* 561 (5 September 2018) 24–26.
- Stohlman O. R., Lappas V.: Deorbisail: a deployable sail for de-orbiting. AIAA 2013-1807, Session: Solar Sails and Drag De-Orbiters. 54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 8–11 April 2013, Boston, Massachusetts, USA.
- Esmiller B., Jacqueland C., Eckel H. A., Wnuk E.: Space debris removal by ground based laser: main conclusions of the European project CLEANSPACE. *Applied Optics* 53 (2014) 145–154.
- Forshaw J. L., Aglietti G. S., Navarathinam N., Kadhem H., Salmon T., Pisseloup A., Joffre E., Chabot T., Retat I., Axthelm R., Barraclough S., Ratcliffe A., Bernal C., Chaumette F., Pollini A., Steyn W. H.: RemoveDEBRIS: An in-orbit active debris removal demonstration mission. *Acta Astronautica* 127 (2016) 448–463.
- Klinkrad H.: Space debris. In Richard B., Shyy W. (eds.): *Encyclopedia of Aerospace Engineering. Environmental Impact, Manufacturing and Operations*. Chichester, UK (2010).

HOGYAN TANÍTSUK A KOVALENS KÖTÉST?

Schrödinger tigrise: a mozdulatlan mozgás

Geszi Tamás, Jávor Márta
ELTE Komplex Rendszerek Fizikája Tanszék

A kémia számtalan helyen találkozik a fizikával, és ez állandóan visszatérő problémát jelent az oktatásban: akár két tantárgyról van szó, akár – amint az már többször felmerült – valamilyen egységes természettudományi oktatásról, mindannyian érezzük, hogy kár lenne két környezetben kétféle ismeretet tanítani ugyanarról a jelenségköréről.

Ennek különösen éles példáját jelenti a kémiai kötés tanítása. Az 1900 előtti és utáni évtizedek váratlanul mély betekintést engedtek a kémia mögötti atomi-molekuláris világba, és e betekintés csúcsa volt a kémiai kötés természetének feltárása a megszülető kvantummechanika felhasználásával.

A történet kezdete egyszerűnek látszott, ha elfogadjuk, hogy egyes atomok szeretnek elektront leadni, mások azt lenyelni, ezzel létrejön egy pozitív és egy negatív ion, amelyeket erős Coulomb-vonzás köt össze egy molekulává. Ebben még a fizika és a kémia tanára békésen megfér egymással: a fizikatanár megtanítja, mi az, hogy Coulomb, a kémiatanár meg azt, hogy a periódusos rendszerben hol vannak az elektront leadó és hol az elektront felvevő atomok. A bonyodalmak a rejtélyes kovalens kötéssel

kezdődnek: két egyforma atom, egyik se kap töltést, akkor hát mi tartja össze őket?

A válasz a kvantummechanika egyik első látványos sikere volt. A kezdet még egyszerű: a két atom lead egy-egy elektront, hátrahagyva két egyforma pozitív iont, amelyek magukra hagyva taszítják egymást. Ami a folytatást illeti, egy évszázad távlatából nézve eléggé világos, hogy a kötés magyarázata a mozgás hullámtermészetének felismerésén alapul: amire egy pontszerű részecske aligha lenne képes, mindkét elektron kiterjedt hullámként rátelepülhet két ionra, egyszerre érezheti vonzásukat, miközben negatív töltésükkel leárnyékolják az ionok közötti taszítóerőt. Ezáltal a két elektron a két iont egymáshoz tudja kötni, velük stabil, semleges molekulát alkotva [1]. Hozzátehetjük még, hogy a Pauli-elv szerint egy ilyen hullámalakzaton (elkerült neve: *molekulapálya*) tényleg egyszerre éppen két, ellentétes spinű elektron fér el; ezzel tulajdonképpen megkapunk mindent, ami a kovalens kötés elemi kémiájához kell.

Ha ennél tovább szeretnénk lépni a kovalens kötés természetének feltárásában, kezdjük ott, hogy az eddigiek szerint a kötés a Coulomb-erőkből eredő *negatív* helyzeti energia formájában van jelen. Igen, negatív, mert ha szét akarjuk választani a molekulává kötődött két atomot, ennyi pozitív energiát kell befektetni, hogy felhozzuk őket a nulla energia szintjére, ahonnan már külön-külön szabadon mozoghatnak akármerre; az ehhez szükséges energiamennyiséget hívjuk kötési energiának. A kötéshez szükséges negatív helyzeti energiát az elektron-ion vonzás biztosítja. Ott van azonban az ion-ion és elektron-elektron taszítás is, ezekhez pozitív helyzeti energia tartozik, ami a kötést gyengíti. Kettejük közül az első a markánsabb: túl rövid kötésnél, ahol már a két ion közé nem férnek be az elektronok, a két ion szemtől szemben látja egymást; erős taszításuk helyzeti energiája a mérleget a kötő negatívból pozitívba fordíthatja, ami szétszakítaná a molekulát. Hogy ez ne történjen meg, a kötésnek elég hosszúnak kell maradnia.

A kvantummechanika nem elégszik meg az eddigiekkel: ha közelebről is ránézünk a hullámszerű mozgásra, rákényszerülünk, hogy az energia mérlegébe a mozgási energiát is belevegyük. A mozgás azért jön a történetbe, mert a vonzás minél jobb kiaknázásához az elektronhullámnak minél közelebb kell kerülnie az összekötni kívánt atommagokhoz. Ehhez

A szerzők köszönetet mondanak Szabados Ágnesnek, aki a kvantumkémia aktív kutatójaként számos megbeszélésen fáradhatatlanul finomította a cikkben kifejtett nézeteinket.



Geszi Tamás fizikus, az ELTE emeritus professzora. Nyugdíjasként az utóbbi húsz évben „a kvantummechanika alapjai” néven ismert területen végez kutatómunkát.



Jávor Márta az ELTE matematika-fizika tanári és ezzel párhuzamosan meteorológia szakán végzett 1980-ban, később kémiatanári oklevelet is szerzett. Az oktatás minden szintjén (általános és középiskola, főiskola, egyetem) tanított. Jelenleg az ELTE Fizikai Doktori Iskola Fizika Tanítása programjának doktorandusza.

viszont mindenképpen rövid hullámhossz kell, mert egy félhullámhossznál rövidebb hullám már nem hullám. És itt jön a képbe a kvantummechanika: m tömegű, v sebességű részecske (hullámjellegű mozgásban: „hullámcsomag”) λ átlagos hullámhosszához *de Broglie* alapvető összefüggése szerint

$$p = m v = \frac{h}{\lambda} \quad (1)$$

impulzus tartozik, ahol h a Planck-állandó. Az ennek megfelelő kinetikus energia

$$E_{kin} = \frac{m v^2}{2} = \frac{p^2}{2 m} = \frac{h^2 / 2 m}{\lambda^2}, \quad (2)$$

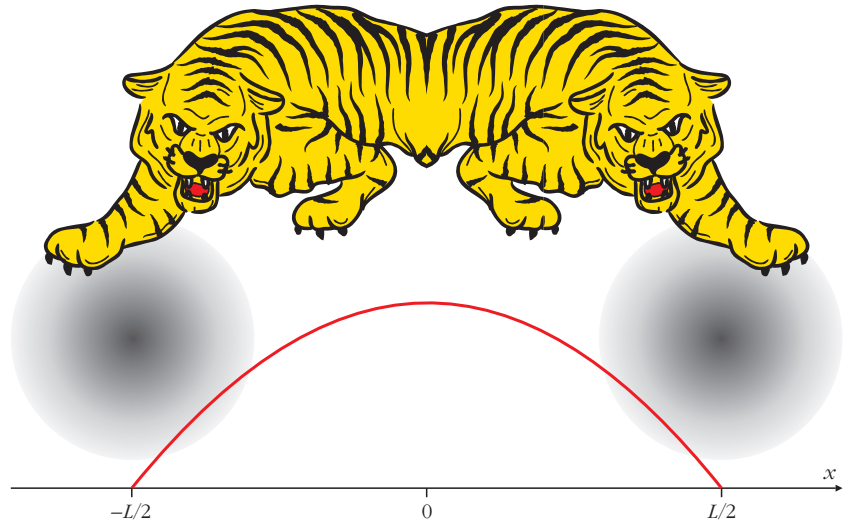
ami mindig pozitív, tehát ellene hat a lokalizációval nyerhető negatív potenciális energiának, ezzel gyengíti a kötést, annál inkább, minél kisebb λ méretre próbálja az elektronhullám belegyömöszölni magát az atommag vonzó potenciálgödrébe.¹

A teljes energia a potenciális és a kinetikus energia összege; a kémia azt az optimális nyereséget keresi, ami egy megfelelően mértékletes lokalizációval mérhető. Végző soron az így megtalált optimum definiálja a kémiai kötés energiáját.

A képet bonyolítja, hogy egy kötésben több elektron vesz részt, amelyek negatív töltésükkel egymást is taszítják. Ezt számításba venni igencsak igénybe veszi a kvantumelmélet és a hozzá kapcsolódó számítástechnika lehetőségeit; a bonyodalmak kezelésére egy önálló tudományág jött létre: a kvantumkémia, amely mára része lett életünknek [2]. Az alapvető fizikai képen azonban ezek a bonyodalmak nem változtatnak: a kötő elektronok megkeresik maguknak azt a hullámalkazatot, amely a lehető legnegatívabbá teszi a potenciális és kinetikus energia összegét, ezzel létrehozva a tőlük telhető legerősebb kötést.

Most értünk el ahhoz a ponthoz, amire a címben jelzett kérdés utalt: ha a kémiai kötésben az elektron álló hullámként van jelen, hogy beszélhetünk a *mozgási* energiájáról? Aki egyetemi szinten tanulta a kvantummechanikát, abban fel se merül a kérdés, mert megszokta, hogy állandó szorzóktól eltekintve, a kinetikus energia a hullámfüggvény hely szerinti második deriváltja, több dimenzióban Laplace-operátorral leolvasott hajladozása. Egy középiskolásnak ez a szöveg nyilván semmitmondó; marad a kérdés: hogy jön ide a mozgási energia?

¹Azt, hogy a kötés lényegében a Coulomb-vonzásból ered, a mozgási energia ezt csak gyengíti, látványosan igazolja a *virialtétel*, lásd például [3]. A hullám két atomra való szétterjedése ugyan csökkenti a kinetikus energiát, de ennél nagyobb mértékben növeli az, hogy közben a kötőpálya befűződik, így ez nem segíti a kötést.



1. ábra. Két atom között létrejött kovalens kötés: Schrödinger tigrise, amely egyszerre ugrik jobbra és balra, ezért helyben marad és erősen fogja a két atomot. Lent: ennek leg-egyszerűbb matematikai modellje, lásd a (3) egyenlet körüli diskussziót.

A válasz, amit ajánlunk, ez: mindenki hallott Schrödinger macskájáról, aki él is, hal is egyszerre, vagyis kétféle hullámállapot szuperpozíciójában létezik. Itt valami hasonlóról van szó, csak nem életről és halálról: az álló hullámot tekinthetjük úgy, mint egy jobbra és egy balra mozgó hullám szuperpozícióját. Nevezzük hát így: Schrödinger tigrise, aki egyszerre ugrik jobbra is, balra is, telve mozgási energiával a (2) egyenletnek megfelelően, miközben végül is helyben marad.

Hogy tényleg helyben marad, az egyszerű középiskolás matematikával belátható! Vegyünk egy jobbra és egy balra haladó hullámot, adjuk őket össze, és használjunk némi elemi trigonometriát:

$$\begin{aligned} \sin 2\pi \left(\nu t - \frac{x}{\lambda} \right) + \sin 2\pi \left(\nu t + \frac{x}{\lambda} \right) &= \\ = 2 \sin(2\pi \nu t) \cdot \cos \left(2\pi \frac{x}{\lambda} \right). \end{aligned} \quad (3)$$

Az eredmény láthatóan egyhelyben maradván oszcillál: a tigris helyben marad.

Ha már egyszer számolni kezdtünk, akkor még nincs a vége. Az x változótól koszinusz alakjában függő hullámamplitúdó mindkét irányban korlátlanul oszcillálna, miközben a kémiai kötés L hossza véges. Ennek reprodukálásához mindenekelőtt tegyük az $x = 0$ origót a kötés közepére; akkor a (3) egyenlet jobb oldalát a λ hullámhossz megválasztásával úgy tudjuk beállítani, hogy az $x = \pm L/2$ helyen néhány hullámzás után 0-ra csökkenjen. Mivel ezt a lehető legkisebb kinetikus energiával, vagyis a lehető legnagyobb hullámhosszal akarjuk elérni, úgy járunk a legjobban, ha az egész L hosszúságot egyetlen félhullámmal töltjük ki. Ekkor $\lambda = 2L$.²

²Az ennek megfelelő kinetikus energia a (2) egyenlet szerint $h^2/(8mL^2)$, de ahogy már az előző lábjegyzetben utaltunk rá, ez nem a teljes kinetikus energia; pontos számolásnál a kötés vonalára merőleges irányokat is számításba kell vennünk.

Az egyszerű matematikai modellünk úgy lesz teljes, ha az $x = \pm L/2$ határon túl a hullámot állandó 0-ra vágjuk, ez fejezi ki a kötés véges hosszát. A levágás matematikája mögött az a fizika működik, hogy az ionok vonzása a kötésen belül szabad mozgást enged az elektronhullámnak, de – amint el akarna távolodni – visszahúzza az elektront. Ez a vonzóerő készteti arra a tigris, hogy lábaival megragadja a két atomot (1. ábra).

Ami még változhat, az a kötés L hossza; ettől egyaránt függ a potenciális és a kinetikus energia. A kettő összege, a teljes energia valamilyen L_0 hosszúságnál lesz a legkisebb, ez határozza meg a kötés hosszúságát, amit például röntgendiffrakciós kísérletekben lehet megmérni. A megvalósuló energiaminimum mélysége – ahogy már mondtuk – a kötési energia, amelynek a fenti játékos modellnél pontosabb kiszámítása a kvantumkémia egész apparátusát igénybe veszi; az eredményt ellenőrizni termodinamikai vagy spektroszkópiai mérésekkel tudjuk.

Végül egy kitekintés a „kvantumrejtélyek” népszerű témája felé: az elterjedt mese szerint Schrödinger macskája, ahogy rápillantunk, beugrik vagy az élő,

vagy a halott állapotba, és a továbbiakban már ott marad. A kémiai kötés életerős tigrisével ilyen nem történik; egy rápillantástól nem ugrik be egyik vagy másik atom vonzó gödrébe, ilyen csak akkor tesz, ha befektetjük a kötési energiát. Schrödinger élő-halott macskája a maga összes vélt vagy valós rejtélyeivel a klasszikus-kvantum határ magas hegyein lakik; a stabil molekulák kémiájának lakhelye a biztonságos kvantumvölgy. „Hullám is, részecske is” – ilyen csak oda-fönt létezik. Idelent csak hullám van, különben nem lennének a molekulák, amelyekből felépülünk.

Irodalom

1. Számos cikk foglalkozik a témával az *American Journal of Physics* folyóiratban, lásd például R. Piela és E. Huggins, 43 (1975) 482; V. F. Weisskopf, 53 (1985) 399; R. D. Harcourt, 56 (1988) 660; lásd még: J.-P. Grivet, *Journal of Chemical Education* 79 (2002) 127; népszerű magyar feldolgozása Marx György: *Életerelő atomok*. Akadémiai Kiadó, Budapest (1978).
2. Peter W. Atkins, Ronald S. Friedman: *Molecular Quantum Mechanics*. 5. kiadás, Oxford University Press (2010); régebbi kiadásai internetről szabadon letölthetők.
3. Geszti Tamás: *Kvantummechanika*. 3. kiadás, Typotex, Budapest (2014) 15.6 pont.

A DIÁKOK MINT KIS TUDÓSOK

A hőtán témakör kutatásalapú feldolgozása az általános iskolában

Radnóti Katalin – ELTE TTK Fizikai Intézet, MTA–SZTE Természettudomány Tanítása Kutatócsoport
Hasznosi Tamásné – Sashalmi Tanoda, MTA–SZTE Természettudomány Tanítása Kutatócsoport

Munkánkat az MTA Szakmódszertani Pályázatának a Szegedi Tudományegyetemen belül létrejött Természettudomány Tanítása Kutatócsoport¹ keretein belül végeztük. A Kutatócsoport vállalt feladata „oktatási segédanyagok kidolgozása a közoktatás és a tanárképzés számára”, amely program elsősorban az általános és középiskolában járó tanulók *természettudományos gondolkodásának fejlesztését célozza meg a természettudományos tantárgyak kötelező tananyaga-*

gába ágyazott feladatokon, tevékenységeken keresztül. A Kutatócsoportban hat munkacsoport dolgozik különböző témákon, mint:

- a természettudományos gondolkodás vizsgálata;
- természettudomány gyerekeknek;
- biológia, fizika, kémia;
- interdiszciplináris kapcsolatok, komplex témák.

Jelen írás szerzői a fizika munkacsoport tagjai. Kutató- és fejlesztő munkánk fő célkitűzései a tanulók gondolkodásának fejlesztése, a természettudományos szemlélet [1] érvényesítése és az ismeretszerzés menetének támogatása voltak az általunk kidolgozott módszerrel. Jelen írásban a hőtán témakör úgynevezett kutatási szemléletű feldolgozási lehetőségét mutatjuk be.

A 2019. évi Fizikus Vándorgyűlésen elhangzott előadás írott, szerkesztett változata.

A kutatás a Magyar Tudományos Akadémia Szakmódszertani Pályázata támogatásával készült.

¹A csoport munkájáról a <http://edu.u-szeged.hu/ttkcs/kutatasi-program> webhelyen található részletes információ.



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 természettudományos tanításának módszertana.



Hasznosi Tamásné a Budapest XVI. kerület Sashalmi Tanoda Általános Iskola matematika–fizika szakos tanára, 2013 óta a kerület matematika–fizika tantárgygondozója. Fizika szakos kollégáival életre keltette a Sas Elemér Kerületi Fizika Csapatversenyt, amelyet 2013 óta minden tanévben megrendeznek. Feladatot vállal az ELTE fizika tanárszakos hallgatóinak gyakorlati képzésében. 2017-ben elnyerte a XVI. kerületi Önkormányzat és az Észak-Pesti Tankerületi Központ által alapított „Az Év Pedagógusa” díjat.

A kutatásalapú tanulás/tanítás alapvetései

A természettudományos nevelésben több országban elterjedt gyakorlat, napjaink szakmódszertani fejlesztéseinek egyik meghatározó eleme a kutatásalapú természettudomány-tanítás koncepciója. Több nemzetközi projekt is feladatául tűzte ki e tanítástípus gyakorlati elterjesztését, ezért fejlesztőmunkánk során mi is ehhez nyúltunk [2]. A módszer lényege, hogy a diákok valamilyen kutatási tevékenysége képezi a természettudományos nevelés alapját, irányítja a tanulói munka szervezését. A *kutatásalapú tanulás* (Inquiry-Based Learning, IBL) olyan módszer, amely biztosítja, hogy a tanulók ténylegesen átéljék a tudásalkotás folyamatait, minél jobban lássák az ismeretszerzés teljes menetét, annak aktív részesei legyenek.

A kutatásalapú tanulás esetében a tananyag feldolgozásának menete [3–6]:

- problémák keresése,
- kutatásra érdemes kérdések megfogalmazása,
- hipotézisek megfogalmazása,
- különböző alternatív magyarázatok megalkotása és elemzése,
- kutatások tervezése, vezetése,
- megfelelő eszközök és technikák használata az adatok gyűjtéséhez,
- az adatok elemzése,
- a következtetések levonása,
- a természettudományos érvek/indokok közlése.

A fent felsorolt *kutatási készségek* fejlesztése a fizika tantárgy tanulása – amely elsősorban az empirikus vizsgálatokhoz, a kísérletezéshez köthető, bár a számítástechnikai feladatokban is megjelenhet – során is fontos feladat. Az empirikus tapasztalatszerzés nem csupán a kísérletek előre megfogalmazott recept alapján való elvégzését jelenti, hanem azt, hogy a tanuló részt vesz, átéli a teljes megismerési folyamatot. Ez nem csak azon diákok számára fontos, akik majd a természettudomány területén fognak továbbtanulni, hanem mindenkinek. A tanulók egyrészt fegyverkezett gondolkodásmódot, megismerési algoritmust tanulnak, másrészt – reményeink szerint – e gondolkodásmóddal felvértezve képesek lesznek eligazodni napjaink sokféle tudományos és áltudományos híre között is. Meg tudják majd ítélni egy hír/információ igazságtartalmát, képesek lesznek róla lényegi kérdéseket feltenni, és a különböző áltudományos babonák nem tudják rabul ejteni őket.

Kiemelten fontosnak tartjuk *az általános iskolai oktatásra való odafigyelést, mert az alapozza meg a tanulók későbbi érdeklődését, sikerességét, illetve a szakkörökbe, tehetség gondozó foglalkozásokba való későbbi bekapcsolódását.*

Az oktatási kísérlet előkészítése

Írásunk további részében a 7. évfolyamon feldolgozásra kerülő hőtán témakörre kidolgozott fejlesztő programunkat mutatjuk be, továbbá beszámolunk annak iskolai kipróbálásáról.

Kutatási kérdéseink

1. Javul-e a diákok fogalmi megértése, tantárgyi tudása, ha a kötelező tananyag kísérletes részeit a kutatásalapú tanulás módszerével dolgozzák fel? Tapasztalunk-e kimutatható különbséget a hagyományosnak mondható tanítással összehasonlítva?

2. Miként értékelik maguk a diákok a fenti módszerrel való tanulási folyamatot?

Elképzelésünk szerint a kutatásalapú szemlélet bevihető a normál tanítási folyamatba, erre a feltevésre alapozva szerveztük meg oktatási kísérletünket. Jelen írásban bemutatjuk, hogy ez a fajta tanulás nem igényel extra eszközöket, csak amelyek egy normál iskolai szertárban is megtalálhatók, vagy házilag előállíthatók. Továbbá a módszer bármilyen tanterv, tankönyv használata esetében alkalmazható.

Hipotézisünk szerint a tanulók szívesebben dolgoznak az általunk készített kutatási szemléletű feladatlapokkal, és a tanulási folyamat is eredményesebb lesz.

A témakör kiválasztása

A kutatás első lépéseként az általános iskolában kötelezően feldolgozandó fizikai témaköröket elemeztük, amelyek közül a kutatásalapú kísérleti tanítás megvalósításához a hőtán választottuk ki. A tanulóknak e témakörrel kapcsolatban sok előzetes ismerete van a mindennapi életből, illetve a természetismeret tantárgy tanulása kapcsán, ezért azt feltételeztük, hogy ezekre építve képesek lesznek hipotéziseket megfogalmazni, kísérleteket tervezni. A témakört előzetesen tanulmányozva a kísérletes részekhez olyan feladatlapokat fejlesztettünk ki, amelyekben érvényesítettük a kutatásalapú tanulás alapvetéseit. Vagyis nem találtunk ki új kísérleteket, hanem a diákok számára a régieket – amelyek a legtöbb tankönyvben szerepeltek – kutatási szemléletűen átalakítottuk, átfogalmaztuk.

A kutatás előkészítése

A hőtán témakör iskolai feldolgozása átlagosan 12 tanórát vesz igénybe, amelyek közül a diákok 6 alkalommal az általunk készített feladatlapokkal dolgoztak. Ezek kifejezetten az egyes kötelező kísérletes tanítási tartalmak feldolgozásához készültek. A többi órán az elméleti anyag feldolgozása és gyakorlása történt meg.

A feladatlapokat először 2016-ban egy budapesti általános iskola két 7-es osztályában, összesen 52 tanuló részvételével próbáltunk ki. Ez egy pilot típusú vizsgálat volt, amelynek tapasztalatai alapján, nagyobb mintán, kísérleti és kontrollcsoportos vizsgálatot terveztünk. A tanórákról videofelvételek készültek, amelyek alapján részletesen leírtuk az órai történéseket. Ezeket a nagyobb mintán történő kipróbálásban résztvevő tanárok felkészítéséhez használtuk 2017-ben.

A kísérleti és kontrollcsoportos, elő- és utómérés típusú oktatási kísérletünk 2018 őszén indult a 7. évfolyamon, 129 fős kísérleti és 160 fős kontrollcsoporttal. A kísérleti oktatásban 3 iskola 3 tanára vett

részt.² A kontrollosztályokban nem ők tanítottak. Elő- és utómérésben vizsgáltuk a tanulók fizikatudását, a természetismeret, illetve a fizika tanulásának motivációit is. Az előzetes kísérleti oktatás és a tényleges nagymintás kísérlet során is tanórai megfigyeléseket végeztünk, rendszeresen látogatva a kipróbálásban résztvevő tanárokat és diákjaikat. A tanórák megfigyelési szempontjai a következők voltak: a diákok hipotézisalkotása, kísérlet tervezése, a kísérleti eszközök használata, a tapasztalatok rögzítése, jegyzőkönyv készítése, következtetés levonása, a diákok csoporton belüli kommunikációja, az idővel való gazdálkodás.

A hőtan kutatási szemléletű feldolgozásának megvalósulása

A feldolgozás során alapvetően az anyag részecskeképeként, mint *modellnek* felhasználására építettünk, amely egyik fontos elem a természet megismerésében, és hazánkban a 7. évfolyamon mind a fizika, mind pedig a kémia tantárgy tananyagában is szerepel. A diákoknak ezt a modellt kellett alkalmazniuk mind hipotéziseik megfogalmazásához, mind pedig az empirikus vizsgálatok eredményeinek értelmezéséhez, a következtetések levonásához. A hőtan témakörét kifejezetten alkalmasnak találtuk erre. Továbbá a témakör a fizikai tanulmányok elején került feldolgozásra, így a tanulók viszonylag korán megismerkedhetnek a fizika tudományában alkalmazott megismerési módszerrel, amely reményeink szerint felkelti több diák érdeklődését is a tantárgy tanulása iránt. Esetünkben ez volt az első fizikai témakör, amely feldolgozásra került. A mechanikai jellegű témakörök ez után következtek. A feldolgozás során a következő gondolkodási műveletek fejlesztése valósult meg, mint összehasonlítás, arányossági gondolkodás, kísérlettervezés, kísérlet kivitelezése és oksági magyarázatok adása.

A kísérletes feladatok megfogalmazásakor arra törekedtünk, hogy a tanulókat minél inkább bevonjuk a teljes megismerési folyamatba. Ez a következőket jelentette: nem kész recepteket adtunk a diákok kezébe, sőt, magát a vizsgálandó kérdés megfogalmazását is a tanulóktól vártuk el. A diákok, mint megoldandó problémákat kapták meg a kísérletes feladatokat. Fontos gondolkodásfejlesztő elem volt a *hipotézisalkotás*, majd annak alapján a vizsgálat tényleges megtervezése, elvégzése, végül a következtetések megfogalmazása.

Különösen a hipotézisalkotás fontosságát emelnénk ki. Ne gondoljuk azt, hogy ezek a diákok még túl fiatalok ahhoz, hogy előrejelzéseket tudjanak megfogalmazni. Több diák kifejezetten élvezte, tetszett nekik, hogy elmondhatják elképzeléseiket.

A diákok a következő kísérletes feladatokat oldották meg:

- a hőtágulás jelenségének vizsgálata a különböző halmazállapotok esetében,
- az energiaterjedés módjainak vizsgálata,

- a termikus kölcsönhatás vizsgálata,
- az olvadás vizsgálata,
- a forrás vizsgálata,
- a párolgási sebesség különböző tényezőktől való függésének vizsgálata.

A feladatlapok egy része egyszerű *jelenségek vizsgálatát* tűzte ki célul, amelyekhez megadtuk a szükséges eszközöket, de a kísérleti összeállítást már a diákok maguk alkották meg.

A feladatlapok másik része *mérés elvégzését* kérte a tanulóktól. Ebben az esetben nem kapták meg tálcán az előre összekészített eszközöket, hiszen a mérési folyamat megtervezését is tőlük vártuk. A gondolkodás fejlesztése szempontjából fontos, hogy a diákok nem kapják meg előre a mérés leírását. Ez akkor is igaz, ha a tanár és a tanulók közösen, a mérés előtt akár pontról pontra, kérdés-felelet formájában megbeszéljük, hogy mi lesz a teendő. Ebben az esetben is jelentős gondolkodási folyamaton mennek keresztül a diákok. Fontos, hogy átgondolják, mit szeretnének vizsgálni. *Milyen lesz a mérési elrendezés? Milyen eszközökre lesz szükségük? Ebhez milyen mennyiségeket kell mérni? Meddig fognak mérni? Az adatokat hogyan fogják lejegyezni? Mindegy, hogy a táblázat vízszintes vagy függőleges. Hány oszlop (sor) legyen? A mérési adatokat miként jelenítik meg? Mi lesz a függőleges és mi a vízszintes tengelyen? Hogy veszik fel az egységeket? Hány grafikont készítenek? Az(ok) várhatóan hogyan fog(nak) kinézni? Az ábrázoláshoz négyzetrácsos papírt kaptak segítségül a diákok.*

A mérési adatok ábrázolása nem minden esetben volt problémamentes, mivel ez – attól függetlenül, hogy matematikából már tanultak derékszögű koordináta-rendszerben pontokat ábrázolni – új elem volt a diákoknak. Hiszen az adott esetben egy adott pont egy konkrét, a diákok által leolvasott mérési eredményt jelentett, például adott időponthoz tartozó hőmérsékletet. Az ábrázolt pontok pedig jellegzetes rendszerben helyezkedtek el, amely alapján következtetést kellett levonni az adott fizikai folyamatról. Ez a meglévő matematikai ismeretek alkalmazását jelentette, de újszerű környezetben. Bár sok esetben látszott, hogy ez nem egyszerű számukra, de amint megértették, érdekessé vált.

A *jegyzőkönyvek* szerkezetét is önállóan alkották meg a tanulók.

Természetesen az első feladatlapos kísérletek/mérések esetében több *tanári segítségre*, elsősorban segítő kérdésekre volt szükség. Tehát szó sincs arról, hogy a diákok magukra lettek hagyva! De a tanár nem mondta el a „megoldást”, hiszen az volt a célkitűzés, hogy a tanulók minél önállóbbá váljanak.

A tanár részéről – különösen az első időkben – *türelemre, empátiára* van szükség az általunk javasolt feldolgozásmód követéséhez. A tananyag ilyen feldolgozásának lényeges pontja, hogy ne mondjunk el mindent a diákoknak, hanem – a problémamegoldás lényeges elemeként – hagyjuk őket a saját ütemükben gondolkodni, tevékenykedni, még abban az esetben is, ha néha tévútra kerülnek. Nem szabad ezek miatt le-

²Hasznosi Tamásné, Kemény Gabriella, Sági Gabriella.

korholni a diákokat, hiszen, ha mindent tudnának, akkor iskolába sem kellene járniuk! A tanítás szempontjából a diákok előzetes tudása fontos információ, amely így felszínre kerül nem csupán a tanár számára, hanem a diákok előtt is. A tanulók saját maguk is világosan láthatják, hogy miként gondolkodtak korábban és onnan hová jutottak. Ezek is fontos tapasztalati alapot jelentenek a csoportos tevékenységek összegzésénél, amikor a lényeges, már ténylegesen megtanulni való ismereteket rögzítik a táblán, illetve a füzetben.

Szinte minden esetben érzékeljük, hogy a gyerekek először nem tudtak mit kezdeni a kapott feladatokkal. Ekkor a tanár néhány segítő kérdést tett fel, ismételt elmondta a feladatot. Ezt a pár percet *érdemes volt kívánni!* Ezután a gyerekek fantáziája minden esetben megindult, elkezdtek „ötletelni”, és végül egészen jó elképzelések születtek. Ez az a folyamat, ami végül maradandóvá teszi a megszerzett ismeretet. Tehát maga a *problémamegoldás folyamata* is fontos, nem csak a végeredmény!

Ugyanakkor meg kell jegyezni, hogy ez a fajta tanulási módszer nem minden diáknak ment egyformán jól, és voltak, akiket zavart. Erre a szakirodalom is felhívja a figyelmet [7]. De ne feledjük el, 100%-osan egyik módszer sem felel meg mindenkinek! Az oktatás során ezért is kell sokféle módszert alkalmazni.

Az empirikus vizsgálatokat követően – nem egy esetben a következő órán – a tanár a diákokkal közösen és mindig részletesen rögzítették azok tanulságait, a megfelelő grafikonokat, a megtanulandó ismeretanyagot. Ezek képezték a témazáró dolgozat, vagyis az osztályzattal való értékelés alapját. A tanulási folyamat közben csak a formatív, segítő értékelésnek volt helye!

A csoportos feladatok, a megbeszélések, majd a kísérletek elvégzése és azok közös értelmezése a diákok gondolkodásán túl nagyon sokféle képességet – mint kommunikációs képességek, szociális képességek stb. – fejleszt. Az iskola vezetése, ahol az oktatási kísérlet folyt, ezt is határozottan pozitívan értékelte.

A kutatásalapú tanórák

A tanórák felépítése általában a következő volt:

- házi feladat ellenőrzése, ismétlő kérdések,
- az adott témakörrel kapcsolatos hétköznapi tapasztalatok közös összegyűjtése,
- rövid közös megbeszélés az aznapi kísérletes feladatról, majd az osztály csoportokba rendezése,
- a tanulók csoportos munkája feladatlappal, az egyes csoportok más-más részfeladaton dolgoztak ahol az volt a célszerű,

Feladatlapp

Termikus kölcsönhatás

Miként lehet a forró vízből langyosat készíteni?

Hogy lehet a forró kávéból langyos tejeskávét készíteni?

Írd le, hogy szerinted miként lehet az anyagokat lehűteni, illetve felmelegíteni?

.....
Mit gondolsz, ha összeöntünk 1 dl 20 °C-os és 1 dl 60 °C-os vizet, mekkora lesz a közös hőmérséklet?

.....
Miként lehet a hideg, illetve a melegebb test hőmérsékletének **változását nyomon követni?**

.....
Milyen mennyiségeket kell mérni? Milyen eszközökre lesz szükség a méréshez?

.....
Alkosd meg a *mérési elrendezést!* Rajzold vagy fényképezd le!

.....
Alkosd meg a mérési táblázatot!

.....
Mit gondolsz, mekkora lesz az egyensúlyi hőmérséklet?

.....
Mit vársz, milyen lesz a változás jellege?

.....
Hogyan tudnád a változást szemléltetni?

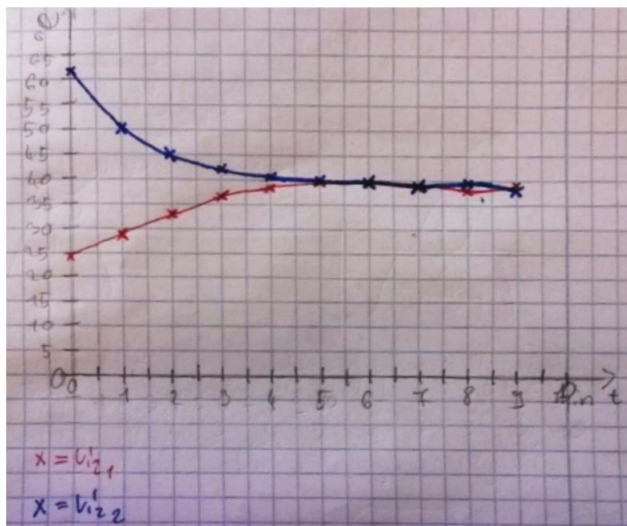
– végül az egyes csoportok tapasztalatainak összefoglalása és közös értelmezése, a következtetések megfogalmazása, táblán, illetve füzetben történő rögzítése. Ez a rész néhány esetben a következő órára csúszott át.

A következőkben néhány érdekes és tanulságos részletet mutatunk be a tanórákról: miként valósultak meg a fentebb leírtak a tanítási gyakorlatban.

Az egyik kutatásalapú tanóra témája a *termikus kölcsönhatás* vizsgálata volt. A vizsgálandó probléma az volt, hogy miként is tudnánk nyomon követni a *hőmérséklet-változás folyamatát* (lásd a keretezett feladatlappot fenn).

A hangsúly a folyamaton volt, nem egyszerűen a végeredményen, vagyis a közös hőmérséklet kialakulásán. De előbb a végeredményről is kellett beszélgetni, feltárni a diákok előzetes elképzeléseit. Az óra eleji megbeszélés során ugyanis több esetben előkeült az a tipikus tévképzet, amikor a közös hőmérséklet becslésekor a gyerekek össze akarják adni a hőmérsékleteket [8].

A diákok a következő megállapításokra jutottak, néhány esetben csak több segítő kérdést követően, hogy egy hideg vizet tartalmazó pohárba célszerű egy kisebb, meleg vizet tartalmazó poharat tenni. A vízmennyiségek legyenek azonosak. A hőmérsékletet az idő függvényében célszerű mérni mindkét pohár víz esetében, és ennek megfelelően célszerű a mérési adatokat tartalmazó *táblázatot* kialakítani. A fejlécben az idő szerepeljen, míg az alatta lévő két sorban a hőmérsékletek. Vagy három függőleges oszlopban gyűjteni a mérési adato-



1. ábra. A hőmérséklet változása az idő függvényében a két egymásba helyezett pohárban.

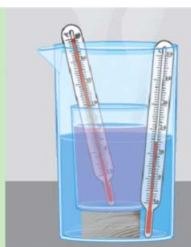
kat. Ahogy a diákoknak kényelmesebb. De fontos, hogy rendezett, áttekinthető táblázat legyen.

A diákok rájöttek, hogy a mérési adatokat lehet *grafikusan* szemléltetni, az x tengelyen az időt, míg az y tengelyen a hőmérsékletet célszerű felmérni és egy grafikonban célszerű mindkét pohár víz hőmérsékletének időbeli alakulását ábrázolni.

Ennek ellenére az egyik csoport nem helyezte egymásba a két poharat, hanem egymástól körülbelül 5 cm távolságban tartotta azokat, és úgy mérte a két pohárban lévő víz hőmérsékletének alakulását. A rajzukon is ez szerepelt. Majd később egymásba helyezték a poharakat, de csak a meleg víz hőmérsékletét kezdték el mérni.

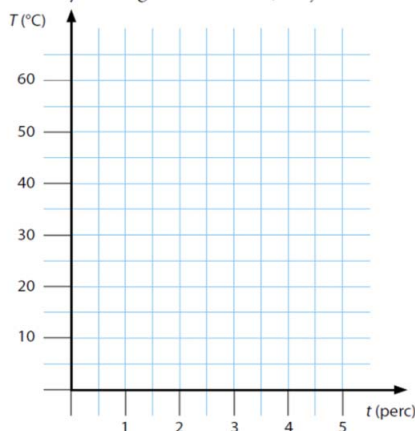
2. ábra. A tankönyvi kísérletleírás és a munkafüzeti ábra.

Tegyél egy nagyméretű főzőpohárba hideg vizet, majd állíts bele egy kisebb főzőpoharat, amelyben forró víz van! Tegyé le mind a két hőmérőt félpercenként, méréseidet rögzítsd a munkafüzetedben található táblázatba! Figyeld meg, hogyan változott a főzőpoharakban a víz hőmérséklete!
Tapasztalat: A hideg víz hőmérséklete egy ideig növekedett, a meleg víz hőmérséklete egy ideig csökkent. Egészen addig tartott a hőmérséklet-változás, ameddig azonos nem lett a hőmérséklet a két főzőpohárban.
 Ábrázold ugyanazon a grafikonon a hideg, és a meleg víz hőmérsékletének változását!



Végezd el a tankönyvben leírt első kísérletet! A mérési eredményeket foglald táblázatba, majd ábrázold a mellékelt grafikonon!

	idő (perc)								
	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
hideg víz hőmérséklete (°C)									
meleg víz hőmérséklete (°C)									



Egy másik csoport 21 °C, illetve 31 °C-nál abbahagyta a mérést.

Volt olyan csoport, aki csak az egyik pohár víz hőmérsékletét mérte, és azt is csak addig, míg a diákok által saját maguk által kialakított táblázatban volt hely a mérési adatoknak.

Ezekből a példákból talán érzékelhető, hogy miért is szükséges *óriási türelem és empátia* a tanár részéről.

A tanóra végére azért néhány csoport esetében elkészült a grafikon is (1. ábra), és azt nézegetve az egyik diák megszólalt: „Ez jól néz ki! Ez tetszik!” Éppen az ilyen diákokat „keressük”, akik élvezik az ilyen és hasonló tevékenységet, és feltehetően természettudományos-műszaki pályára fognak menni!

A *következő órán* megbeszélték az egyes csoportok hibáit, mint:

- nem tették egymásba a poharakat,
- csak az egyik pohárban lévő víz hőmérsékletét mérték.

Majd egy jó grafikon ábrája alapján megfogalmazták, hogy ténylegesen mi is történt.

Megbeszélték, hogy mi volt a hipotézis? – kiegyenlítődnek a hőmérsékletek. Akkor eddig kellett volna mérni.

Majd a diákok elkezdtek összegyűjteni és lejegyezni a termikus kölcsönhatással kapcsolatos fontos tudnivalókat a táblára, illetve a füzetbe. Ekkor szépen előkerült, hogy hiába van hőmérséklet-különbség, ha nem érintkeznek a testek, akkor nincs termikus kölcsönhatás. Tehát *a hibás mérések is fontos tapasztalati alapot szolgáltatottak!* Ezért érdemes türelmesnek lenni, nem megmondani a jó megoldást, hagyni, hogy néhány diák kicsit zsákutcába jusson, természetesen óriási empátiával kell kezelni ezeket az eseteket.

A fent leírt mérőkísérletet sok osztályban elvégzik a diákok, de általában a munkafüzetben leírt munkalap alapján [9], amelyben le van rajzolva az üres táblázat az adatoknak és a grafikon elkészítéséhez a felcímkézett tengelyek, a tankönyvben pedig megtalálható a mérési elrendezés rajza [10] (2. ábra). Vagyis teljes receptet kapnak a diákok a mérés „bamba” elvégzéséhez.

Tehát elmondható, hogy nem új kísérletet találtunk ki, ellenben a feldolgozás módja jelentősen különbözik a hagyományos, a diákok minden lépését előíró gyakorlattól. Ez kétségtelenül több időt vesz igénybe, de biztosabb és maradandóbb tudással vétezi fel a diákokat, amint arra cikünk végén rámutatunk.

Egy másik kutatásalapú tanórán az *olvadás* jelensé-

gével foglalkoztak a diákok. A probléma az *olvadás folyamatának* vizsgálata volt (lásd a keretezett feladatlapot).

A részecskekép felhasználásával megbeszélték, hogy miként is lehet mikroszkopikus szinten elképzelni a folyamatot, majd rátértek arra, hogy makroszkopikusan mit is lehetne megfigyelni, illetve mérni.

A diákok a korábbi termikus kölcsönhatás vizsgálatából sejtették, hogy itt is időt és hőmérsékletet kell majd mérni. Megbeszélték, hogy az olvadás folyamatának vizsgálatához hőmérőre, főzőpohárra és jégre lesz szükség. Az időt pedig a mobiltelefonnal mérhetik.

Továbbá a tanulóknak le kellett írni, vagy rajzolni hipotézisüket. Elég sok diák azt írta, hogy folyamatosan növekvő hőmérsékletet vár, amely ismert jellegzetes tévképzet [11]. Sőt, volt, aki ezt le is rajzolta (3. *ábra*). A diák már fel tudta használni azt az új tudását, hogy a mérési adatokat derékszögű koordináta-rendszerben lehet ábrázolni, rajza szinte matematikai módon megfogalmazott hipotézisnek is tekinthető!

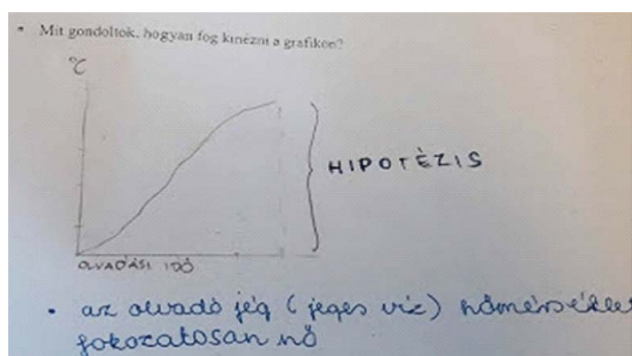
Ebben az esetben is a diákok feladata volt a mérési táblázat megtervezése. Az alábbi fontos tanári kérdések voltak iránymutatóak a diákok munkájához.

- Mi az, amit a hőmérsékleten és az időn kívül még figyelni kell? Mi az, amit a szemekkel látsz?
- Hogy vehető észre, hogy a jégkása teljesen megolvadt?
- Meddig kell mérni?
- A korábbi mérési tapasztalatokból többen mondták, hogy amíg változás van. De ez ebben az esetben mit jelent? Amíg hőmérséklet-változás van, vagy amíg halmazállapot-változás?

Ez sem volt minden csoport számára egyértelmű, mivel egyik csoport nem írt hőmérsékletadatokat az óra végéig, hiszen végig körülbelül 0 °C-ot mutatott a hőmérőjük.

A mérés során többször ki kellett venni jeget a poharából, mivel azok az óra végéig nem olvadtak volna meg, viszont így néhány esetben lehetett látni, hogy csak a teljes mennyiség megolvadása után kezdett növekedni a hőmérséklet.

3. *ábra*. Tanulói hipotézis.



Feladatlap

Olvasás

Mi történik az anyag hőmérsékletével olvadás közben? Mit gondoltok? Írjátok le!

Vizsgáljátok meg a kérdést!

A rendelkezésetekre álló eszközök és anyagok: főzőpohárban jégkása, hőmérő, stopper/mobiltelefon

- Milyen mennyiségeket fogtok mérni?
- Hogyan fogjátok az adatokat lejegyezni?
- Miként fog kinézni a mérési táblázat?
- Készítsetek grafikont a mérésről!

Milyen fizikai mennyiségek fognak szerepelni az egyes tengelyeken?

Mit gondoltok, hogyan fog kinézni a grafikon?

- Vessétek össze a tapasztalatokat az előzetes várakozásaitokkal!

Hány rész különíthető el a grafikonon?

Az egyes részek milyen jelenséghez tartoznak?

- Amikor elolvadt az összes jég, utána hogyan változott a hőmérséklete? Ez hogy látható a grafikonon?

Több csoport először szisztematikusan növekvő hőmérsékleteket írt a táblázatába, mivel azt várták. Majd egy idő után észrevették, hogy a hőmérséklet állandó.

A következő órára a diákok nagy része jól kitöltött feladatlappal érkezett. Ugyanis a diákok a két fizikaóra között is beszélgettek a mérésről, továbbá utána is néztek a jelenségnek és annak megfelelően módosították a feladatlapot. Vagyis a diákok érdeklődést mutattak a téma, a fizika és a fizika tanulása iránt! Az alkalmazott módszer tehát komoly tanulási motivációval is bír!

A kutatási szemléletű feldolgozás tapasztalatai és eredményei

Az oktatási kísérlet tapasztalatai alapján elmondhatjuk, hogy az új módszer eredményeképp jobb lett a diákok tantárgyi tudása, a fogalmi megértés szintje. Ez kimutatható már egy témakör feldolgozása során is. A kísérleti oktatásban részt vett diákok szignifikánsan jobb teljesítményt nyújtottak.

Az előméréshez a természetismeret tantárgy hőtani jellegű kérdéseit használtuk.

– A *kísérleti* csoport *előmérésben* nyújtott teljesítménye 50,7%, szórása 15,3% volt.

– A *kontrollcsoport* *előmérésben* nyújtott teljesítménye 47,5%, szórása 14,6% volt.

Az előmérés eredményei alapján elmondható, hogy nincs szignifikáns különbség a két csoport között.

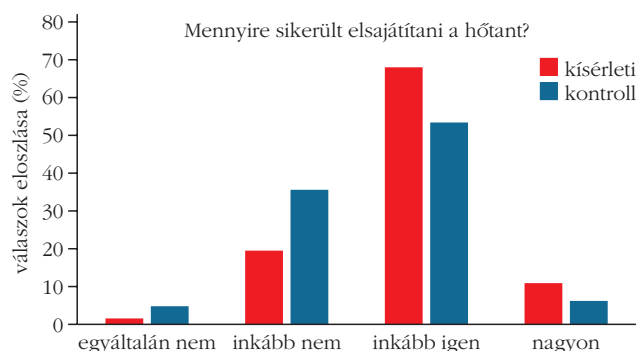
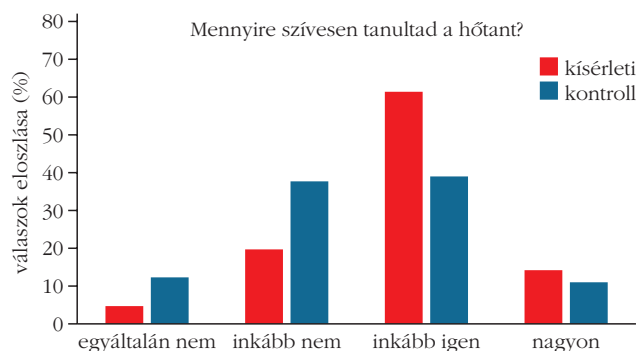
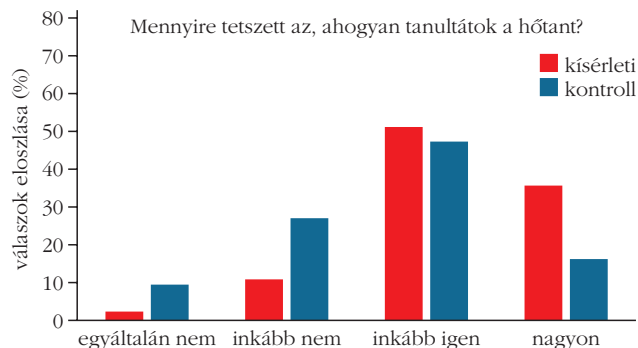
– A *kísérleti* csoport *utómérésben* nyújtott teljesítménye 61,2%, szórása 13,6% volt.

– A *kontrollcsoport* *utómérésben* nyújtott teljesítménye 49,7%, szórása 18,6% volt.

Az összehasonlíthatóság miatt az utómérés esetében több kérdés azonos volt az előméréssel.

Az adatok alapján látható, hogy az utómérésben jelentős különbség van a kísérleti csoport javára. A szórási is kisebb lett, míg a kontrollcsoport esetében nagyobb. A kontrollcsoport gyakorlatilag alig fejlődött.

Az attitűdkérdések válaszai alapján elmondható, hogy a diákok abszolút kedvezően nyilatkoztak a módszerről (4. *ábra*).



4. ábra. A diákok fizika iránti attitűdje.

A kísérleti és a kontrollcsoportokba járó diákok közel azonos családi háttérrel és előzetes tudással rendelkeztek. Tehát a jobb teljesítmény és a kedvezőbb hozzáállás egyértelműen az új módszer hatásának tekinthető, amely igazolta hipotézisünket.

Az adatokból azonban az is látható, hogy a kontrollcsoportban lévő diákok attitűdje is kedvező volt a fizika iránt. A témakör feldolgozása a tanév elején szerepelt, rögtön a méréssel kapcsolatos bevezető órák után. Tehát elmondható, hogy ekkor, a fizikatanítás kezdetén a diákok még szeretik a fizikát! Azonban ez a pozitív hozzáállás mintegy elapad a fizikatanulás időszaka alatt. Ez további kutatást igényel.

A 7. évfolyamon a fizikával párhuzamosan belépő tantárgy a kémia is, amely tanórákon szintén végez-

nek kísérleteket a diákok. A kipróbálásban résztvevő iskolák esetében a kémiaórákon nem ezt a módszert alkalmazták, hanem a diákok kész receptek alapján dolgoztak. A kipróbáló tanárok elmondták, hogy a diákok megjegyzései alapján a kutatásalapú módszer jobban tetszett nekik. És ez – nem elhanyagolható módon – visszahatott a kísérleti oktatásban résztvevő tanárookra. Őket is motiválta, lelkesítette a gyerekek fokozódó érdeklődése.

A kísérleti csoportokban tanító tanárok elmondása alapján a későbbiekben is észrevehető volt a kutatási szemléletű feldolgozás hatása. A diákok sokkal jobban emlékeztek a kísérletekre, amelyeket például a dolgozatokban le kellett írniuk. Ez valószínűleg több, a kísérleti oktatásban használt módszernek is köszönhető, mint például a diákoknak folyamatosan kommunikálniuk kellett egymással, hipotéziseket kellett megfogalmazniuk az előzetes várakozásaikról, a feladatlapon szerepeltek a kísérletet felvezető kérdések, amelyek mindegyikéhez a szaknyelvet kellett használniuk.

Az eredmények alapján javasoljuk, hogy a tanárközlégák minél több kísérletes feladatot dolgozzanak fel a diákokkal hasonló módszerrel az általános iskolában is.

Irodalom

1. Radnóti Katalin: *Óráról órára. Fizikaórák megjegyzésekkel ellátva*. Hallgatói segédlet a fizikatanítási gyakorlathoz. MTA – SZTE Természettudomány Tanítása Kutatócsoport, Szeged (2017) 160 oldal, <http://edu.u-szeged.hu/ttkcs/content/radnoti-katalin-2017-orarol-orara-fizikaorak-megjegyzesekkel-ellatva>
2. Korom Erzsébet, Csikos Csaba, Csapó Benő: A kutatásalapú tanulás megvalósításának feltételei a természettudományok tanításában. *Iskolakultúra* 26/3 (2016).
3. Makádi Mariann, Radnóti Katalin, Róka András, Viktor András: *A természetismeret tanítása és tanulása*. TÁMOP 4.1.2.B.2-13/1-2013-0007 „Országos koordinációval a pedagógusképzés megújításáért” (2015)
4. McLoughlin, E., Finlayson, O., van Kampen, P.: *Report on mapping the development of key skills and competencies onto skills developed in IBSE*. SAILS Project (2012).
5. Nagy Lászlóné: A kutatásalapú tanulás/tanítás ('inquiry-based learning/teaching', IBL) és a természettudományok tanítása. *Iskolakultúra* 20/12 (2010) 31–51.
6. Nagy Lászlóné, Korom Erzsébet, Pásztor Attila, Veres Gábor, B. Németh Mária: A természettudományos gondolkodás online diagnosztikus értékelése. In: Csapó Benő, Korom Erzsébet, Molnár Gyöngyvér (szerk.): *A természettudományos tudás online diagnosztikus értékelésének tartalmi keretei*. Oktatókutatás és Fejlesztő Intézet, Budapest (2015) 35–116.
7. Cheung, D.: Teacher beliefs about implementing guided-inquiry laboratory experiments school chemistry. *Journal of Chemical Education* 88 (2011) 1462–1468.
8. Carlton, K.: Teaching about heat and temperature. *Physics Education* 2 (2000) 101–105.
9. Dégen Csaba, Kartaly István, Sztanó Péterné, Urbán János: *Fizika 7. Munkafüzet*. Oktatókutatás és Fejlesztő Intézet, Eger, 2015.
10. Dégen Csaba, Kartaly István, Sztanó Péterné, Urbán János: *Fizika 7. Tankönyv*. Eszterházy Károly Egyetem, Eger, 2017.
11. Thomaz, M. F., Malaquis, I. M., Valente M. C., Antunes M. J.: An attempt to overcome alternative conceptions related to heat and temperature. *Physics Education* 1995/1 19–26.

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 főtájtár, 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 egyzámlán.

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

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



IN MEMORIAM FARKAS GYŐZŐ

Farkas Győző fizikus, a fizikai tudományok doktora, a Wigner Fizikai Kutatóközpont Szilárdtestfizikai és Optikai Intézetének kutató professor emeritusa, 1933. november 25-én született Kisnémediben. A Váci Piarista Gimnázium után, amit kiváló eredménnyel végzett, került az Eötvös Loránd Tudományegyetemre, ahol szintén kitűnő volt. Utolsó éves korában, 1956-ban *Simonyi Károly* meghívására a Központi Fizikai Kutatóintézetben kezdett el dolgozni, azonban a forradalom után Simonyi Károllyal együtt távoznia kellett az intézetből. Később visszakerült a KFKI-ba és *Jánossy Lajos* csoportjában kezdett el kísérletezni, ahol a kvantummechanika alapfeltevéseivel foglalkoztak, amelyek igazolására addig csak „gondolatkísérleteket” végeztek. Az első erre irányuló kutatás a fény kettős természetét vizsgáló Jánossy–Náray-kísérlet volt, amelyet a stabilitás érdekében egy aknában, ~50 méterrel a föld alatt végeztek. A kísérletek nagyon érdekelték a Nobel-díjas *Werner Heisenberget*, aki többször meglátogatta ezt a laboratóriumot, hiszen meglepő lett volna, ha az eredmények ellentmondanak a fizika alapját képező elméletének. Az eredmények azt támasztották alá, hogy a nagy gondossággal elvégzett mérések nem találtak a kvantummechanikának ellentmondó effektust.

Később Farkas Győző a fény-anyag kölcsönhatással – illetve ennek egyik klasszikus megnyilvánulásával –, a fotoeffektussal kezdett el foglalkozni, amelyet még 1902-ben *Lénárd Fülöp* mutatott ki, majd *Albert Einstein* értelmezett (mindketten Nobel-díjat kaptak érte). Ez a jelenség volt, többek között, a kvantumelmélet egyik kiindulópontja. *Tóth Csabával* (aki most Amerikában a Lawrence Berkeley National Laboratory egyik részlegvezetője) és *Horváth Zoltánnal* együtt kimutatta, hogy aranyat rendkívül erős lézerténnel megvilágítva mintegy ezerszer nagyobb energiával lépnek ki az elektronok, mint a gyenge, hagyományos fényforrások esetén – ami azt jelenti, hogy az Einstein-egyenlet jóval általánosabb, mint annak megszületése idején gondolták, és sokfotonos folyamatokra is érvényes. Ezekkel a kísérletekkel kezdődött a KFKI-ban a sokfotonos folyamatok vizsgálata, amely világviszonylatban is új eredményeket hozott.

Győzővel való együttműködésem emlékezetes mérföldköve volt az 1980-ban Magyarországon, az Akadémia székházában megrendezett International Conference of Multiphoton Processes (ICOMP-I), amelynek Győző volt a fő kezdeményezője, és amely-



Farkas Győző a KFKI-beli laboratóriumában, 1990-ben (MTI fotó: Balaton József).

nek szervezésében nekem is szerencsém volt részt venni. Erre a több száz fős konferenciára először látogattak el Magyarországra olyan ismert fizikusok, mint *Roy Glauber*, *Bruce Shore*, *Stig Stenholm*, *Alexander Prokhorov*, *Sergei Akhmanov* és sokan mások, akik közül később többen Nobel-díjasok lettek. A számtalan szervezési feladat mellett, a tudománypolitikai szempontok figyelembevételével, itt arra is oda kellett figyelni, hogy a bankettet is rendkívül elegáns környezetben rendezzük meg – erősítve ezzel is a keleti-nyugati együttműködést – és a konferencia rendezvényein bemutassuk Magyarországot értékeit.

Farkas Győző tudományos tevékenységének egyik csúcspontja a rendkívül rövid, attoszekundum időtartamú fényimpulzusok keltésének felfedezése, amelyre *Tóth Csabával* együtt 1992-ben új elméletet dolgoztak ki és publikáltak (*Physics Letters A* 168 (1992) 447–450), megalapozva egy új tudományágat, az attoszekundumos fizikát. Ezzel a felfedezésével, különösen azután, hogy ezt 2001-ben külföldi laboratóriumokban is igazolták, Győző külföldön ismertebbé vált, mint idehaza. Sokan innen számítják az attoszekundumos tudomány születését. Az első, 2007-ben Drezdában rendezett nemzetközi ATTO konferencián az attoszekundumos tudomány úttörői is Győzőt ünnepelték.

A számtalan egyéb tudományos eredménye, szabadalma, ezek alkalmazása és hasznosítása, ismeretterjesztő tevékenysége mellett, mindenképpen ki kell emelnünk, hogy a szegedi Extreme Light Infrastructure Attosecond Light Pulse Source (ELI-ALPS) Lézerközpont Magyarországra való telepítésében és meg-



2012-ben, a Magyar Érdemrend Tisztikeresztje kitüntetés átvételekor.

alapozásában is nagy szerepe volt Farkas Győzőnek, akit világszerte úgy ismernek, mit az attosekundumos fizika egyik atyját.

Munkásságát több kitüntetéssel ismerték el: MTA Fizikai Díj (fődíj, 2000), Simonyi Károly-díj (2006), Magyar Érdemrend Tisztikeresztje (2012), Széchenyi-díj (2014), és szülőfaluja, Kisnémedi díszpolgára (2008).

Végezetül hadd emlékezzem meg arról, hogy Győzőtől mindnyájan sokat tanultunk, mert olyan lelkesedéssel, szuggesztív hatással tudta elmagyarázni a felfedezéseit, új elméleteit, hogy további gondolatokat ébresztett és számos jelentős publikációt inspirált. Még az utóbbi években is, amikor már egyre ritkábban járt be az intézetbe, emlékezetes beszélgetéseink voltak, amelyekből nemcsak tudást, de energiát és humanitást is lehetett meríteni.

Egyik vele készült utolsó interjúban, amikor arról kérdezték, hogy a kísérletezésen kívül, hallomások szerint szabadidejében fest és elektromos orgonán játszik ezt válaszolta: „A magyarázat egyszerű. Nagyon szegény parasztcsaládban nőttem fel, sokat dolgoztunk napszámosként: az bizony manuális munka volt a javából. Megtanultam a kétkezi munka becsületét. Az intellektuális tevékenységnek pedig a piaristáknál észleltem korán a hasznát: először is ingyen tanítottak, mert jó volt a bizonyítványom, másrészt a humán szemlélet felé irányítottak. Így mindkét műfajt szeretem.”

Olyan tudós volt, aki szinte az egész fizikát átértelte, a kutatás – mint az új tudás megszerzésének eszköze – volt az élete.

Mondhatom, hogy mi, kollégái szerencsések voltunk, hogy együtt dolgozhattunk egy ilyen nagy tudású, ugyanakkor szerény Emberrel, aki azon kívül, hogy a tudomány rejtelmeibe is beavatott, emberségből, tartásból és tisztességből is példát mutatott.

Czitrowszky Aladár

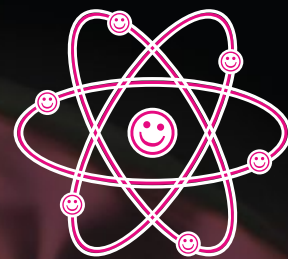
Wigner Fizikai Kutatóközpont
Szilárdtestfizikai és Optikai Intézet

A koronavírus-járvány miatt a 2020. évi FIZIKATANÁRI ANKÉT ÉS ESZKÖZBEMUTATÓ sajnos elmaradt, de elkészült ELŐADÁSÁT, bemutató KÍSÉRLETÉT – akár rövid videómelléklettel –, POSZTERÉT a Szemlében megjelenő cikk formájában

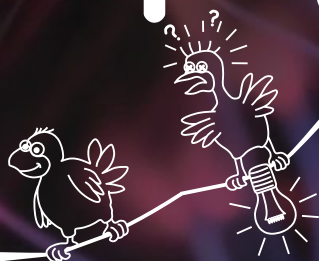
OSSZA MEG KOLLÉGÁIVAL!
Köszönettel,
a szervezők



Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat szervezésében



2020. ÁPRILIS 24-25. | A FIZIKA MINDENKIÉ 6.0



**A KORONAVÍRUS-JÁRVÁNY
ELMÚLTÁVAL,
ÖSSZEL MEGTARTJUK!**

A fizika mindenkié 2020-ban is! A tiéd, miénk és mindenkié. Fizikázz a tanároddal, barátaiddal, szüleiddel; végezz kísérleteket 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:

