

# fizikai szemle



2006/1

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat  
havonta megjelenő folyóirata.  
Támogatók: A Magyar Tudományos  
Akadémia Fizikai Tudományok Osztálya,  
az Oktatási Minisztérium,  
a Magyar Biofizikai Társaság,  
a Magyar Nukleáris Társaság  
és a Magyar Fizikushallgatók Egyesülete

Főszerkesztő:

Németh Judit

Szerkesztőbizottság:

Beke Dezső, Bencze Gyula,  
Czitrovsky Aladár, Faigel Gyula,  
Gyulai József, Horváth Dezső,  
Iglói Ferenc, Kiss Ádám, Lendvai János,  
Ormos Pál, Papp Katalin, Simon Péter,  
Sükösd Csaba, Szabados László,  
Szabó Gábor, Trócsányi Zoltán,  
Turiné Frank Zsuzsa, Ujvári Sándor

Szerkesztő:

Hock Gábor

Műszaki szerkesztő:

Kármán Tamás

A folyóirat e-mailcíme:

[fizsem.elft@mtesz.hu](mailto:fizsem.elft@mtesz.hu)

A lapba szánt írásokat erre a címre kérjük.

A folyóirat honlapja:

<http://www.kfki.hu/fszemle>

A címlapon:

Nano mérettartományban készült  
atomerő-mikroszkópos felvétel egy  
dohánymozaikvírus-telepről  
([http://www.cgl.ucsf.edu/  
chimera/ImageGallery/entries/  
afm/stmv-afm.html](http://www.cgl.ucsf.edu/chimera/ImageGallery/entries/afm/stmv-afm.html)),  
Alexander McPherson engedélyével.  
A kép, csakúgy mint Süle Péter  
nanofizikai cikke, a nanotudományok  
új eredményeit demonstrálja.

## TARTALOM

Beköszöntő	1
<i>Herbert Pietschmann</i> : A neutrínó – múlt, jelen, jövő	2
<i>Süle Péter</i> : Nanoméretű, ionbombázás-indukált változások vizsgálata atomisztikus szimulációkkal	7
<i>Sziki Gusztáv Áron</i> : Inkrusztált régészeti kerámiák vizsgálata mikroionnyalábos módszerekkel	10
<i>Bíró István</i> : Mágneses ingák kísérleti tanulmányozása	13
<b>A FIZIKA TANÍTÁSA</b>	
<i>Nagy Péter</i> : Kvantitatív problémamegoldás Minkowski-diagramon	19
<i>Ambrózy Béla, Mester András, Petróczi Gábor</i> : Fizikaversenyek Borsod-Abaúj-Zemplén megyében	22
<b>NÉGYSZÖGLETES KERÉK</b>	26
<b>INTÉZETEINK TANSZÉKEINK</b>	
Alap- és alkalmazott kutatások az Ukrán Nemzeti Tudományos Akadémia Elektronfizikai Kutatóintézetében ( <i>Spenik Ottó</i> )	28
<b>BÚCSÚZUNK</b>	
Hevessy József, 1931–2005 ( <i>Damjanovich Sándor</i> )	31
<b>PÁLYÁZATOK</b>	32
<b>HÍREK – ESEMÉNYEK</b>	33
<b>MINDENTUDÁS AZ ISKOLÁBAN</b>	
A cunami ( <i>János Imre</i> )	36
<b>KÖNYVESPOLC</b>	36
Introductory address of the new Editorial Board	
<i>H. Pietschmann</i> : The neutrino – past, present, future	
<i>P. Süle</i> : Atomistic simulations and their use in investigations of nanometric changes induced by ion bombarding	
<i>G.A. Sziki</i> : Investigation of incrustated antique ceramics using ion-microbeams	
<i>I. Bíró</i> : Experimental study on magnetic pendulums	
<b>TEACHING PHYSICS</b>	
<i>P. Nagy</i> : Quantitative problem solving on a Minkowski diagram	
<i>B. Ambrózy, A. Mester, G. Petróczi</i> : Physics competitions in Northern Hungary	
<b>PROBLEMS</b>	
<b>RESEARCH INSTITUTES, EDUCATIONAL DEPARTMENTS</b>	
Fundamental and applied research in the Research Institute for Electron Physics of the Ukrainian National Academy of Sciences ( <i>O. Spenik</i> )	
<b>FAREWELL</b>	
József Hevessy, 1931–2005 ( <i>S. Damjanovich</i> )	
<b>TENDERS, EVENTS</b>	
<b>SCIENCE IN BITS FOR THE SCHOOL</b>	
The tsunami ( <i>I. János</i> )	
<b>BOOKS</b>	
Grussbotschaft der neuen Redaktionskommission	
<i>H. Pietschmann</i> : Das Neutrino – Vergangenheit, Gegenwart, Zukunft	
<i>P. Süle</i> : Atomistische Simulationen und ihre Anwendung bei Untersuchungen von Änderungen im Nano-Bereich, die durch Ionenbeschuss verursacht wurden	
<i>G.A. Sziki</i> : Untersuchung antiker inkrustierter Keramiken mit Ionen-Mikrobündeln	
<i>I. Bíró</i> : Experimentelle Untersuchung magnetischer Pendel	
<b>PHYSIKUNTERRICHT</b>	
<i>P. Nagy</i> : Quantitative Aufgabenlösung am Minkowski-Diagramm	
<i>B. Ambrózy, A. Mester, G. Petróczi</i> : Physikwettbewerbe in Nordungarn	
<b>PROBLEME UND AUFGABEN</b>	
<b>FORSCHUNGSINSTITUTE, LEHRSTÜHLE</b>	
Grundlagenforschung und angewandte Forschung im Forschungsinstitut für Elektronenphysik der Ukrainischen Nationalen Akademie der Wissenschaften ( <i>O. Spenik</i> )	
<b>WIR NEHMEN ABSCHIED</b>	
József Hevessy, 1931–2005 ( <i>S. Damjanovich</i> )	
<b>AUSSCHREIBUNGEN, EREIGNISSE</b>	
<b>WISSENSWERTES FÜR DIE SCHULE</b>	
Die Tsunami ( <i>I. János</i> )	
<b>BÜCHER</b>	
Представление новой редакционной комиссии	
<i>Г. Пичман</i> : Нейтрино – прошлое, настоящее и будущее	
<i>П. Шюле</i> : Атомные симуляции в изучении изменений вызванных облучением ионными пучками	
<i>Г.А. Сики</i> : Изучение античных керамик методами ионных микропучков	
<i>И. Биро</i> : Экспериментальное изучение магнитных маятников	
<b>ОБУЧЕНИЕ ФИЗИКЕ</b>	
<i>П. Надь</i> : Количественное решение физических проблем на диаграмме Минковского	
<i>Б. Амбрози, А. Местер, Г. Петроци</i> : Школьные физические конкурсы в Северной Венгрии	
<b>ПРОБЛЕМЫ И УПРАЖНЕНИЯ</b>	
<b>НАУЧНЫЕ УЧРЕЖДЕНИЯ, КАФЕДРЫ</b>	
Фундаментальные и прикладные исследования в Исследовательском Институте по Электронной Физике Украинской Народной Академии Наук ( <i>О. Шпенник</i> )	
<b>ПРОЩАЕМСЯ</b>	
Йозеф Гевеши, 1931–2005 ( <i>Ш. Дамьянович</i> )	
<b>ОБЪЯВЛЕНИЯ-КОНКУРСЫ, ПРОИСХОДЯЩИЕ СОБЫТИЯ</b>	
<b>НАУЧНЫЕ ОБЗОРЫ ДЛЯ ШКОЛ</b>	
Цунами ( <i>И. Яноши</i> )	
<b>КНИГИ</b>	

# 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

LVI. évfolyam

1. szám

2006. január

## BEKÖSZÖNTŐ

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat 2005. évi Tisztújító Közgyűlése a *Fizikai Szemle* számára a korábbi főszerkesztő, *Berényi Dénes* akadémikus lemondása miatt 2006. januártól új főszerkesztőt választott. A Társulat elnöksége az új főszerkesztővel egyetértésben megújította a Szerkesztőbizottságot és a lapot támogató együttműködő szervezetek listáját. A változások nem túl jelentősek, hiszen a régi, bevált munkatársakat – amennyiben vállalták a további munkát – meg kívánták tartani, miközben frissíteni és fiatalítani is óhajtottak.

Az együttműködő szervezetek közé már korábban bevonták a Magyar Nukleáris Társaságot, most megállapodtak a Magyar Fizikus Hallgatók Egyesületével, hogy ők is újra belépnek a támogatók közé. Az együttműködő szervezetek felsorolása és az új Szerkesztőbizottság névsora megtalálható szokott helyén, a folyóirat borítójának belső oldalán.

A *Fizikai Szemle* feladata a tudományos ismeretterjesztés, a teljes fizikus-, fizikatanári közösséghez szól, nem csak az egyes témák szakértőihöz. Az új Szerkesztőbizottság e követelményt szem előtt tartva néhány változtatást vezet be a lap szerkesztésében, szerkesztésében. A legfontosabb változások a következők:

1) A cikkek tömör, informatív jellegét hangsúlyozandó az ábrák és a táblázatok nélküli írások hossza legfeljebb négy *Fizikai Szemle* oldal lehet, ábrákat és táblázatokat tartalmazóké öt.

2) Folytatásos közleményeket – a havilap hosszú, hónapos periódusideje miatt – nem fogadunk el, azt javasoljuk szerzőinknek, hogy szükség esetén inkább több, független cikket írjanak.

3) Megkérjük szerzőinket, hogy a matematikai részleteket mellőzzék. Módot adunk a részletesebb matematikai apparátus kifejtésére a Társulat honlapján a *Fizikai Szemle* részben. A folyóiratban megjele-

nő cikkben a részletek internet-címét jelezzük az érdeklődő olvasóknak.

4) Irodalmi hivatkozások mellőzését kérjük a szerzőktől. Helyettük szívesen teret adunk további ismereteket nyújtó internet-honlapok címének.

5) Tematikus számot nem közlünk, minden egyes számunkkal a teljes közösséghez szólunk.

6) Emlékszámot nem állítunk össze. Kiváló tudósainkról egy-egy méltató ismertetésben emlékezünk meg a jeles alkalmakkor.

7) A fizikus-, fizikatanári közösséget érintő hírekkel, eseményekkel különös hangsúllyal kívánunk foglalkozni.

8) Pályázati felhívásokat szívesen közlünk, de kérjük, hogy a pályázat beadási határideje előtt legalább 10 héttel juttassák el a szöveget a szerkesztőségbe.

9) Írásaikat, észrevételeiket, javaslataikat a Szerkesztőbizottság fizsem.elft@mtesz.hu e-mail címén várjuk.

A fentiekkel – melyek ez év első néhány számában megjelenő, az előző szerkesztés által elfogadott írásokra még nem vonatkoznak – azt szeretnénk elérni, hogy a *Fizikai Szemle* olvashatóbb, változatosabb legyen. Arra kérjük Önöket, hogy javaslataikkal támogassák munkánkat, írják meg, milyen témáról szeretnének olvasni. Ha érdekes eseményről, pályázatról, fizikuskonferenciáról, előadásról értesülnek, kérjük, tájékoztassák a Szerkesztőbizottságot.

Végül köszönetünket fejezzük ki Berényi Dénes leköszönő főszerkesztőnek és a korábbi Szerkesztőbizottságnak, hogy áldozatos munkával annyi éven keresztül megőrizték a lap magas színvonalát.

Szeretnénk méltók lenni hozzájuk, valamint a lap korábbi főszerkesztője, *Marx György* szelleméhez. Kérjük olvasóinkat, segítsenek ebben.

*Szerkesztőbizottság*

Rögtön az elején őszinte köszönetet szeretnék mondani azért, hogy én tarthatom az ez évi Marx György-émlék-előadást, hiszen sok évtizeden át nagyon közeli barátok voltunk. A neutrínó fizikájának óriási palettájáról azokat a kérdéseket választottam, amelyek mindkettőnk a legmélyebben érdekeltek, és amelyekről sokszor folytattunk személyes beszélgetéseket.

Valamikor George hívta fel a figyelmemet egy angol nyelvű elektrodinamika tankönyv kedves ábrájára:

És mondá az Úr:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \rho,$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0,$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t},$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

– és lőn világosság!

Azonban szerintem ez egy túlzottan leegyszerűsítő megközelítés, hiszen, ami a Földet és a Napot illeti, a fény a Napból származik. Pusztán a Maxwell-egyenletek alapján a Nap nem sugározhatna. Ezért az alábbi kiegészítést célszerű tennünk:

...és mondá *Wolfgang Pauli*: Legyenek neutrínók!

...és mondá *Enrico Fermi*: Hassanak kölcsön gyengén!

*És a Nap sugározni kezd!*

Tény, hogy Wolfgang Pauli, amikor 1930-ban megjósolta a neutrínót, nem merte publikálni, mert félt, hogy kísérletileg sohasem lesz kimutatható. Végül egy Tübingenben tartott radioaktivitási konferenciára küldött levélben állt elő javaslatával. Ekkor mondta barátjának, *Walter Baadénak*: „Ma valami olyat műveltem, amit elméleti fizikusnak soha életében nem szabad elkövetnie: Olyasmire tettem jóslatot, amit sohasem tudnak kísérletileg észlelni.” [1]

Walter Baade – aki csillagász volt – úgy tűnik, nagyon tisztelhetette a kísérleti fizikusokat, mert fogadást ajánlott Paulinak, hogy a neutrínót egy nap mégiscsak észlelni fogják. Amikor *Reines* és *Cowan* 1956-ban bejelentették a neutrínó felfedezését, Pauli megfizette az elvesztett fogadás tétjét: egy láda francia pezsgőt! Szerettem volna meg-

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat és az ELTE Fizika Tanszékcsoport közös rendezésű Ortway-kollokviumán, 2005. május 19-én elhangzott Marx György-émlék-előadásnak a szerző által beküldött szövege (fordította: *Patkós András*). Az előadást követően *Németh Judit*, az ELFT elnöke a Társulat elnöksége által odaitélt Marx György-plakettet adta át az előadónak.

tudni, hogy igaz-e ez a közismert történet, így egy Aachenben tartott neutrínókonferencián megkérdeztem Fred Reines (aki George-nak és nekem is közeli barátom volt), ő hogyan emlékezik mindekre. Ő iszonyú dühös lett, és azt mondta, hogy a történet valós, ám a pezsgőt kizárólag az elméletiek itták meg, neki és Cowannak egy csepp sem jutott.

De ne szaladjunk oly gyorsan előre!

Reines és Cowan nagy sikere előtt nem nagyon tudták, hogy mi lehetne a legjobb neutrínóforrás. Egy cikkükben [2] *F.G. Houtermans* és *W. Thirring* a Napot javasolták, mert becslésük szerint a Nap neutrínófluxusa  $6 \times 10^{10}$  neutrínó  $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ . A kefelevonathoz fűzött megjegyzésükben azt mondják azonban: „E cikk közlését technikai gondok késleltették. Eközben úgy tűnik, hogy a neutrínóknak az inverz  $\beta$ -bomlás folyamatában történő abszorpcióját F. Reines és C.L. Cowan kimutatták.” [3]

Ők Reines és Cowan első cikkére utalnak, amelyet kis statisztikája (eseményszáma) miatt kritizáltak. A végső válasz csak 1956-ban született meg [4]. Mielőtt a részletekbe bocsátkoznánk, szeretnék a neutrínó fizikájának a legfontosabb eseményeiről áttekintést adni:

1930: *Wolfgang Pauli*: A neutrínó létezésének megjósolása

1938: *Hans Bethe*: A csillagokban zajló energiatermelés folyamatai

1956: *Fred Reines* és *Clyde Cowan*: A neutrínó felfedezése

1962: *Lederman, Schwartz, Steinberger* és munkatársai:  $\nu_e \neq \nu_\mu$

1964: *John Bahcall*: A Nap neutrínófluxusának kiszámítása

1967: *Ray Davis*: Az első Nap-neutrínó-kísérlet (Cl  $\rightarrow$  Ar)

1967: *Bruno Pontecorvo* és *V.N. Gribov*: Neutrínóoszilláció

1975: *Martin Perl*: A leptonok harmadik generációja ( $\tau, \nu_\tau$ )

1987: A szupernóva-neutrínók első észlelése

1998: Super-Kamiokande: Első jelzések a neutrínóoszillációkra

2002: SNO & KamLAND: A neutrínóoszillációk létezésének végleges bizonyítása

Az sem érdektelen, hogy ki kapott Nobel-díjat a neutrínó fizikájának hősei közül:

1938: E. Fermi ... *nem* a gyenge kölcsönhatás elméleteért

1945: W. Pauli ... *nem* a neutrínóhipotézisért

1988: L. Lederman, M. Schwartz, J. Steinberger „a neutrínónyaláb módszeréért és a müon neutrínójának felfedezése révén a leptonok dublettszerkezetének kimutatásáért”

1995: F. Reines „a neutrínó észleléséért”

2002: R. Davis Jr. és *M. Koshiba* „Úttörő asztrofizikai felfedezéseikért, különösen a kozmikus neutrínók észleléséért”

Most pedig haladjunk tovább a történeti sorrend szerint, és vizsgáljuk meg, miért is volt e lépések mindegyike annyira alapvető a maga idejében.

## A kétféle neutrínó

1960 környékén a részecskefizikusok közössége egy mély tartalmú kihívással találta magát szemben. A müon gyenge bomlását jól értették,

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_{(\mu)} + \bar{\nu}_{(e)}, \quad (1)$$

ahol a neutrínók indexeit azért tettem zárójelbe, mert az idő tájt még nem tudták, hogy ez a két részecske különböző. Azonban a nyilvánvalóan lehetségesnek tűnő elektromágneses bomlást nem sikerült észlelni. Annak ágarányára (branching ratio,  $BR$ ) a következő felső korlát áll fent

$$BR(\mu \rightarrow e + \gamma) \leq 10^{-11}. \quad (2)$$

(A (2) egyenletben a mai legjobb becslés olvasható! [5]) Bármely töltött részecske-antirészecske pár átalakulhat fotonpárba. Minthogy a neutrínónak sem töltése, sem mágneses momentuma nincsen, ez a reakció ebben az esetben lehetetlen. Ha azonban a gyenge kölcsönhatási folyamatokat  $W$ -bozonok közvetítik, akkor felléphet az úgynevezett belső fékezési sugárzás, amelynek révén a (2) reakcióbeli bomlás lehetségessé válik, hacsak valamely egyéb megmaradási tétel nem tiltja azt meg. Ezt a szerepet pedig közismerten az elektronok és a müonok számára vonatkozó különálló megmaradási tétel játszhatja. Ez viszont azt jelenti, hogy  $\nu_e$  és  $\nu_\mu$  különböző részecskék. Tehát a következő alternatív állítások között kellett választani: vagy nem létezik a  $W$  közbenső bozon, vagy  $\nu_e$  és  $\nu_\mu$  különbözőek.

Nyilvánvalóan kulcskérdés volt annak eldöntése, hogy az összes kölcsönhatás Yukawa-típusú-e, avagy van egy kivétel, nevezetesen a gyenge kölcsönhatások alapvetően négy-fermionos jellegűek! Tehát meg kellett tudnunk, hogy kétféle neutrínó létezik-e vagy sem.

Elsősorban *Gilberto Bernardini* vetette latba minden személyes tekintélyét, hogy a CERN végezze el ezt a neutrínókísérletet. Hogy érzékeltessük a kísérlet nehézségét, idézzük fel a neutrínós kölcsönhatások bizonyos alaptulajdonságait. A  $T$  céltárgyon  $E_\nu$  energiával szóródó neutrínó hatáskeresztmetszetét a következő képlet adja:

$$\sigma_{\text{tot}}(\nu + T \rightarrow X) = \text{konst. } M_T E_\nu, \quad (3)$$

ahol

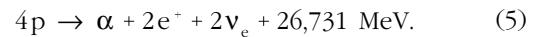
$$\text{konst.} \cong 10^{-38} \text{ cm}^2/\text{GeV}^2. \quad (4)$$

Így egy GeV nagyságrendű neutrínónak egy nukleonon való szórási hatáskeresztmetszete  $10^{-38} \text{ cm}^2$ , míg a MeV tartományba eső energia esetén ugyanez  $10^{-41} \text{ cm}^2$ . (Ez utóbbi hatáskeresztmetszetet kellett Reinesnek és Cowannak kísérletükben megmérniük.)

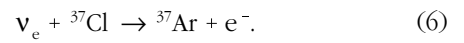
Az akkor éppen hogy megalapított, fiatal CERN számára nagy lehetőség lett volna a neutrínók kérdésének tisztázása, de a CERN egy nagypontosságú kísérletet tervezett, mintegy 1000 esemény észlelésével. A döntő fizikai kérdés azonban néhány esemény észlelésével is megválaszolható volt; a pionbomlásból származó neutrínónyalábot túlnyomórészt  $\nu_\mu$  alkotja, ha kétféle neutrínó létezik. Azaz az általuk indukált „inverz  $\beta$ -bomlás” kizárólag müonokat termelhet. A kísérletet rohamtempóban elvégezték az akkor „újszülött” brookhaveni gyorsítónál, és bebizonyították a kétfajta neutrínó létezését [6].

## Nap-neutrínók

Immár több mint 40 éve, hogy *John Bahcall* elvégezte az első részletes számításokat a Nap neutrínófluxusára. A Napban zajló hidrogénégetés alapfolyamata a következő:



Ám a részletes reakcióháló sokkal bonyolultabb, mint-hogy egyebek mellett abban a  ${}^3\text{He}$ -,  ${}^7\text{Be}$ -,  ${}^7\text{Li}$ - és  ${}^8\text{B}$ -magok is részt vesznek. A legnagyobb energiájú neutrínók a  ${}^8\text{B}$ -ból származnak (átlagos energiájuk 7,4 MeV). A  ${}^7\text{Be}$ -ből egy éles vonalat kapunk  $E_\nu = 0,862 \text{ MeV}$  energiával. Mindkét neutrínót az inverz  $\beta$ -reakcióval lehet kimutatni:



Ray Davisnek volt elegendő mersze e kísérlet elvégzéséhez. Egy óriási, 100 000 gallonos (kb. 400 000 literes) tartályt megtöltött tisztítószerezrel ( $\text{C}_2\text{Cl}_4$ ) mélyen a föld felszíne alatt a Homestake bányában, és egyesével mosta ki abból az argonná átalakult atomokat egy számlálóba [7]. A várt eseménygyakoriság szélsőségesen kicsiny volt! A Nap-neutrínós kísérletekben erre külön egységet vezettek be: Solar Neutrino Unit (SNU). Ennek definíciója:

$$1 \text{ SNU} = 10^{-36} \text{ befogás atom}^{-1} \text{ s}^{-1}. \quad (7)$$

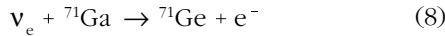
1984-re Davis már elegendő mennyiségű eseményt gyűjtött össze, hogy statisztikailag meggyőző becslést adhasson a Nap-neutrínók fluxusára:  $2,1 \pm 0,3 \text{ SNU}$  [8]. De Bahcall jóslata ennél jóval nagyobb volt [9], 6–8 SNU attól függően, hogy a Nap-modell paramétereit hogyan választotta. Ez nagy felfordulást okozott a szakmai közösségben. Jól emlékszem a Marx György által szervezett egyik Balaton-konferencián a Davis előadását követő vitára. A végén egyetértés volt abban, hogy az alábbi állítások valamelyike biztosan igaz:

1. A kísérlet rossz
2. A Nap-modell rossz
3. A magfizika elmélete rossz
4. A részecskefizika elmélete rossz

Az idő tájt senki sem várta, hogy az utolsó állítás legyen a helyes! A helyzet annyira kritikus volt, hogy Hans Bethe az 1988-ban Bostonban Marx György által szervezett Ne-

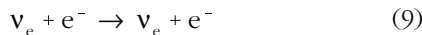
utrínó Konferencián megjegyezte, hogy kezd bizonytalan lenni, vajon jó indoklással kapta-e meg a Nobel-díjat.

A kísérletet jobb (alacsonyabb) küszöbértékkel meg kellett ismételni. A



reakció küszöbenergiája elég alacsony ahhoz, hogy az (5) elsődleges folyamatból származó összes neutrínót megfigyelhessék. Két galliumot használó kísérletet hoztak létre, a Gallex az olaszországi Gran Sasso hegység mélyén, a SAGE (Soviet–American Gallium Experiment<sup>1</sup>) a Kaukázusban működött. Ám azok is neutrínóhiányt mutattak ki a Nap-modell jóslatához képest, mely utóbbi időközben egyre pontosabbá vált.

Végül, Japánban működni kezdett a Super-Kamiokande elnevezésű Cserenkov-óriásdetektor. Ez a



rugalmas ütközések észlelése révén nemcsak kimutatta, de meg is határozta a Nap-neutrínók beesési irányát is, miután a (9) reakció differenciális hatáskeresztmetszete erős csúcsot mutat a beesés irányában. Hans Bethe bizonyára megkönnyebbült az eredmények láttán, amely szerint valóban a Napban keletkeztek a detektált neutrínók, még ha kevesen voltak is. (Élénken emlékszem, milyen izgatottan mutatta meg nekem Marx György az első ábrákat, amelyeken a neutrínók érkezési iránya egyértelműen a Nap felé mutatott.)

A 2002. évi müncheni Neutrínó Konferencia idején (ez volt az utolsó, amelyen George részt vehetett) a megfigyelt neutrínóáramnak a Nap-modell által jóslathoz viszonyított aránya a következő volt:

A klór–argon kísérlet	$0,30 \pm 0,03$
A galliumos kísérletek	$0,53 \pm 0,03$
Super-Kamiokande	$0,403 \pm 0,013$

Mielőtt rátérnénk a Nap-neutrínók rejtélyének megoldására, vissza kell lépünk a neutrínók keveredésének Bruno Pontecorvo által felvetett elképzelésére.

## A neutrínóoszillációk

Bruno Pontecorvo (Marx György közeli barátja) már 1957-ben javaslatot tett a neutrínóoszilláció lehetőségére [10] (ez analóg a semleges kaonrendszerben bekövetkező jelenséggel). A különböző neutrínófajták egymásba oszcillálásának javaslata Ziro Makitól és munkatársaitól származik [11]. Ennek előfeltétele, hogy a különféle neutrínóknak különböző tömegük legyen, tehát semmiképpen sem lehet mindegyik zérus tömegű. Minthogy a részecskefizika Standard Modellje tömeg nélküli neutrínókat tételez fel [12], ez a javaslat az új fizika felé mutató bátor elképzelés.

Ha kétféle neutrínó keveredik, akkor a „tömeg-sajátállapotok” – mondjuk,  $(\nu_1, \nu_2)$  – különböznek a „gyenge sajátállapotoktól”:  $(\nu_e, \nu_\mu)$ . A  $\nu_l \rightarrow \nu_{l'} (l, l' = e, \mu)$  folyamat átmeneti valószínűsége:

$$P_{l,l'} = \sin^2 2\alpha \sin^2 \left( \frac{L}{2\lambda} \right), \quad l \neq l'. \quad (10)$$

ahol  $\alpha$  a keveredés szöge. Háromféle neutrínóra több pár képezhető, és a forrástól  $L$  távolságra az  $E$  energiájú nyalábban fellépő oszcillációt meghatározó mennyiség kifejezése az elmélet szerint

$$\lambda_{k,k'} = \frac{2E}{\Delta m_{k,k'}^2}, \quad k, k' = 1, 2, 3, \quad (11)$$

amelyben fellép a tömegkülönbség

$$\Delta m_{k,k'}^2 = |m_{\nu_k}^2 - m_{\nu_{k'}}^2|. \quad (12)$$

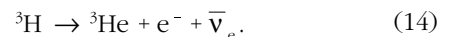
A kísérlet leírására numerikusan az

$$\frac{L}{\lambda_{k,k'}} = 2,54 \frac{\Delta m_{k,k'}^2}{\text{eV}} \frac{L/E}{\text{km/GeV}} \quad (13)$$

hányados használandó (10)-ben.

Kísérletileg vagy azt vizsgálhatják, hogy az  $E$  energiájú nyalábban, a forrástól  $L$  távolságra milyen mértékben jelenik meg egy abban eredetileg nem található neutrínófajta (*felbukkanási kísérlet*), vagy ennek alternatívájaként az eredeti nyaláb intenzitáscsökkenését („vékonyodását”) mérhetik (*eltűnési kísérlet*) az eredeti részecskének másfajta neutrínókba történt átoscillálása eredményeként.

Amint fentebb állítottuk, a neutrínóoszillációkból a tömegkülönbségre lehet következtetni, az legalább egy neutrínónak nemzérus tömeget jelez. Közvetlen tömegkorlátot elegendő pontossággal mérni igen nehéz. A legjobb felső korlát a trícium elbomlásából származtatható:



Az elektron energiaspektrumát a végpontja környezetében határozzák meg a Kurie-diagramon, amelyen a következő mennyiséget ábrázolják az  $E_e$  függvényében:

$$K(E_e) = \frac{G U_{ud} \sqrt{\xi}}{\pi \sqrt{\pi}} \sqrt{(E_0 - E_e)^2 - m_\nu^2}, \quad (15)$$

ahol  $\xi$  a nukleáris mátrixelem,  $E_0$  pedig az  $E_e$  elektronenergia maximuma. A függvényalak pontos meghatározásához nagyon sok eseményre van szükség, miközben a spektrum éppen ott minimális.

A kísérlet elvégzése során igen furcsa jelenségek léptek fel (George-ot mindig a váratlan fejlemények izgatják!). A legutóbbi időig, az összes(!) kísérlet negatív értéket adott  $m_\nu^2$ -re, miközben ez statisztikai hibaként csak a méréssorozatok felénél lenne elképzelhető. Továbbá, volt egy furcsa fél éves periódusidejű, szisztematikusnak tűnő változás is a kísérlet eredményében, amelyet

<sup>1</sup> A Szovjetunió felbomlása után a kísérletet *nem* keresztelték át RAGE-re, az első szóban a Sovietnek Russianra való cserélésével (ui. rage = düh)!

„Troitsk-hatásnak” hívták. Ennek magyarázatául az Ősrobbanásból visszamaradt neutrínók óriási lapos lemezét tetelezték fel, amelyen a Föld évente kétszer áthalad pályamozgása közben. Szerencsére mindezek a jelenségek eltűntek a kísérlet feletti kontroll javításával, és az elektron-neutrínó tömegére a jelenlegi legjobb felső korlát, amely a Mainzban és Troitskban folytatott két kísérletről származik, egységesen 2,2 eV.

A neutrínó tömegének fontossága miatt Karlsruheban új kísérletet terveznek KATRIN névvel. Ennek célja az elektronvoltage alatti érzékenység (2013-ra a 0,2 eV) elérése.

## A harmadik generáció

A részecskefizikus közvélemény nagy meglepetésére Martin Perl [13] és munkatársai 1975-ben felfedezték a leptonok harmadik generációját. Elsőként nyilván a töltött  $\tau$ -leptonot találták meg az

$$e^+ + e^- \rightarrow \mu^\pm + e^{\mp} + \text{hiányzó energia} \quad (16)$$

reakció révén.

Felmerült a kérdés, hogy a közvetlenül nem észlelt neutrínó vajon szintén az új, harmadik generációhoz tartozik, vagy a már ismert két fajta valamelyike. Utóbbi lehetőségeket hamarosan kizárták a kísérletek. Elég sok időbe telt, amíg a neutrínók harmadik generációját közvetlenül is „láthatóvá tették” a  $\tau$ -lepton keltő reakciója révén a DONUT-kísérletben. (Idetartozik az a mulatságos eset, amely 1977-ben a Strbské Plesón tartott Hadronspektroszkópiai Háromszög-szemináriumon történt, ahol én az *Ötödik lepton*, George pedig a *Hatodik lepton* címmel tartott előadást.)

## Az 1987a szupernóva

1987 februárjában egy szupernóva robbant fel a közeli Nagy Magellán-ködben. A tudománytörténetben először detektálták az ebben az eseményben keletkező neutrínófelvillanást is [14]. Bár sikerült ennek révén a  $\nu_e$  neutrínó tömegére felső korlátot kapni [15], még több információ lett volna nyerhető, ha a sikeres észlelés két fő detektorának, egy japán és egy USA-beli detektornak az óráit megfelelően szinkronizálták volna. Sajnos ez nem történt meg. (Emlékszem az 1987-ben Santa Fében tartott workshopon, amelyet a gyenge kölcsönhatásokról és a neutrínókról szerveztünk, a Kamiokande-kísérlet képviselője a következő szavakkal sajnálkozott e hiányosságon: „Nagyon zavarbaejtő ez a pontatlanság, hiszen országom egyebek között a jó minőségű karórák exportjáról is nevezetes.” Ugyanis egy doktorandusz ült a detektor mellett a nevezetes esemény időpontjában, aki a detektor megszólalásának pillanatát egyszerűen karórája állásából olvasta le, mert senki sem látta előre, hogy a pontos időnek bármiféle jelentősége lesz.)

Ezt a nagy föld alatti detektort eredetileg a proton bomlásának észlelésére építették. A kísérlet neve Ka-

miokande, s a *Kamioka Nucleon Decay Experiment* szöveggel utal. Miután kiderült, hogy a protonnak hosszabb az élettartama, mint aminek kimutatására ez a detektor képes, ugyanakkor pedig bekövetkezett a történelmi neutrínóészlelés, a kísérlet irányítói a rövidítést átértelmezték: a Kamiokande szó immár a *Kamioka Neutrino Detection Equipment* kifejezésre utal.

## Neutrínók az atmoszférából<sup>2</sup>

Amikor a kozmikus sugárzás egy részecskéje behatol a földi légkörbe, ütközései főleg pionokat keltenek. Ezek pedig a  $\pi \rightarrow \mu + \nu_\mu$  reakció révén bomlanak, majd a müon tovább bomlik az (1) reakcióval. Ebből az egyszerű reakciósorból világos, hogy a Földet elérő kozmikus sugárzásban kétszer annyi a  $\nu_\mu$ , mint  $\nu_e$ .<sup>3</sup> Ehhez korrekciók és zavaró háttér is társul (pl. a kozmikus sugárzás által a pionok mellett keltett kaonok bomlásából). Ezeket a korrekciókat figyelembe vették, mégis a megfigyelt hányados tartósan alacsonyabb volt a vártnál.

A Super-Kamiokande detektornál egy gyönyörű szép kísérletben megmérték a neutrínók detektálásakor keletkező müonok közül külön a felfelé és külön a lefelé haladóknak a számát. Amíg a müonokat keltő, lefelé haladó neutrínók csak 10 km-t haladtak a müonkeltést megelőzően, a felfelé jövőknak nagyságrendileg 10000 km-t kellett megtenniük. Ez pedig azt jelenti, hogy az utóbbiaknak elegendő idejük volt arra, hogy a (10) egyenletnek megfelelően oszcillációval „eltűnjenek”. A részletes elemzés azt mutatta, hogy a  $\nu_\mu$ -k  $\nu_\tau$ -kba oszcillálnak át, mégpedig a lehetséges legnagyobb keveredési szögnek megfelelően, azaz  $\sin^2 2\theta = 1$ . A tömegkülönbségre pedig  $\Delta m^2 = 2,5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$  adódott.

Amint kísérleti érvet sikerült találni a neutrínók oszcillációjára, azonnal elfogadhatóvá lett a Nap-neutrínók rejtélyének a  $\nu_e$ -nyaláb oszcillációs gyengülésével való magyarázata. De ezt a lehetőséget még valamilyen pozitív méréssel illet ellenőrizni. Mindaddig, amíg csak a töltött gyenge áramhoz kapcsolódó események detektálására volt mód, csak eltűnési kísérletet lehetett tervezni. Az eltűnő fluxusból létrejövő másfajta neutrínó keletkezési kimutatására a semleges áramok révén végbemenő neutrínóreakciókra érzékeny új detektort kellett építeni.

## A Sudbury Neutrínó Observatórium (SNO)

A semleges áramok által leírt neutrínóreakciók kimutatására egy óriási Cserenkov-detektort építettek az északkanadai Sudbury bánya mélyén. Ennek tartályát 1000 tonna tiszta nehésvízzel töltötték meg. A deutérium a következő neutrínóreakciókban vehet részt:

$$\nu_l + d \rightarrow \nu_l + n + p, \quad l = e, \mu, \tau, \quad (17a)$$

<sup>2</sup> Légköri neutrínókat először Indiában és Dél-Afrikában figyeltek meg [16].

<sup>3</sup> Az idődilatáció miatt ez az érvelés csak alacsony neutrínóenergiákra alkalmazható.

$$\nu_e + d \rightarrow e^- + p + p, \quad (17b)$$

Így a (17a) reakcióval a teljes, csökkenésmentes neutrínófluxust is megmérhették.

Nagy megkönnyebbülést okozott és egyben csodálatos siker volt, amikor 2002-ben Münchenben a Napból származó teljes neutrínófluxusra a

$$\phi_{\text{SNO}} = 5,09 + 0,44 + \frac{0,46}{-0,43} - 0,43 \quad (18a)$$

értéket tették közzé, amely tökéletes egyezésben van a Standard Nap-Modellből számított

$$\phi_{\text{SSM}} = 5,05 + \frac{1,01}{-0,81} \quad (18b)$$

értékkel. De ez nem volt elegendő arra, hogy a légköri neutrínók elemzéséhez hasonlóan részletes oszcillációs adatokat kapjanak, hiszen a mérést csak egyetlen távolságon tudták elvégezni. A hiányzó ismeretet egy újabb csodálatos szépségű kísérletből nyerték: a KamLAND-kísérletből (*Kamioka Liquid Scintillator Anti-Neutrino Detector*). Ez a Kamioka hegységben található, 1000 tonna szcintillátor-folyadékmal működő neutrínódetektor, amellyel sikerült megmérni a környező 13 atomerőműből származó neutrínófluxust!

A két kísérletből együttesen a Nap-neutrínók oszcillációját jellemző adatokra a következő paramétereket kapták az elektron-neutrínóknak müon-neutrínóba történő átalakulását feltételezve:

$$\begin{aligned} \Delta m^2 &= 8,3 \times 10^{-5} \text{ eV}^2, \\ \sin^2 2\theta &= 0,83. \end{aligned} \quad (19)$$

Neutrínók három generációját és kétféle neutrínóoszcillációt feltételezve (azaz két tömegkülönbséget vezetve be) a fenti mérési eredményekkel a megfigyelések jó leírását kapnánk még akkor is, ha csak a tömegek különbségeit ismerhetjük meg belőlük, az abszolút értékeket nem. Azonban még egy megoldandó rejtély maradt fenn, így végül a jövőre is kell egy pillantást vetnünk.

## Steril neutrínók?

Los Alamosban végezték el az LSND nevű oszcillációs kísérletet. Amikor egy reakcióban  $\pi^+$  keletkezik, az a  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$  reakcióval bomlik, majd a müon  $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$  reakcióval maga is tovább bomlik. Azaz, egy tisztán pozitív pionokból álló nyalábból nem jelenhet meg anti- $\nu_e$ . Ha ilyet látnak, akkor az csak oszcillációból származhat, feltéve, hogy a hátteret gondosan levonták.

Az LSND-kísérletben éppen ezeket az anti- $\nu_e$  részecskéket figyelték meg. Ez egy  $4\sigma$  konfidenciaszintű esemény. A gondot az jelenti, hogy a becsült tömegkülönbség messze nagyobb, mint amelyet a fent leírt kísérletekből származtattak. Azt viszont tudjuk, hogy nem lehet könnyen beilleszteni egy negyedik neutrínógenerációt a létező részecskék közé. 1976-ban mutattam rá [17], hogy a különféle neutrínófajták  $N_G$  számát a Z-bozon szélességéből a

$$\Gamma_Z = \Gamma(Z \rightarrow \text{látható}) + N_G \Gamma(Z \rightarrow \nu \nu) \quad (20)$$

összefüggés segítségével megbecsülhetjük.

A Részecskeadatok Csoportja (*Particle Data Group*) 2004-ben a következő értéket tette közzé [5]:

$$N_G = 2,994 \pm 0,012. \quad (21)$$

Tehát egy negyedik neutrínó tulajdonságai mások, mint az első háromé, nevezetesen az nem csatolódhat a Z-bozonhoz. Általában ezért „steril neutrínónak” hívják, és az én szememben egy igencsak ronda teremtmény. Miután az LSND eredményét független mérések nem reprodukálták, nyitott kérdés, hogy helyes-e? Az elmúlt években a Nemzetközi Neutrínó Konferenciákon (ez is George „gyermeké”) a záró összefoglalókat tartó előadók bevett szokása volt előadásukat így kezdeni: összefoglalóban nem veszek tudomást az LSND-kísérletről. Ezt a problémát azonban objektíven kell tisztázni. Ezért előkészületben van egy újabb kísérlet – a Mini-Boone –, hogy tisztázza az LSND állításait. Az első kísérleteket 2005-re ígérték, de késésben vannak, mert igen pontos és gondos méréssel lehet csak tisztázni ezt a nagyon fontos kérdést. Ezt pedig izgatottan várja a neutrínófizikusok közössége.

A müncheni Nemzetközi Neutrínó Konferencia volt az utolsó (2002-ben), amelyen George részt vett, amelyet megnyitott, és ahol a zárszót is ő mondta. Két évvel ez után Párizsban én kaptam a megtisztelő feladatot, hogy a megnyitón emlékezzek rá [18]. Ez a konferenciasorozat nem csökkenő lelkesedéssel folytatódik, de nagyon mélyen átérezzük alapító atyjának, Marx Györgynek a hiányát.

Megköszönöm *Walter Grimus*-nak, hogy elolvasta a kéziratot.

## Irodalom

1. G. MARX – Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 38 (1995) 518
2. F.G. HOUTERMANS, W. THIRRING – Helvetica Physica Acta 27 (1954) 81
3. F. REINES, C.L. COWAN – Phys. Rev. 92 (1953) 830, 1088
4. C.L. COWAN et al. – Science 124 (1956),  
F. REINES, C.L. COWAN – Phys. Rev. 113 (1959) 273
5. PARTICLE DATA GROUP – Phys. Lett. B592 (2004) 33
6. G. DANBY et al. – Phys. Rev. Lett. 9 (1962) 36
7. R. DAVIS JR. et al. – Phys. Rev. Lett. 20 (1968) 1205
8. R. DAVIS JR. et al. – AIP Proc. 123 Steamboat Springs Conf. (1984) 1037
9. J.N. BAHCALL et al. – Rev. Mod. Phys. 54 (1982) 767
10. B. PONTECORVO – Sov. Phys. JETP 33 (1957) 549, 34 (1958) 247, 53 (1967) 1117  
V. GRIBOV, B. PONTECORVO – Phys. Lett. B28 (1969) 493
11. Z. MAKI, M. NAKAGAWA, S. SAKATA – Progr. Theor. Phys. 28 (1962) 870
12. D. HAIDT, H. PIETSCHMANN: *Electroweak Interactions* – Landoldt-Börnstein New Series Group I, Vol. 10. Springer-Verlag, Berlin (1988) 14
13. M.L. PERL et al. – Phys. Rev. Lett. 35 (1975) 1489
14. K. HIRATA et al. – Phys. Rev. Lett. 58 (1987) 1490  
R.M. BIONTA et al. – Phys. Rev. Lett. 58 (1987) 1494
15. D. SCHRAMM – Proc. Int. Symp. Lepton Photon, Hamburg (1987) 471
16. C.V. ACHAR et al. – Phys. Lett. 18 (1965) 196  
F. REINES et al. – Phys. Rev. Lett. 15 (1965) 429
17. R. BERTLMANN, H. PIETSCHMANN – Phys. Rev. D15 (1977) 683
18. H. PIETSCHMANN: *In Memoriam George Marx* – Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 143 (2005) ix



# NANOMÉRETŰ, IONBOMBÁZÁS-INDUKÁLT VÁLTOZÁSOK VIZSGÁLATA ATOMISZTIKUS SZIMULÁCIÓKKAL

Süle Péter

MTA–MFA, Felületfizikai Osztály

Nanoméretű felületi struktúrák mérnöki szintű pontossággal való kialakítása a felületfizika és az anyagtudományok napjaink legnagyobb kihívásai közé tartozik. A hagyományos litográfiai eljárások már csak nagy nehézségek árán alkalmazhatók a 100 nm alatti mérettartományban [1]. A legújabb kutatások elsősorban az úgynevezett önszerveződő rendszerek sajátosságait kihasználva igyekeznek nanopöttyök rendezett tömbjeit előállítani. Az utóbbi években próbálkozások történtek kisenergiás ionbombázás hatására bekövetkező felületi morfológia változások kihasználására is [1, 2].

Az ionmegmunkálás már széles körben használatos módszer az alap- és alkalmazott kutatásban, illetve technológiai szinten is. Alacsonyenergiás nemesgázionokkal (pl. 1 keV Ar<sup>+</sup>) mintavékonyítás vagy simítás érhető el. Bizonyos fémek vagy félvezetők felületén jellegzetes periodikus struktúrák alakíthatók ki, mint például felületi hullámok vagy nanopöttyök és nanolyukak [2, 3].

Azonban ezeknek a folyamatoknak az atomisztikus szintű megértése még hiányos [3, 4]. A molekuladinamikai (MD) szimulációk lehetővé teszik az ionindukált folyamatok időbeli fejlődésének követését. A módszer teljesítőképességét csak két feltétel korlátozza. Egyrészt pontos többtest-kölcsönhatási potenciálokra van szükség, másrészt komoly időbeli korlátok lépnek fel. Az MD-szimulációk jellegzetesen ps időskálán lezajló folyamatok vizsgálatára használhatók, és csak néhány esetben kivitelezhetők a ms vagy ns hosszúságú folyamatok szimulációi. Ugyan napjaink szuperszámítógépein magas párhuzamosítási szint mellett már elérhető akár  $\mu$ s tartamú szimulációk is, de ezek napi szintű alkalmazása nagyméretű rendszereken meglehetősen drága módszer lenne. Ennek ellenére a módszert – fontossága miatt – széles körben alkalmazzák mind biofizikai, mind anyagtudományi kutatásokban. A legjelentősebb eredményeket eddig például a fehérjék (enzimek) dinamikai vizsgálatában érték el. Valós időtartamú szimulációk elérése egyelőre még várat magára. Áthidaló megoldásként Monte-Carlo-módszerrel kombinálva vagy például az úgynevezett hipertermikus módszerrel lehet gyorsítást elérni az algoritmusok sebességében [5].

Az MD-módszer lényege röviden abban áll, hogy egy mikrokanonikus sokaság részecskéinek mozgása leírható klasszikus potenciálokkal jellemzett potenciáltérben. A rendszer időfejlődése a newtoni mozgásegyenletek megoldásán keresztül követhető. Állandó részecskeszám ( $N$ ), nyomás ( $P$ ) és hőmérséklet mellett ( $T$ ) végzett szimuláció esetén periodikus határfelületek, presztosztát, illetve termosztát alkalmazása is szükséges (a nyomás és hőmérséklet állandó értéken való tartásához szükséges algoritmusok) [6]. A módszer *a priori* abban a tekintetben, hogy a különböző atomi transzportfolyamatok leírásához nem

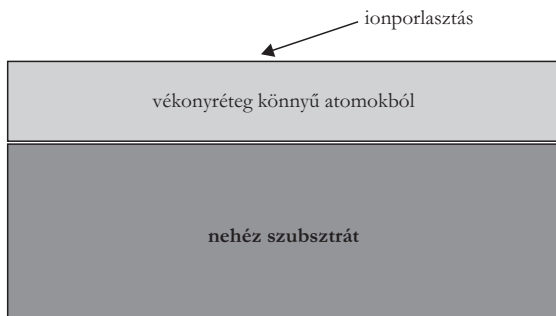
használ előzetes ismereteket, ha megfelelő pontosságú kölcsönhatási potenciál áll rendelkezésre, illetve megfelelően nagy méretű szimulációs cellát vettünk figyelembe. A módszer nem él előzetes feltevésekkel például az atomi diffúzió mechanizmusára nézve. Más eljárások, mint például a kinetikus Monte-Carlo-szimulációk, előfeltevéseket igényelnek, például meg kell adni bemenő paraméterként a különböző diffúziós gátak nagyságát [5].

Az anyagtudományi alkalmazások a 90-es évektől jelentek meg, illetve terjedtek el. Sikeresen használják rétegnövesztés, kristálynövekedés, feszültségrelaxáció vagy például fázisátalakulások tanulmányozására [4, 7]. Mozgó részecskék becsapódásának hatására bekövetkező felületi durvulás, porlódás, illetve az anyag belsejében előálló változások vizsgálatára is intenzíven alkalmazott módszer, mivel az utóbbi két évtizedben pontos többtest-potenciálok kerültek kifejlesztésre. Ezek lehetővé teszik a fizikailag megalapozott atomisztikus szintű modellezést, illetve a kísérleti módszerek által nem vagy csak kevés esetben vizsgálható folyamatok „láthatóvá” tételét [8].

Saját kutatásaink elsősorban az ionbombázás által indukált határfelületi keveredés, illetve felületi durvulás vizsgálatára korlátozódnak [8]. Alapvető követelmény vékonyrétegek növesztésekor többreteges rendszerekben a határfelületi durvulás, illetve keveredés elkerülése. A Cu/Co-rendszerben például – amely széles körben használt mágneses multiréteg (pl. mágneses tárolók, merevlemez esetén) – már az egyébként gyengén keveredő Cu/Co határfelület is rontja a magnetoelektronikai sajátosságokat [7]. Sajnos e nemkívánatos folyamatok mechanizmusa nem kielégítően ismert. Így a legtöbb esetben az éles határfelületek előállítása gyakorlati tapasztalaton (receptúrákon) alapul. Nincs koherens magyarázat, amely leírná például az ionmegmunkálás hatására bekövetkező morfológia változásokat, illetve atomi transzportfolyamatokat. Reményeink szerint az MD-szimulációk hozzájárulhatnak az új atomisztikus szintű modellek kidolgozásához, és pontosabb leírást tesznek lehetővé, mint a rendelkezésre álló fenomenologikus modellek [4].

## A tömeganoizotrópia szerepe a keveredésben és felületi durvulásban

A gyakorlatban gyakran előforduló eset, hogy az anyagpárok például egy kettős vékonyrétegben különböző atomi tömegű anyagokból vannak összeállítva (*1. ábra*). Ha például Al-ot növesztünk Pt (111) felületére, tipikusan egy ilyen tömeganoizotróp-rendszert állítunk elő. Vizsgálataink azt mutatják, hogy az ilyen rendszerek eltérően viselkednek az olyan rendszerektől, amelyekben a tömegarány 1:1-hez közelít (pl. Ti/Co stb.).



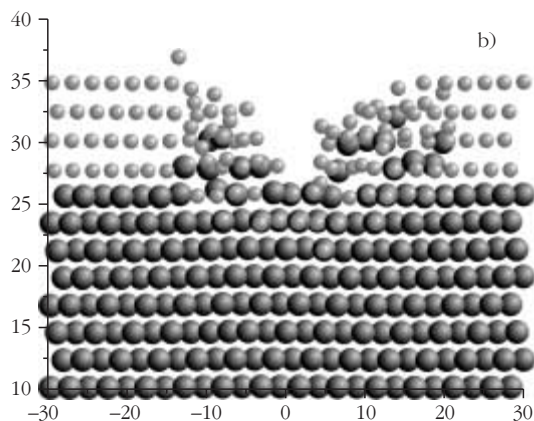
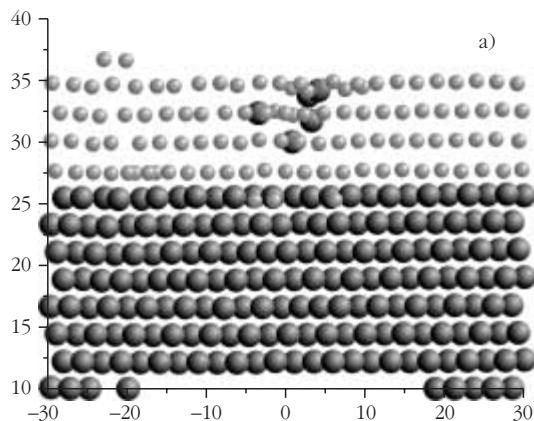
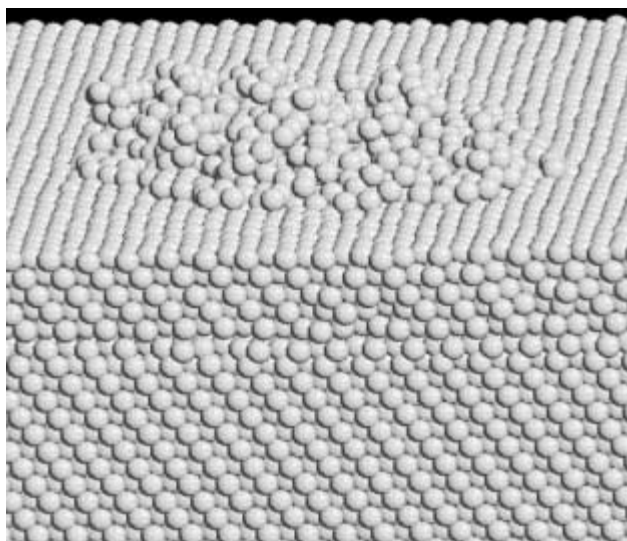
1. ábra. Egy tipikus tömeganisotróp biréteg, amely egy könnyű vékony felső rétegből és egy nehéz szubsztrátumból áll. Az ionporlasztás felülről történik, általában közel érintőleges szögbeesés mellett.

Ezt az eltérő viselkedést a legtöbb esetben kémiai okokkal magyarázzák. Számításaink azonban azt mutatják, hogy az eltérő viselkedés jól leírható egyszerűen csak a tömegarány függvényében. Továbbá nem találtunk függést a kémiai tulajdonságoktól, mint például az AB keresztpotenciáltól (keveredési hőtől) egy tetszőleges fém-fém AB binér rendszerben. Így arra az eredményre jutottunk, hogy az ionindukált határfelületi keveredés nem függ a kémiai tulajdonságoktól, és annak mértékét elsősorban az atomi tömegarány függvényében előálló ballisztika (az ütköző és szabadon mozgó részecskék dinamikája) határozza meg.

Továbbá a felületi durvulás tömegaránytól való függését találtuk még Ti/Pt-ban és Al/Pt-ban. Ez az alábbi ábrákon látható [9, 10]. A 2. ábrán ismételt (nagy dózisú) ionbombázással Ti/Pt-ban nanolyuk keletkezett. A kontrollszimulációban „elhangoltuk” a természetes tömegarányt közel 1:1 arányra, és a felső, a) ábrán ábrázoltuk az így kapott szimuláció eredményét. Látható, hogy határfelületi keveredés és felületi durvulás sem történik ez utóbbi esetben.

Hasonló a helyzet tiszta anyagok bombázásakor is, amelyekben néhány ion becsapódása nem eredményez jelentős morfológiai változást. A 3. ábrán Al/Pt birétegről készült számítógépes grafika látható 6 keV Xe<sup>+</sup>-ionbombázás után. Ebben az esetben a Pt-szubsztrát hatása különösen szembeszökő. Tiszta Al-hoz képest a szabad (111) felületre kilöködött Al-atomok (adatatomok) száma két nagyságrenddel nagyobb.

3. ábra. Al/Pt felülete 6 keV-os ionbombázás után.

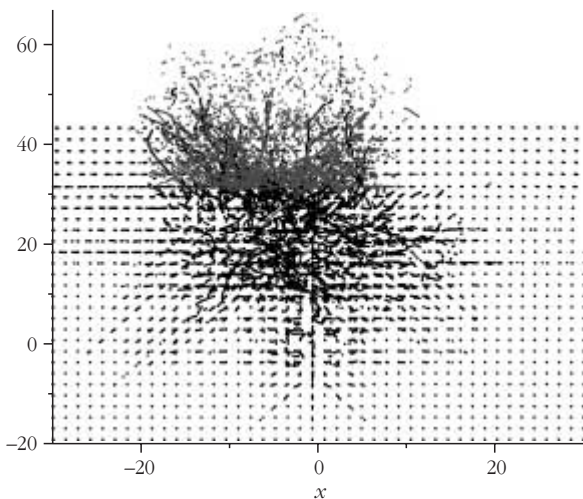


2. ábra. Ismételt, 1 keV-os energiájú Ar<sup>+</sup>-ionnal történő bombázás eredménye érintőleges szögbeesés mellett ( $\theta = 80^\circ$ ) Ti/Pt-ban keresztmetszeti ábrázolással. A felső ábrán (a) a tömegarány 1:1-re hangolt, míg az alsón (b) a természetes arányt (1/4) használtuk. A világosabb a Ti-atomokat, míg a sötétebb gömbök a szubsztrátatomokat (Pt) jelölik.

Az egyik esetben az ionindukált felületi durvulás (nanolyuk képződése), míg a másik esetben az inverz folyamat, a nanosziget fejlődése (adatomszám növekedése) mutat erős korrelációt a tömeganisotrópiával. A felületi durvulás „előjelét” (növekedés vagy lyukképződés) a keveredett határfelületi fázis sűrűsége fogja meghatározni. Látható, hogy a felületen és a határfelületen játszódó ionindukált transzportfolyamatok között erős csatolás van [9]. Megállapítható tehát, hogy a tömegarány megfelelő megválasztásával beállítható a kívánt szintű morfológiai változás ionbombázás során. A szimulációs eredmények kísérleti igazolása azonban még hátra van.

## A tömegeffektus értelmezése

Az ionbombázáskor bekövetkező atomi transzport gyors kaszkádszerű folyamatok kialakulásával jár. Ez a kaszkádperiódus rendkívül rövid, rendszerint 0,3 ps alatt lezajló ballisztikus folyamat. Vizsgálataink azt mutatják, hogy a kaszkád élettartama biréteges anyagokban tömegarányfüggő. Tömeganisotróp-rendszerekben egy relatíve hosszú és stabil olvadákalapot alakul ki,



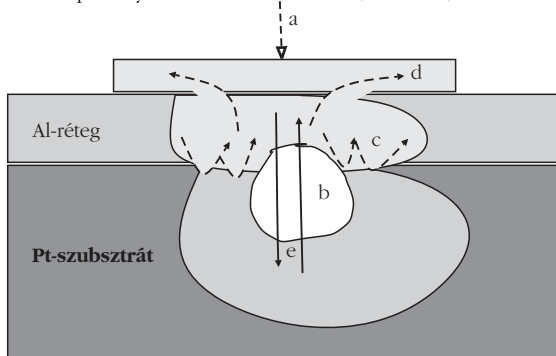
4. ábra. Kaszkádfolyamat Al/Pt birétegben 6 keV-os  $Ar^+$ -ionbombázás után néhány ps elteltével. Mélység irányú keresztmetszeti kép, amelyben a gyorsan mozgó részecskék keresztmetszeti pozícióit ábrázoltuk. A világosabb pontok az Al-atomokat, a sötétebbek a Pt-részecskéket jelölik.

amelynek élettartama akár 5–10 ps is lehet. A 4. ábra ilyen kaszkádszerű olvadékalapot kétdimenziós metszetét mutatja Al/Pt-rendszer esetén 6 keV-os energiájú ionbombázás hatására.

Látható, hogy a kaszkád két részre bomlik. Az interfész alatti részben csak Pt forró atomok találhatók, míg a könnyű Al-részecskék csak a határfelület fölött láthatók, ugyanis a könnyű Al-részecskék visszaverődnek a nehéz Pt-atomokról. Ez a szóródási folyamat a felelős aztán a felületi durvulásért és a tapasztalt tömegeffektusért. Az 5. ábrán vázolt egyszerűsített modellel értelmezhető a folyamat.

Látható, hogy birétegfilmekben az ionporlasztás (bombázás) egy sajátos szórási jelenséggel párosul. Egy erősen anizotróp kaszkád alakul ki, amelyben a „forró” könnyű részecskék mintegy bezárnak a felső rétegekbe. Ezáltal egy nagy energiasűrűségű zóna alakul ki, amelyben a lokális hőmérséklet bőven meghaladhatja az olvadásponti értéket. Kvázi plazmajellegű állapot alakulhat ki, amelynek következtében gyors részecskék lökődnek ki a felszínre (adatombok) és szigetnövekedés állhat elő. Gyakori esemény még a növekedés és a kráteresedés együttes

5. ábra. A határfelületen történő visszaverődési (szóródási) folyamat értelmezési sémája tömeganizotróp birétegekben. a) becsapódó ion, b) átmenetileg képződő vakanciafürt, c) a határfelületről visszaverődő könnyű (pl. Al) atomok, d) a felületre kilöködő atomok, e) az ellenáramú atomi transzportfolyamat a felület és a tömb (szubsztrát) között.



jelenléte, versengése. E folyamatok eredőjeként alakul ki a végleges morfológia. Közben a határfelület féligáteresztő diffúziós gátként viselkedik. Csak a nehéz részecskék mozoghatnak a felület irányába, míg a könnyű atomok visszaverődnek a határfelületen. Ezzel a határfelületi keveredés átmenetileg aszimmetrikussá válik. A plazma kihűlésével azonban a könnyű atomok is elkezdnek keveredni a bulk (szubsztrát) irányába (hideg keveredés), és egy amorf határfelületi fázis alakul ki. A visszaverődési folyamatban a határfelület fontosságát bizonyítja az, hogy az AlPt-ötvetetben nem tapasztaltunk hasonló folyamatokat, csak a szokványos rövid kaszkádszerű fázist. Attól függően, hogy mennyire erős a visszaverődési folyamat, akár robbanásszerű porlasztással járó folyamat is előállhat. Ebben az esetben egy krátereszerű képződmény marad a felületen.

A tömeganizotrópia eddig nem ismert vagy nem kellőképpen hangsúlyozott ionindukált transzportfolyamatokat eredményez. Érdemes felsorolni az irodalomban eddig ismert ionindukált felületi durvulási mechanizmusokat [8]. Ezek közül az első hipertermikus részecskék véletlenszerű porlasztásán alapul (legáltalánosabb mechanizmus). A második mechanizmus már csak viszonylag nagyobb ionenergiákon (>1 keV) jelentkezik abban az esetben, ha a kialakuló lokális olvadék kapcsolatba kerül a felszínrel. Ilyenkor számottevő mennyiségű olvadék fröccsenhet ki a szabad felszínre. Ez történhet robbanásszerű hevességgel is, ami kráterképződéshez vezet. Ez utóbbi esetben a porlasztott atomok száma nagy, míg az előző esetben a felszínre ballisztikus gyorsasággal ( $10^4$  m/s) kilöködő olvadék nagy része a tömb (bulk) kihűlésekor injektálódik a felszínről az anyag belsejébe. Nagyenergiás ionbombázáskor (>20 keV) atomi fűtők koherens elmozdulása is bekövetkezhet. Az általunk feltárt tömeganizotrópián alapuló durvulás nem sorolható be egyetlen eddig ismert mechanizmus közé sem, bár felmutatja azok jegyeit (pl. kráterképződés, olvadék kifröccsenés stb.). Reményeink szerint ez az új felismerés hozzájárulhat a mikroelektronikai ipar számára kedvezőbb tulajdonságú vékonyrétegek előállításához.

## Irodalom

1. S. FACSÓ, T. DEKORSY, C. KOERDT, C. TRAPPE, A. VOGT – Science 285 (1999) 1551
2. U. VALBUSA, C. BORAGNO, F. BAUTIER DE MONGEOT – J. Phys. Condens. Matter 14 (2002) 8153
3. T. MICHELY, J. KRUG: *Islands, Mounds and Atoms* – Springer, 2004.
4. A.-L. BARABÁSI, H.E. STANLEY: *Fractal Concepts in Surface Growth* – Cambridge, 1995.
5. F. MONTALENTI, A.F. VOTER – Phys. Rev. B64 (2001) 081401-1
6. M.P. ALLEN, D.J. TILDESLEY: *Computer Simulation of Liquids* – Clarendon Press, Oxford, 1989.
7. H.N.G. WADLEY, X. ZHOU, R.A. JOHNSON, M. NEUROCK – Prog. in Mater. Science 46 (2001) 329
8. R.S. AVERBACK, T. DIAZ DE LA RUBIA – Solid State Phys. 51 (1998) 281
9. P. SÜLE, M. MENYHÁRD, K. NORDLUND: *Nucl. Instrum., Cooperative mixing induced surface roughening in bilayer metals: a possible novel surface damage mechanism* – Meth. in Phys Res. B222 (2004) 525, *What is the real driving force of ion beam mixing?* – ibid. B226 (2004) 517
10. P. SÜLE, M. MENYHÁRD: *Strong mass effect on ion beam mixing in metal bilayers: a ballistic picture* – Phys. Rev. B71 (2005) 113413  
P. SÜLE: *Substrate induced enhancement of atomic layer growth on Al(111): the effect of the mass anisotropy* – Surf. Science 585 (2005) 170–176, további info: [www.mfa.kfki.hu/~sule](http://www.mfa.kfki.hu/~sule)

# INKRUSZTÁLT RÉGÉSZETI KERÁMIÁK VIZSGÁLATA MIKRO-IONNYALÁBOS MÓDSZEREKKEL

Sziki Gusztáv Áron  
MTA ATOMKI

A Magyar Tudományos Akadémia Atommagkutató Intézetében található Van de Graaff típusú részecskegyorsítón 1996 óta üzemelő nukleáris mikroszondával számos interdiszciplináris tudományterületen végzünk kutatásokat. A berendezés telepítése óta eltelt tíz évben geológiai [1], biológiai [2], anyagtudományi [3], régészeti [4] és aeroszolkutatási [5] témákban folytak vizsgálatok.

A nukleáris mikroszonda – amely elvi működése alapján ionmikroszkópnak tekinthető – néhány mikrométer átmérőjűre fókuszált töltött részecske-nyalábbal pásztázza a céltárgy felületét. A töltött részecskék és a minta atommagjai vagy az azokat körülvevő atomi elektronok között létrejövő kölcsönhatások során töltött részecskék, gamma- és röntgensugárzás hagyják el a mintát. Az említett részecskéket vagy sugárzásokat detektálva lehetőség nyílik a céltárgy elemi (magreakciók esetén esetlegesen izotópos) összetételének meghatározására. A pásztázás segítségével további információt nyerünk a vizsgált elemek laterális eloszlására vonatkozóan. A különböző analitikai technikákat általában a bombázó részecske és a detektált sugárzás/részecske fajtája szerint csoportosítják. Az alábbiakban ismertetett vizsgálatoknál a széles rendszám-tartomány ( $6 \leq Z \leq 92$ ) analízisére alkalmas protonindukált röntgenemissziós (PIXE) és a könnyű elemekre igen érzékeny deutronindukált gamma-emissziós (DIGE) módszereket alkalmaztuk.

A továbbiakban a nukleáris mikroszonda széleskörű alkalmazásainak egy szeletként a Magyar Nemzeti Múzeummal közös régészeti tárgyú vizsgálatok kerülnek ismertetésre, melyek tárgyát Magyarország területén feltárt inkrusztált kerámiák képezik.

## Az inkrusztáció mint díszítési eljárás

Az inkrusztáció olyan speciális eljárás, amelynek segítségével finoman díszített kerámiaedények készíthetők. A folyamat során az agyagedény felületéből finom mintákat metszenek ki, amelyekbe valamilyen fehér vagy színezett anyagot préselnek. Az agyagedény kiégetése után az így elkészített díszítések szilárdak, tartósak és igen dekoratívak lesznek (1. ábra).

Ezt a díszítési módot az őskor különböző időszakaiban, Magyarországon számos eltérő területen alkalmazták. Bizonyos kultúrákban, mint például a középső neolitikus Bükk-kultúra [6], vagy a középső bronzkori Mészbetétes edények népe [7] (amely nevét is az eljárás után kapta), a technikát nagyon széles körben használták, de használata ritkábban más kultúrákban is megjelenik [8, 9].

**inkrusztáció** lat 1. nemes anyagból készült berakásos díszítés (bútor, falborítás, ajtó stb.) felületén 2. tud kéregképződés, vmire ráakódott kéreg (Bakos Ferenc: *Idegen szavak és kifejezések szótára* – Akadémiai Kiadó, Budapest, 1983., 371. oldal)

A nukleáris mikroszondán elvégzett vizsgálatok közvetlen célja a díszítések összetételének meghatározása volt. Emellett a felvett elemeloszlási térképek további, a díszítések szerkezetére vonatkozó információval szolgáltak. Az adatokból a különböző kultúrákban a díszítések elkészítéséhez használt anyagokra, eljárásokra következtethetünk.

## Az inkrusztáció vizsgálata mikro-PIXE módszerrel

Az együttműködés keretében 20 darab régészeti kerámián végeztünk mikro-PIXE mérések. A 2. ábra a kerámiák magyarországi lelőhelyeit mutatja. Az 1. táblázatban látható a kerámiák lelőhelye és kora.

Méréseket végeztünk a kerámiák díszítéseiben, valamint az előlapok nem díszített részén és a hátlapokon. A különböző tartományokon mért elemkoncentrációkat összevetve eldönthető, hogy a díszítésekben kimutatott valamely elem a talajból felvett szennyező-e, vagy ténylegesen jelen van-e az inkrusztáció anyagában. Az inkrusztáció anyaga, és bizonyos esetekben a kerámiák alapanyaga is erősen heterogén, így egy-egy tartományon több mérést is végeztünk. A nyert elemi koncentrációkból számolható az elemek oxidos koncentrációja; az adatokat ebben a formában közlöm.

A 3. ábra az egyes mintaszámokhoz (1. táblázat) tartozó, a kerámiaminták előlapjain (nem díszített rész), hátlapjain és a díszítéseiben mért oxidos koncentrációkat mutatja néhány, a vizsgálatok szempontjából érdekes elemre. Az elemek kiválasztása a következő szempontok szerint történt:

- Ezen elemek mennyisége a díszítésekben szoros kapcsolatban van a kerámia lelőhelyével (így az ottani korabeli kultúrával), míg a többi elemnél a kerámia lelőhelye és az elemnek vagy oxidjának díszítésekben mért koncentrációja között nem volt kapcsolat.
- Régészeti feltételezés szerint bizonyos kerámiák díszítései csontot tartalmaznak. Ezt a feltevést igazolandó

1. ábra. Óskori mészbetétes kerámiaedény reprodukciója





2. ábra. A vizsgált kerámiák magyarországi lelőhelyei

vagy cáfolandó vizsgáltuk kalcium- és foszfortartalmukat. (A friss, nyers csont alapvetően egy ásványi (70–80 súly%) és egy szerves (20–30 súly%) összetevőből áll. Az ásványi összetevő túlnyomó része karbonát-hidroxi-apatit ( $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_{6-x}(\text{CO}_3)(\text{OH})_{2+x}$ ), míg a szerves összetevő kollagén.

• A szilícium és alumínium – szilícium-dioxid ( $\text{SiO}_2$ ) és alumínium-oxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) formájában – a kerámiákban fő-összetevők, így e két elem mennyisége és eloszlása alapvetően jól tükrözi a kerámiák és díszítéseik szerkezetét.

A 4. ábra elemtérképeket mutat különböző lelőhelyeken feltárt kerámiákra.

Az ábrákon feltüntetett elemek oxidjainak díszítésekben mért koncentrációja és a kerámiák lelőhelye között szoros kapcsolat van, így az eredményeket lelőhely szerint csoportosítva ismertetem.

**Kup és Vörs-Máriaasszonysziget:** A 9–11., 15., 16. minták díszítéseinek magas kalcium-oxid- és foszfát-tartalma van (15–60 súly% és 10–30 súly%), amíg ugyanezen összetevők a minták elő- és hátlapjaiban csak elhanyagolható mennyiségben mutathatók ki (3. ábra). A 4. ábrán, a 16. mintához tartozó kalcium és foszfor elemtérképeken jól látható, hogy ezen elemek a díszítések ugyanazon részein összpontosulnak apró csomókat formázva. A 9–11., 15. minták díszítéseinek mindegyikét a 16.-hoz hasonló kalcium- és foszforeloszlás jellemzi, így megállapíthatjuk, hogy a Vörs-Máriaasszonyszigetről származó

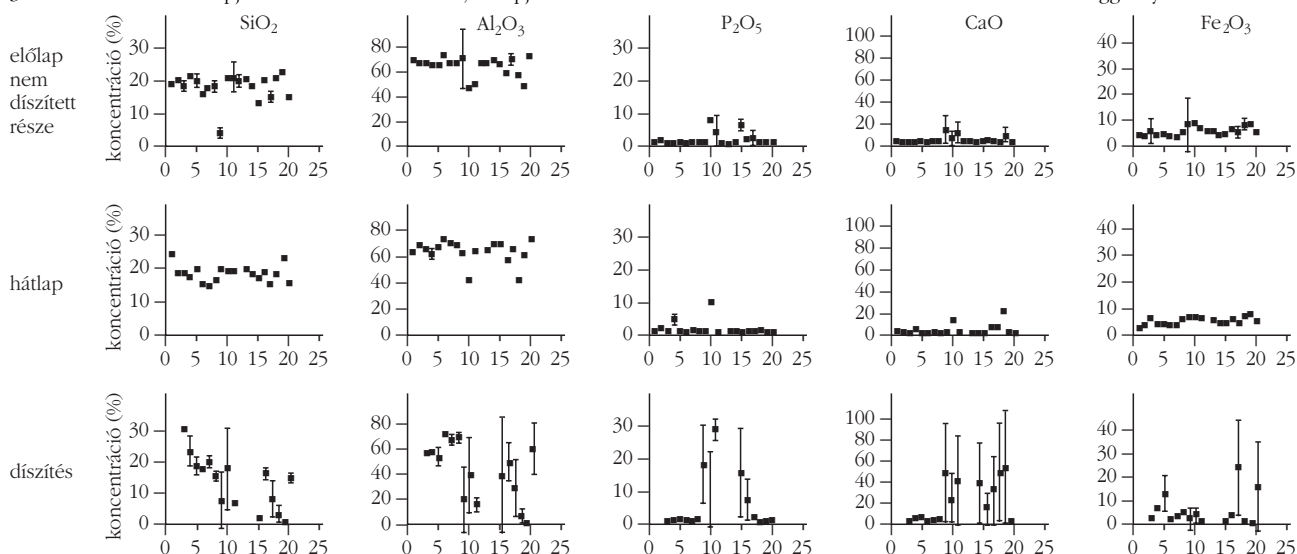
1. táblázat		
A vizsgált kerámiák lelőhelye és kora		
mintaszám	lelőhely	kor
1–8., 17., 20.	Baradla-barlang	középső neolitikum (ie. 5500–4500, Bükki kultúra)
9.	Kup	korai vaskor (ie. 800–600)
10–16.	Vörs-Máriaasszonysziget	késő rézkor (ie. 3500 – 3. évezred eleje, Kostolaci kultúra) és korai bronzkor (ie. 3. évezred eleje – ie. 2000, Kisapostag-kultúra)
18., 19.	Balatonfűzfő és Papkeszi	középső bronzkor (ie. 2000–1500, Mészbetétes edények kultúrája)

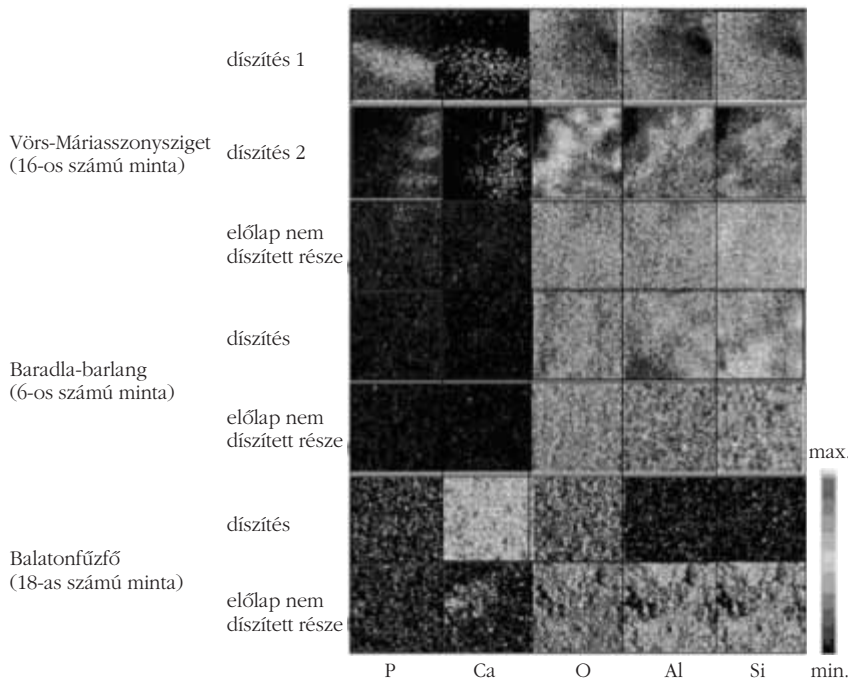
minták díszítéseinek belsejében apró (10–100  $\mu\text{m}$  méretű), magas kalcium- és foszfortartalmú szemcsék találhatók. Ez a tapasztalat megerősíti azon régészeti feltevést, miszerint a Vörs-Máriaasszonyszigetről származó kerámiák díszítései csontörlemény tartalmaznak.

**Balatonfűzfő és Papkeszi:** A 18. és 19. minták esetében a díszítések színe hófehér, és igen magas (50%) kalcium-oxid-tartalmuk van. Foszfor ezekben nem mutatható ki, így összetételük eltér a Vörs-Máriaasszonyszigetről származó kerámiák díszítéseinek összetételétől. A 3. ábra példaként a 18-as számú mintán felvett elemtérképeket mutat.

**Baradla-barlang:** A 3–8., 17., 20. kerámiák díszítései alacsony foszfor- és kalciumtartalmúak (kivéve a 17-es számú mintát, amelynek viszonylag magas kalciumtartalma van). Ezen díszítések szilícium-dioxid- és alumínium-oxid-tartalma jó közelítéssel megegyezik a kerámiák alapanyagáéval, ahogy a 3. ábrán látható. A magas alumínium-oxid- (60–70%) és szilícium-dioxid- (15–30%) tartalom azt mutatja, hogy ezen díszítések alapanyaga túlnyomó részben kaolin (alumínium-szilikát) és kvarc. A 17-es és 20-as számú minták díszítései – eltérően a többi

3. ábra. A kerámiák előlapjainak nem díszített részein, hátlapjaikon és díszítéseiken mért oxidos koncentrációk a mintaszámok függvényében ábrázolva.





4. ábra. Kerámiaminták dísztésein és előlapjaik nem dísztett részén felvett elemterképek (pász-  
tázott terület nagysága dísztéseken  $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ , nem dísztett részeken  $1000 \times 1000 \mu\text{m}^2$ )

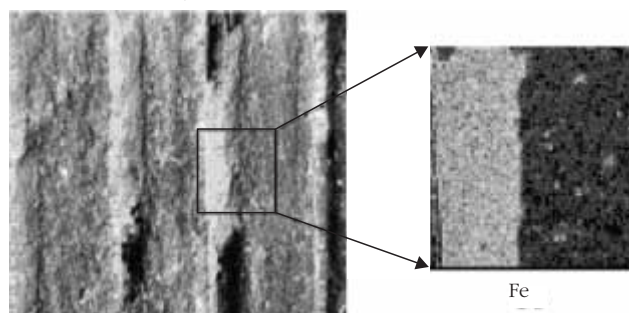
mintától – vörös színűek és magas vas-oxid- (hematit) tartalmuk van (~20%). A vörös szín oka feltételezésünk szerint a hematit. Az 5. ábrán egy, a 20-as számú minta felületéről készített optikai felvétel és a minta felületén felvett vas elemterkép látható.

## Kiegészítő mérések a dísztéseken $\mu$ -DIGE módszerrel

Egy Vörs-Máriasszonyszigetről származó kerámia esetében (16. minta), a  $\mu$ -PIXE mérések kiegészítéseként, a kerámia dísztésein  $\mu$ -DIGE mérések is történtek. A mérések célja annak a régészeti feltevésnek a megerősítése volt, hogy a Vörs-Máriasszonyszigetről származó kerámiák dísztései csontörleményt tartalmaznak.

Mint fentebb szerepelt, a friss, nyers csont ~30 súly%-át egy speciális fehérje, a kollagén alkotja. A csont e szerves alkotója szenet, nitrogén és oxigént főösszetevőként tartalmaz. Habár ennek a szerves alkotórésznek az aránya a csontokban az élőlény halála után idővel csökken, bizonyos mennyiség akár több ezer év elteltével is jelen lehet

5. ábra. A 20-as számú kerámia felületéről készített optikai felvétel és a minta felületén, a kijelölt négyzetten felvett vas elemterkép.



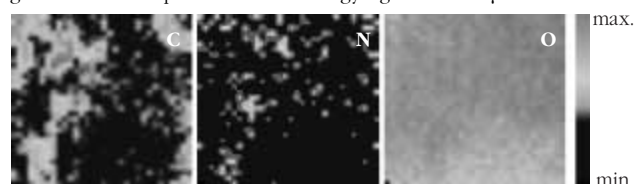
[10]. Reich és munkatársai [10] Párizs keleti részén feltárt körülbelül 6000 éves állati csontokat tanulmányoztak. Vizsgálataikból kitűnik, hogy a csontok talajjal érintkező részei kevesebb, míg belső, épen maradt részük több kollagént tartalmaz. Emellett a kollagéntartalom erősen függ a csontot a talajban körülvevő kémiai és biológiai környezettől. A fenti tényezőktől függően a csontleletek kollagéntartalma változik. Reichék a kollagéntartalommal szoros összefüggésben lévő nitrogéntartalomról szólnak, amelynek értéke az általuk vizsgált körülbelül 6000 éves őskori csontokban 0,2 és 3,5 súly% között változott. Természetesen oxigént és szenet – a karbonát-hidroxil-apatit elemi összetételéből adódóan – nemcsak a fenti szerves alkotórész, hanem a csont ásványi összetevője is tartalmaz. Az elmondottak alapján feltételezhető, hogy a szén, nitrogén és oxigén elemek felhasználhatók a csontörlemény kimutatására őskori kerámiákban. Valójában – mivel a dísztések egyéb összetevői ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) szintén nagy mennyiségben tartalmaznak oxigént – erre a célra csak a szén és a nitrogén használható. A 6. ábra szén, nitrogén és oxigén elemterképeket mutat, a 16-os minta egyik dísztésében.

Az ábrán látható, hogy a dísztésekben a szén és nitrogén ugyanazon helyekre összpontosul, apró csomókat formázva. Ez nagyon hasonló a kalcium és foszfor esetében ugyanennek a mintának mikro-PIXE-vizsgálatánál tapasztaltakhoz.

Méréstechnikai okok miatt egy dísztés ugyanazon tartományáról nem tudunk egyszerre szén, nitrogén, kalcium és foszfor elemterképet felvenni (mivel nem tudunk egy időben PIXE- és DIGE-méréseket végezni). Így nem jelenthető ki egyértelműen, hogy ezek az elemek a dísztések ugyanazon részein összpontosulnak. Mindazonáltal a szén-nitrogén és foszfor-kalcium csomók együttes észlelése a dísztésekben tovább erősíti a feltevést, hogy a Vörs-Máriasszonyszigetről származó kerámiák dísztései csontörleményt tartalmaznak.

Összefoglalva elmondhatjuk, hogy a  $\mu$ -PIXE és  $\mu$ -DIGE módszerek hatékony analitikai eszközök a kerámiadísztések összetétel- és szerkezetvizsgálatához. A vizsgált kerámiák dísztéseik összetétele alapján három csoportba sorolhatók, mely csoportok jellemzőek a helyi őskori kultúrára.

6. ábra. A 16-os minta egyik dísztésén felvett szén-, nitrogén- és oxigéneloszlások. A pásztázott terület nagysága  $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ .



Végezetül remélem, hogy e példa betekintést nyújt a mikro-ionnyalábos analitikai módszerek sokrétű felhasználásába, napjainkban szemléltetve azok szerepét.

#### Irodalom

1. I. UZONYI, GY. SZÖÖR, B. VEKEMANS, L. VINCZE, P. RÓZSA, GY. SZABÓ, A. SOMOGYI, F. ADAMS, Á.Z. KISS – Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy 59/10–11 (2004) 1717–1723
2. ZS. KERTÉSZ, Z. SZIKSZAI, E. GONTIER, P. MORETTO, J.-E. SURLÈVE-BAZELLE, B. KISS, I. JUHÁSZ, J. HUNYADI, Á.Z. KISS: Nuclear microprobe study of  $TiO_2$ -penetration in the epidermis of human skin xenografts – Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B 231/1–4 (2005) 280–285
3. A. SIMON, G. KALINKA: Investigation of charge collection in a silicon PIN photodiode – Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B 231 (2005) 507
4. I. UZONYI, R. BUGOI, A. SASIANU, Á.Z. KISS, B. CONSTANTINESCU, M. TORBÁGYI – Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B 161–163 (2000) 748–752
5. ZS. KERTÉSZ, I. BORBÉLY-KISS, I. RAJTA, I. UZONYI, Á.Z. KISS – Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B 161–163 (2000) 808–813
6. J. KOREK, P.A. PATAY: Bükki kultúra elterjedése Magyarországon (Die Verbreitung der Bükker Kultur in Ungarn) – Rég. Füz. Ser. II (1958) 2
7. G. BÁNDI: Adatok a mészbetétes edények népe É-dunántúli csoportjának történetéhez – A Janus Pannonius Múzeum Évkönyve, 1967.
8. M. WOSINSKY: Az őskor mészbetétes díszítésű agyagművészete – Budapest, 1904.
9. N. KALICZ, J. MAKKAY: Die Linenbandkeramik in der groben Ungarischen Tiefebene – Budapest, 1977.
10. I. REICHE, L. FAVRE-QUATTROPANI, C. VIGNAUD, H. BOCHERENS, L. CHARLET, M. MENU – Meas. Sci. Technol. 14 (2003) 1608

# MÁGNESES INGÁK KÍSÉRLETI TANULMÁNYOZÁSA

## Kaotikussá váló mechanikai síkmozgás egy példája

Bíró István

Bolyai Farkas Elméleti Líceum, Marosvásárhely  
Babeş–Bolyai Tudományegyetem, Kolozsvár

A kaotikus mozgás lehetőségét először *Henri Poincaré* fogalmazta meg, míg a sűrűdásos rendszerbeli kaotikus attraktorhoz kapcsolódó viselkedést először *Edward N. Lorenz* meteorológus írta le [1, 2]. Arra a kérdésre, hogy mi is a káosz, a következő választ adhatjuk: a káosz nem rendetlenség, hanem egy mozgástípus, egyszerű rendszerek bonyolult időbeli viselkedése [3]. Míg a szabályos mozgást a periodikusság vagy ismétlődő jelleg, előrejelezhetőség (hosszú távon) jellemzi, a kaotikus mozgásra a szabálytalanság, előrejelezhetetlenség jellemző [4].

Ennek kimutatására vizsgáltam lézerdíóda és fotópapír segítségével egy erősen nemlineáris rendszert, a mágneses kaotikus ingát. Kísérletileg megvizsgáltam az inga kváziperiodikus és kaotikus viselkedését is, majd eredményeimet számítógépes szimulációval ellenőriztem.

### A rendszer leírása

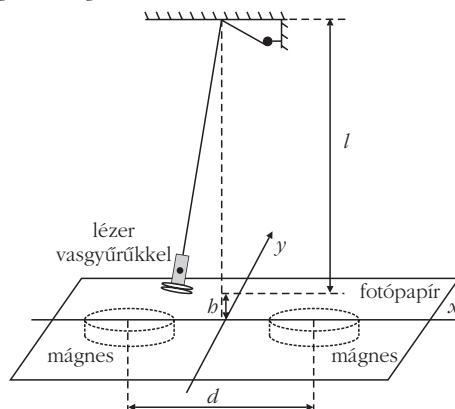
Közismert a matematikai ingát megközelítő fonálinga periodikus mozgása, amelynek periódusa csak a szál hosszától és a gravitációs gyorsulástól függ. Készítsünk most egy vastesttel rendelkező, hosszú szálú fonálingát, és tegyünk alá két mágneset úgy, hogy ezek közel legyenek a vasdarabhoz, de ne érhessenek hozzá [5], és középpontjaik egymástól  $d$  távolságra legyenek, valamint az inga nyugalmi helyzetben éppen a  $d$  távolság felénél legyen, a két mágnes között (1. ábra)!

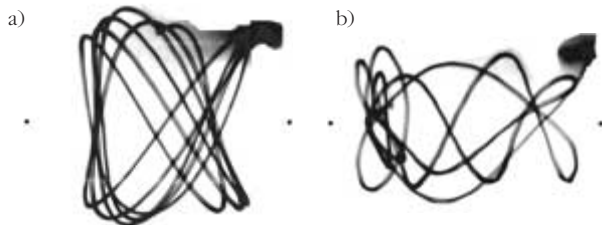
A mágnesek hatása miatt ingánk szabad lengései inkább el fognak térni a fonálinga mozgásától [6] minél közelebb van a két mágnes a vastesthez. Meglepő azonban az a tény, hogy ha a kis testet egy kritikus távolságnál közelebb helyezzük a mágnesek síkjához, azonos kezdeti feltételek ellenére a rezgések időbeli lefolyása

különböző, sőt a távolságot tovább csökkentve végül teljesen össze-vissza fog lengeni a test. Azonos kezdeti feltételek alatt természetesen csak közel azonosakat értünk, mivel egy indítás feltételeit sosem lehet teljesen pontosan megismételni a berendezés pontatlansága miatt. (A jelen esetben két azonosnak mondott, egymás utáni indítás koordinátáinak egymástól legfeljebb  $\pm 1$  mm-rel való eltérését jelentheti.) A jelenség magyarázata a következő. A mágnesek annál erősebben vonzzák a vastestet, minél közelebb találhatók hozzá. A fellépő vonzóerők a vas és mágnes közti távolságtól nemlineárisan függenek. Az ilyen rendszereket adott kezdeti állapottól indítva, azonos időintervallumok eltelte után, erősen eltérő végállapotokban találjuk, ugyanis a parányi kezdeti feltételkülönbségek a mozgás során hamar és nagymértékben elhatalmasodnak.

Megjegyzem, hogy míg a hárommágneses inga ismert, tanulmányozott modell [7], a kétmágneses ingát még nem

1. ábra. Mágneses kaotikus inga mérési elrendezése:  $l = 2$  m,  $d = 0,14$  m, a mágnesek sugara 2,5 cm.





2. ábra. Két jellegzetes pálya képe: a) az ingatest magasabban van a mágnesek felett,  $b = 2,1$  cm; b) az ingatest közel van a mágnesekhez  $b = 1,45$  cm.

tanulmányozták az általam ismert irodalomban, továbbá az alábbiakban leírt mérési módszer sem szerepel a szakirodalomban.

A fonal hosszát kísérleteim során változtattam, s ezzel az 1. ábrán  $b$ -val jelölt távolságot is: ez a nyugalomban levő inga és a fotópapír közti távolság. Minél kisebb  $b$  értéke (a lézer és a rajta levő vasgyűrűk közel vannak a laphoz és ezzel a mágnesekhez is), annál inkább erősödik a mágnesek hatása az ingára. Egy bizonyos  $b$  értéknél kisebb értékeknél az ingának két nyugalmi helyzete következik be(!): majdnem a két mágnes felett. ( $b$  nagyobb értékeire egy nyugalmi helyzet áll be: a mágnesek között). Kísérleteim során  $b$  sokkal kisebb, mint  $l$ , ezért  $l \approx 2$  m, a kitérések pedig ehhez képest igen kicsik. Ennek megfelelően mágnesek nélkül az inga lengéseinek frekvenciája  $(g/D)^{1/2}(2\pi)^{-1} \approx 0,35$  rezgés/s értékű.

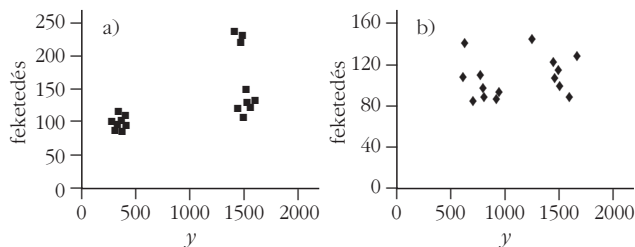
Az inga pályájának kirajzolásához a kísérletek alatt lesötétítettem a szobát, és fotópapírt helyeztem a mágnesek fölé. Az inga fonálára erősített testként pedig egy lézert használtam, melyre vasgyűrűket húztam. A lézert bekapcsolva és elengedve a már kitérített ingát, a lézersugár „rárajzolja” a fotópapírra az inga pályáját, a feketedés pedig a sebességről ad értékes információt. Az ingatest „elengedése” az azt tartó cérnaszál elégetésével történt, s így valamennyi mozgást kezdősebesség nélkül, közel azonos koordinátákról indíthattam.

Egy idő után, vagy a lengő lézer egyik mágnes fölött bekövetkező megállása után letakartam a fotópapírt, és előhívtam a képet. A 2.a és a 2.b ábrán két jellegzetes pályát láthatunk.

## Eredmények

Kváziperiodikusnak nevezzük az ingának azt a fajta mozgását, mely során az inga mozgásában, pályájában nem történnek hirtelen erős változások, azaz az inga mozgása során hasonló jellegű görbék felett mozog, melyek csak kicsit tolódnak el egymáshoz viszonyítva. Meg kell jegyezni, hogy a dolgozatomban kváziperiodikusnak nevezett mozgások a légellenállás miatt lényegében nem teljesen kváziperiodikusak. A kváziperiodikus elnevezés használatát ezekre a mozgásokra egyrészt az egyszerűsítő jellegükkel, másrészt pedig azzal indokolom, hogy a kváziperiodikusnak nevezett mozgások esetén viszonylag rövidnek tekintem a megfigyelés idejét, és ekkor a légellenállás hatása nem túl erős.

Kaotikusnak nevezzük az ingának azt a fajta mozgását, mely során az inga mozgásában (pályájában) hirtelen vál-



3. ábra. a) a 2.a ábrán látható kváziperiodikus mozgás pályája alapján készített Poincaré-diagram (a feketedésértékek az  $y$  koordináták szerint ábrázolva a visszatérési pontokban). b) a 2.b ábrán látható kaotikus pályagörbe alapján készített Poincaré-diagram.

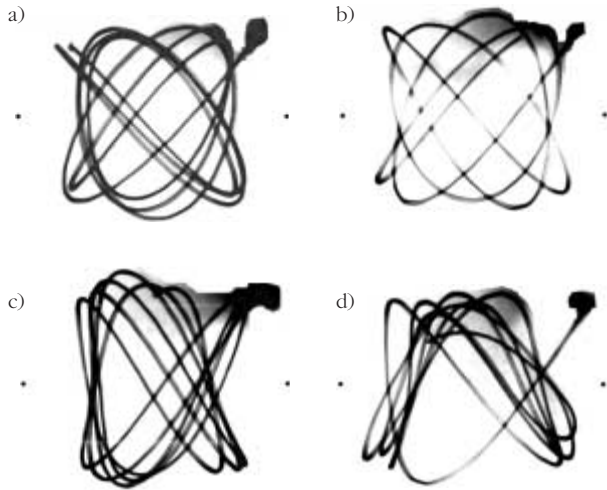
tozások következnek be, és az egyes pályaszakaszok nem ismétlődnek. Az ilyen kaotikus mozgás végtelen sok ideig tart, ha nincs közegellenállási erő vagy valamely külső kényszer, amelyek az ingát megállásra vagy periodikus mozgás követésére készíti. A valóságban fellépő súrlódás miatt azonban tranziens (véges ideig tartó) káoszról beszélünk, azt a pontot pedig, amelyhez a külső kényszer miatt az inga tart, egyszerű attraktornak nevezzük [3].

Az említett fényképeket szkennelre számítógépre vittem, és egy programmal egyes megjelölt kis pontok feketedését mértem. Ekkor a pályagörbe egyes pontjainak a lézer okozta feketedése egyenlő az illető pont és a háttér feketedését jellemző érték különbségével. Nyilvánvaló, hogy a lézer okozta feketedést jellemző érték fordítottan arányos az inga sebességének abszolút értékével az adott pontban. Az inga impulzusa pedig egyenesen arányos az inga sebességével. Ha az inga impulzusát ábrázoljuk a helykoordináta függvényében, fázistér-diagramot kapunk, ez pedig visszavezethető a feketedés  $(x, y)$  koordinátáinak függvényében való ábrázolására. Kaotikus viselkedésű rendszerek ábrázolására nem a legalkalmasabbak a hagyományos kitérés-idő és sebesség-idő grafikonok. Ezek helyett sokkal célszerűbb kitérés-sebesség grafikonnal dolgozni. Ezek a hely- és sebességváltozók definiálják a fázistér (egydimenziós esetben ez az  $(x, v)$  sík lenne).

Fázisdiagramunk azonban ebben az esetben négydimenziós lenne. Ezért a Poincaré-diagramot [3, 8] használjuk, amely a fázistér egyféle metszete, és amely alatt egy rendszer impulzusának ábrázolását értjük a koordinátái függvényében, egy meghatározott feltétel bekövetkezéséig. Nevezzük visszatérési pontnak azt a pontot, amelyhez húzott érintő párhuzamos az  $x$  tengellyel! Itt a sebesség  $y$  irányú komponense éppen nulla, tehát csak az  $x$  irányú sebességkomponens okozza a feketedést. Vizsgáljuk tehát és ábrázoljuk az inga pályájának visszatérési pontjaiban az inga impulzusát (amely a fentiek szerint fordítottan arányos a feketedés mértékével:  $p \sim 1/\text{feketedés}$ ) tetszőleges léptékű grafikonon az  $y$  koordináta függvényében! Ekkor Poincaré-diagramot kapunk. Az  $y$  koordinátához tartozó (programmal meghatározott) feketedésértékeket a 2.a ábrán ábrázoltam kváziperiodikus mozgás esetében. A megfelelő Poincaré-diagram a 3.a ábrán látható.

A 3.a ábrán levő grafikonon látható, hogy egyes pontcsoportok egy-egy pont körül sűrűsödnek. Ennek az a magyarázata, hogy kváziperiodikus mozgás esetén az inga pályája csak kis eltolódást szenved, tehát az egyes





4. ábra. Kváziperiodikus pályák fényképei. A mágnesek középpontját fekete pontokkal jelöltem (a mágnesek sugara 2,5 cm). Az inga indításának koordinátái:  $(x, y) = (5,5 \text{ cm}, 4 \text{ cm})$ . a)  $b = 2,55 \text{ cm}$ , b)  $b = 2,4 \text{ cm}$ , c)  $b = 2 \text{ cm}$ , d)  $b = 1,8 \text{ cm}$ .

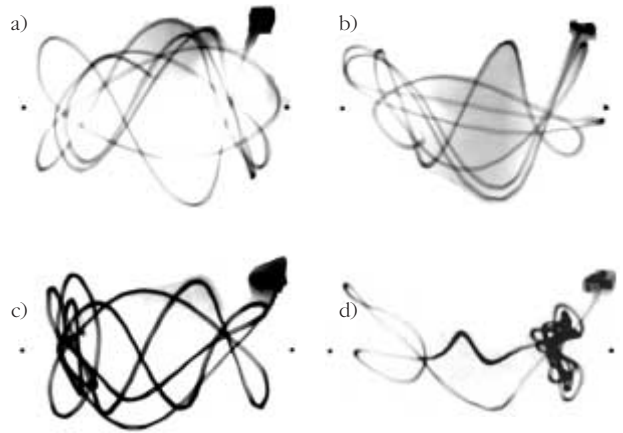
görberészek (egy keringésnek megfelelő görbék) csak kissé tolódnak el, gyakran egybe is esnek egy-egy szakaszon, és sebességeik sem különböznek erősen.

Ugyanígy megvizsgáltam a kaotikus mozgást mutató 2.b ábra pályáját. A megfelelő Poincaré-diagram a 3.b ábrán látható. A grafikon alsó részén levő pontcsoportok sokkal szétszórtabbak, mint a 3.a ábrán látható pontcsoportok. Ezek a mozgás előrejelezhetetlenségét, hirtelen, nem várt változást fejeznek ki.

## További pályák és a mozgás függése az inga–mágnes távolságtól

Most tekintsük és értelmezzük *A rendszer leírása* című részben leírt módon, a fotópapír segítségével készített képeket! A következő képeken megfigyelhetjük, milyen mozgást végez az inga a  $b$  magasság egyes értékei esetén. A mágnesek középpontját a fotópapíron egy-egy fekete ponttal jelöltem meg (ezeket, mivel a kísérlet teljes sötétségbe kell végezni, a kísérlet során a mágnesek középpontjába elhelyezett, picit kiálló tűkkel tudtam rögzíteni).

Megfigyelhető, hogy a 4. ábrán látható pályák (4.a–d) kváziperiodikusak. Ekkor az egyes pályaszakaszok nagyon hasonlítanak egymáshoz, csupán kissé eltolódnak egymáshoz képest. A 4.a és 4.b ábrán látható pályák  $b$  nagyobb értékeire is hasonlóak. Léteznek igen jellegzetes alakú pályák, melyek  $b$  jól meghatározott értékeire alakulnak ki. Ezekhez nagyon közel állnak a 4.c és 4.d ábrán látható pályák. Az egyes ábrákon látható pályák indításánál csupán a  $b$  magasságértékét változtattam.  $b$  csökkentésével a mozgás azonban hamarosan kezd nem reprodukálhatóvá, majd teljesen kaotikussá válik (5.a–d ábra). Az egyes pályaszakaszok már nem ismétlik egymást, az ingának pedig már két stabil fixpontja van a mágnesek fölött, és az origó instabillá vált. Ekkor a pályát követve gyakran nem várt változásokra, hirtelen áttörésekre találunk. Két közel azonos indítású pálya kezdetben hasonló, majd egyre in-



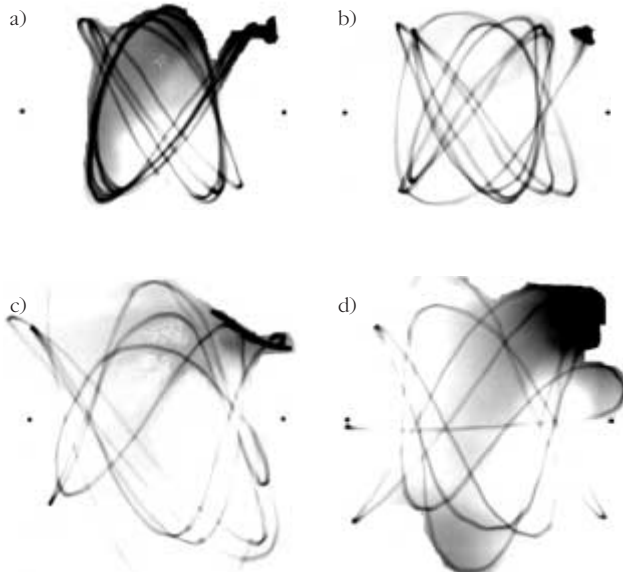
5. ábra. Kaotikus pályák, az indítás feltételei ugyanazok, mint a 4. ábra esetén, csupán a  $b$  magasság értékét változtattam: a)  $b = 1,7 \text{ cm}$ , b)  $b$  közelítőleg  $1,7 \text{ cm}$ , mint az a) esetben. Látszik, hogy a pályák eleje hasonló, majd hamar teljesen különbözővé válik. c)  $b = 1,45 \text{ cm}$ , d)  $b = 1,25 \text{ cm}$ .

kább különbözik egymástól (5.a és 5.b ábra). Ennek oka, hogy a mozgás kaotikus, és az indítási feltételek azonosságát nem lehet végtelen pontossággal beállítani. Márpedig a kaotikus mozgás pályái igen érzékenyek a kezdőfeltételekre.  $b = 1,25 \text{ cm}$ -nél kisebb magasságértékek esetén már annyira erős a mágnesek hatása, hogy elengedés vagy 1–2 lengés után az inga nem tud elmozdulni már az egyik mágnes fölül.

Az állandósult káosz megfigyelése érdekében gerjesztjük az ingát (6. ábra). A gerjesztést egy kis motor segítségével oldottam meg, amely egy kar segítségével periodikusan lengetett egy műanyaglapot a hosszára merőleges tengelye körül, azaz az  $y$  tengely körül (hasonlóan egy mérleghintához).

A gerjesztő mozgás frekvenciája nagyságrendben megegyezett a kváziperiodikus mozgás frekvenciájával ( $\approx 0,35$

6. ábra. Gerjesztett kváziperiodikus és kaotikus pályák. Az indítás feltételei ugyanazok, mint a 4. ábra esetén, csupán a  $b$  magasság értékét változtattam, és gerjesztettem a mozgást. A kezdőpillanatban a lap mindig vízszintes volt. a)  $b = 2,4 \text{ cm}$ , b)  $b = 2,1 \text{ cm}$ , c)  $b = 1,7 \text{ cm}$ , d)  $b$  közelítőleg  $1,7 \text{ cm}$ , a c) esethez hasonlóan. A kezdeti feltételek csupán a berendezés pontatlansága miatt különböztek kicsit a c) esettől.



regzés/s). Kaotikus mozgás esetén az inga igen különösen viselkedett. Egyes időpillanatokban igen erősen megnövekedett a lengési amplitúdója a gerjesztés miatt, máskor viszont nem mutatott amplitúdónövekedést. Ebben a folyamatban nem sikerült semmilyen törvényszerűséget, periodicitást találni. Az állandósult káosz tehát ugyanolyan jellegű, mint a tranziens káosz, csupán végtelen hosszú ideig tart. Azt is megfigyelhetjük, például a 6.c és 6.d ábra esetében, hogy közel azonos indítású két pálya is igen hamar teljesen különbözővé válik.

## A mozgás jellege és a potenciál közti kapcsolat

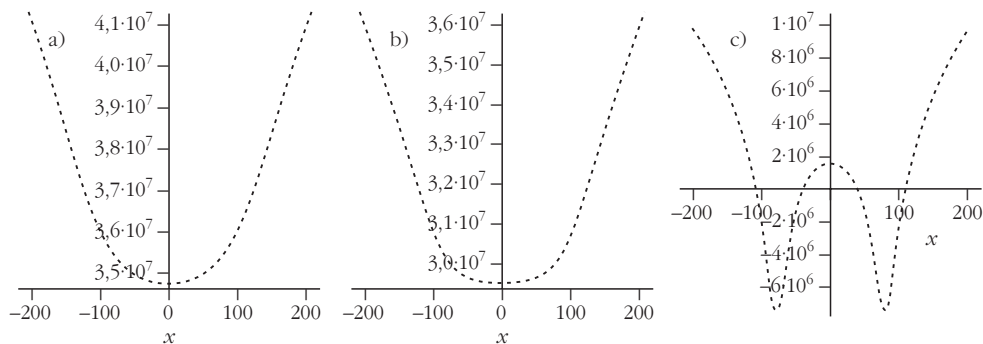
Az inga viselkedésének jobb megértése érdekében tanulmányozzuk az inga potenciális energiáját ( $V$ )! Tekintsük nulla szintnek a mágnesek síkját (merőlegesen a gravitációs térre) és a mágneses erőket  $k/r^2$  alakúaknak (ahol  $r$  az ingatest távolsága a mágnesről,  $k$  pedig a mágnes erősségét jellemzi<sup>1</sup>)! Feltételezzük, hogy az inga kitérései kicsik a szál hosszához képest és így az inga vízszintes síkban mozog. Az ingát tehát harmonikus oszcillátornak tekinthetjük ( $g/l$ )<sup>1/2</sup> frekvenciával. Ekkor az  $m$  tömegű test helyzeti energiáját a

$$V(x, y) = mg \frac{x^2 + y^2}{2l} + mgb - \frac{k}{\sqrt{\left(\frac{d}{2} + x\right)^2 + y^2 + b^2}} - \frac{k}{\sqrt{\left(\frac{d}{2} - x\right)^2 + y^2 + b^2}} \quad (1)$$

összefüggés adja meg, ahol  $g$  a nehézségi gyorsulás.

A 7. ábrán az ingatest potenciális energiáját ábrázolják. Ha  $b$  értéke nagy, a 7.a ábrán látható, jellegzetes görbe érvényes, amelyen egy potenciálvölgy található egy „domináns” minimumponttal: ez az origóban található. A mágnesek hatása itt igen kicsi, mivel az inga magassága a mágnesek síkjához képest nagy. E minimumpont

<sup>1</sup>  $k$  értékét előre kimért rugalmassági együtthatójú rugók segítségével mértem meg. Közelítve a mágneshez az ingát azonban igen erősen nőtt a vonzóerő (különböző rugók kellettek). Ennek ellenére sikerült  $k$  értékét legalább durva közelítéssel megbecsülnöm. Így  $k = 30 \text{ m}^3 \text{ g/s}^2$ . Abból a megfontolásból, hogy a valóságban a mágnes közel sem tekinthető pontszerűnek, mint elméleti megfontolásaimban, a szimulációk során  $k$  értékét egy nagyságrenddel nagyobbak tekintem:  $k = 300 \text{ m}^3 \text{ g/s}^2$ .



7. ábra. Az (1) összefüggés alapján, különböző paraméterértékekkel készített potenciálgörbék. A közös paraméterek:  $l = 2 \text{ m}$ ,  $m = 45 \text{ g}$ ,  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ,  $k = 3 \cdot 10^2 \text{ m}^3 \text{ g/s}^2$ ,  $d = 160 \text{ mm}$ . a)  $b = 90 \text{ mm}$ , b)  $b = 79 \text{ mm}$ , ez a bifurkáció pontja, c)  $b = 20 \text{ mm}$ .

$x$  tengely menti értéke az inga egyensúlyi helyzetét jelöli (ez az origóban, a mágnesek közt van).

Amennyiben csökkentjük  $b$  értékét, a 7.c ábrán látható bonyolultabb görbe lesz érvényes, melynek két potenciálvölgye van. Mindegyik egy-egy minimumponttal rendelkezik, és ennek megfelelően az ingának két egyensúlyi helyzete van. A nyugalmi helyzetek ( $x$  koordinátái) kissé eltérnek a mágnesek helyzetének megfelelő pontoktól, mivel mindkét mágnes hat a vasgyűrűkre (szuperpozícióról beszélünk). Az origó itt már instablnak mutatkozik. Megjegyzem, hogy az origó stabilitása jelentős mértékben függ a mágnesek középpontja közti  $d$  távolságtól is.

Lényegében az történik, hogy  $b$  kis értékeire a mágnesek fölött stabil fixpontok keletkeznek, a koordináta-rendszer origójában pedig egy instabil fixpont alakul ki. Az inga tehát instabil állapotok sorozatán megy át, és tranziens káoszt – azaz véges ideig tartó kaotikus mozgást – mutat a légellenállás miatt. A mágnesek tehát egyszerű attraktorok.

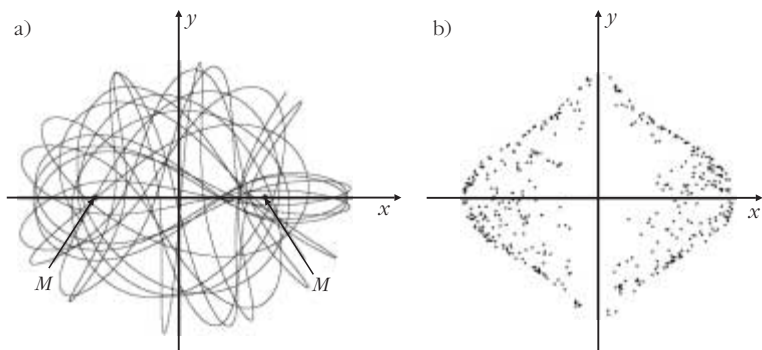
Az „áttérést” e két, különböző jellegű potenciál között bifurkációnak nevezzük,  $b$ -nak azt az értékét pedig, ahol ez az áttérés megvalósul, bifurkációs pontnak nevezzük (7.b ábra).

A kísérletek során  $b = 17 \text{ mm}$  értéknél a mágnesek hatása már kellően erős, és bármely  $b < 17 \text{ mm}$  esetén a mozgás kaotikus lesz. Amint ezt részletesebben a Numerikus szimuláció című részben tárgyalom, a szimulációk során erre az értékre  $b = 37 \text{ mm}$  adódott. Az eltérés főleg azzal indokolható, hogy az elméleti leírás esetén a mágneseket – a valóságtól eltérően – pontszerűnek tekintettem.

## Numerikus szimuláció

Hasonló eredményeket kaptam az általam írt mozgásszimuláló program futtatása során is. Ezek leírása előtt azonban tekintsük meg, hogyan is írható le pontosan a mágneses inga mozgása matematikailag.

Feltételezzük, hogy az inga kitérései kicsik a szál hosszához képest, és így az inga vízszintes síkban mozog. Az ingát tehát ( $g/l$ )<sup>1/2</sup> frekvenciájú harmonikus oszcillátornak tekinthetjük. Az (1) összefüggés alapján, deriválással kiszámolhatjuk az ingára ható erőt. Ennek  $x$  és  $y$  menti komponensei:



A mozgásegyenletek:

$$\ddot{x} = \frac{F_x \text{ eredő}}{m} \quad \text{és} \quad \ddot{y} = \frac{F_y \text{ eredő}}{m}. \quad (5)$$

8. ábra. a) súrlódásmentes kaotikus mozgás pályája. Paraméterek:  $b = 25$  mm,  $k = 3 \cdot 10^2$  m<sup>3</sup>g/s<sup>2</sup>. b) súrlódásmentes kaotikus mozgás Poincaré-diagramja a 8.a ábra pályája alapján. A diagramon levő pontok erős szórást mutatnak.

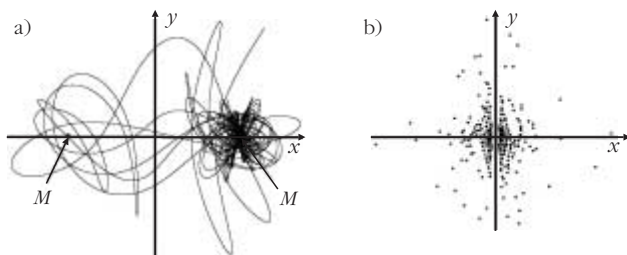
A (5) törvények alapján írtam meg a mágneses inga mozgását szimuláló és Poincaré-diagramot készítő programomat, a pontosság érdekében negyedrendű Runge–Kutta-módszert használtam.

Akárcsak méréseimnél, itt is megfigyelhető, hogy az átmenet kváziperiodikus mozgásból kaotikusba nem akkor következik be, amikor a mágnesek képesek a kis környezetükön belül levő, sebesség nélküli ingát maguk felett tartani, hanem akkor, mikor a koordináta-rendszer középpontja megfelelő mértékben instabillá válik. A szimulációk során a kváziperiodikus mozgást a kaotikus  $b = 37$  mm-nél váltja fel, ha eltekintek a légellenállástól. Megfigyelhető, hogy a szimulációim során figyelembe véve a légellenállást is, a mozgás  $b = 37$  mm-nél nagyobb értékre is kaotikussá válik.

Kaotikus mozgás esetén (a pályát a 8.a ábra mutatja) a Poincaré-diagramon, melyen az  $y$  koordináta függvényében ábrázoljuk a sebesség  $v_x$  komponensét – mikor a sebesség  $v_y$  komponense éppen 0 – látható, hogy egy adott koordinátához igen sok és eltérő sebességérték tartozik, a grafikonon levő pontok szórása nagy. A mozgás során az inga tehát hirtelen mozgásbeli változásokat szenved, és az origó itt már instabil fixpont (8.b ábra).

Súrlódásos kaotikus mozgás esetén a mozgás véges ideig kaotikus (tranzien káosz), a két mágnes pedig egy egyszerű attraktor (a pálya a 9. ábrán látható). A Poincaré-diagramon pedig látható, hogy a pontok szórása eleinte igen nagy, ami kaotikus jellegre utal, majd a sebesség 0 felé, a koordináták pedig az egyik egyszerű attraktor koordinátáihoz tartanak (9.b ábra).

A kaotikus mozgás egyik jellemzője, hogy igen érzékeny a kezdőfeltételekre. Így tapasztalható, hogy az ingát két, egymástól csak igen kicsit eltérő pontból indítva, annak mozgása különböző attraktorokhoz tart, tehát az inga különböző mágnesek felett áll meg. Ekkor igen érdekes lenne a teret feltérképezni, hogy a tér egyes pontjából indítva az ingát, az hol áll meg. Ezt kísérletileg sajnos nem tudtam megvalósítani a kísérlet idő- és fotópapír-szükséglete miatt. Ezért írtam egy programot, amely a tér egy, a mágnesek körüli részének közeli pontjából indított inga mozgását szimulálja, feltérképezve ezt a térbeli tartományt. A program minden egyes térbeli indítási ponthoz azt a szint rendelte hozzá, amelyet annak az attraktornak feleltettem meg, amelyik felé az inga mozgása tartott és amelynek hatásától a mágnes egy idő után már nem tudott kitörni (légellenállás miatt). Így kaptam a 10. ábrát, amelyen a középtájon látható legsötétebb tartomány a tér azon részét jelöli, ahonnan az ingát



9. ábra. a) súrlódásos kaotikus mozgás pályája. Paraméterek:  $b = 25$  mm,  $k = 3 \cdot 10^2$  m<sup>3</sup>g/s<sup>2</sup>,  $\alpha = 0,009$  kg/m,  $\beta = 0,09$  kg/s esetben. b) súrlódásos kaotikus mozgás Poincaré-diagramja az a) ábra pályája alapján. A diagramon levő pontok erős szórást mutatnak.

$$F_x = -\frac{\partial V}{\partial x} \quad \text{és} \quad F_y = -\frac{\partial V}{\partial y}. \quad (2)$$

Legyen a közegellenállási erő  $x$  és  $y$  tengely menti komponense  $F_{xe}$  és  $F_{ye}$ :

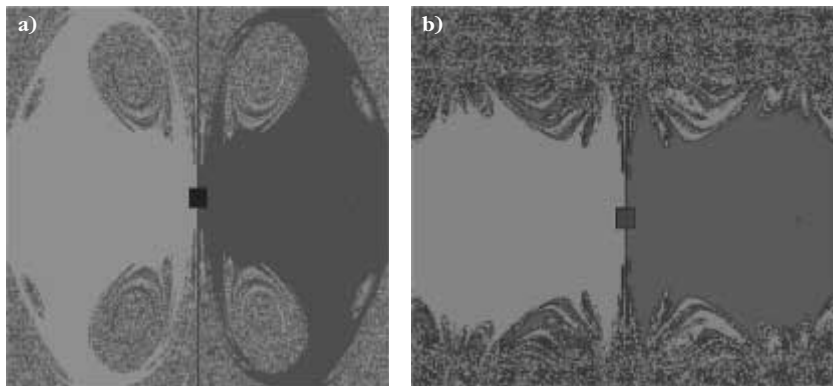
$$F_{xe} = -\alpha \sqrt{v_x^2 + v_y^2} v_x - \beta v_x, \quad (3)$$

$$F_{ye} = -\alpha \sqrt{v_x^2 + v_y^2} v_y - \beta v_y.$$

Itt az összegek első tagja a nyomási ellenállás, amely a test mögött keletkező örvényektől származik, míg a második tag a levegő belső súrlódásából származó súrlódási ellenállás [9]. Az eredő erők tehát:

$$F_x \text{ eredő} = F_x + F_{xe} \quad \text{és} \quad F_y \text{ eredő} = F_y + F_{ye}. \quad (4)$$

10. ábra. A vonzási tartományok. A szimuláció közös paraméterei:  $m = 45$  g,  $l = 2$  m,  $d = 160$  mm,  $k = 300$  m<sup>3</sup>g/s<sup>2</sup>,  $\alpha = 0,009$  kg/m,  $\beta = 0,09$  kg/s,  $dt = 0,0001$ . a)  $b = 40$  mm, b)  $b = 30$  mm.

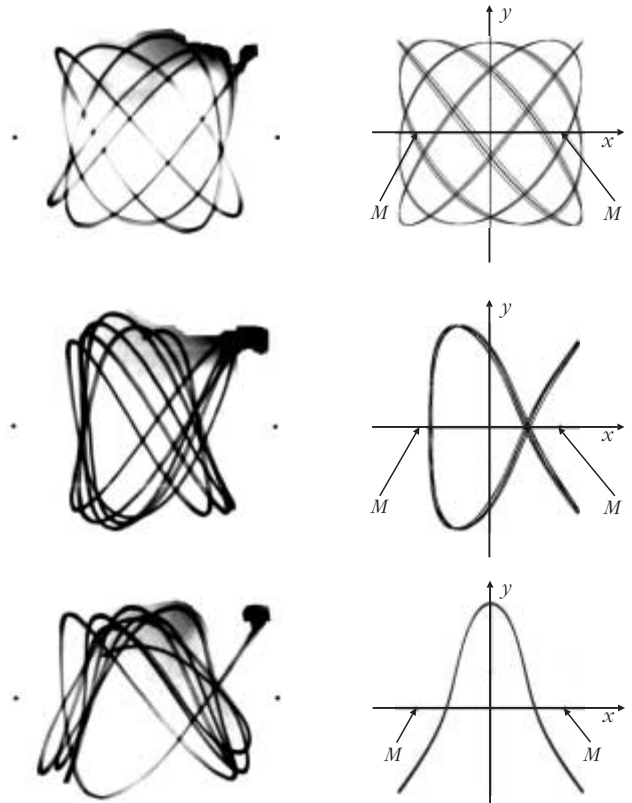


indítva az a mágneseket összekötő szakasz felezőpontjában áll meg. A világos pontok a tér azon részeit jelölik, ahonnan az ingát indítva az a baloldali mágnes fölött áll meg, végül a sötétebb pontok azt jelzik, hogy az onnan indított inga a jobboldali mágnes felett áll meg.

Megfigyelhető a 10. ábrán, hogy a fent leírt módon készített képeken az egyes egyszerű attraktorokhoz tartozó tartományok a mágnesektől távolabbi térrészben erősen egymásba vágnak. Ezeket a határvonalakat fraktálvonzási határoknak nevezzük [3, 7, 10]. Ebből is láthatjuk, mennyire érzékeny a rendszer az indítás kezdőfeltételeire. A 10. ábrán mutatott kép ugyanis a  $b$  magasság olyan értékére készült, amelynél az inga mozgása kaotikus. Nyilván mágnesek nélkül vagy  $b$  igen nagy értékeire a teljes tér egy árnyalatú (ez esetben sötét) lenne.

Megjegyzem, hogy a különböző árnyalatú tartományok széléről indított mozgások hosszabb ideig tartó kaotikus mozgások. Többször megfigyeltem, hogy ez esetben az inga hosszabban mozog egyik mágnes felett, majd kitör ennek környezetéből és a másik mágnes felett áll meg. Érdekes, hogy a leghosszabb mozgási idővel azok a pályák rendelkeznek, melyeket az  $y$  tengely mentén indítottam ( $x = 0$ ).

Vizsgáljuk meg, miként egyeznek a szimuláció eredményei a mérési eredményekkel! A 11. ábrán a mérésekkel kapott pályák mellett a szimulációval készült pályák láthatóak. Az egyes pályák jellegben igen jól hasonlíthatnak.



11. ábra. Néhány igen jól egyező, fotópapíron rögzített, illetve szimuláció során kapott kváziperiodikus pályagörbe.

## Összefoglalás

A mágneses kaotikus inga viselkedését jó minőségben megkaphatjuk a pálya lézeres kirajzolásával, majd ennek feketedését számítógéppel elemezve. A feketedés jellemzi ugyanis az inga adott helyhez tartozó sebességét és így az impulzusát. A mérések helyességét a numerikus szimulációval kapott, jellegben igen jól egyező eredmények is igazolják.

Kaotikus mozgás esetén – ha nincs légellenállás – az inga végtelen hosszú ideig kaotikus mozgást folytat, azaz permanens káoszról beszélünk, míg légellenállás jelenlétében csupán véges ideig kaotikus az inga mozgása, ez a tranzien káosz. A mozgás ebben az esetben egyik egyszerű attraktorhoz fog tartani (egyik mágneshez vagy igen ritkán az origóhoz).

Dolgozatom során sikerült belátni, hogy a kaotikus mozgás igen érzékeny a kezdőfeltételekre, és ennek megfelelően igen kis kezdőfeltétel-változtatás a mozgás végkimenetét teljesen megváltoztathatja.

Azt is megfigyelhettük, hogy kaotikus mozgás csak akkor alakul ki, ha az inga legalább kétdimenziós térben mozog. Csupán az  $x$  tengelyen történő mozgás sosem lesz kaotikus, hiszen egy szabadsági fokú rendszerekben nem jelentkezhet a káosz [3]. A mágneses inga vizsgálata tehát jól mutatja, hogy csupán a rendszer szabadsági fokai számának növelése is a káosz megjelenéséhez vezet, miközben minden más paraméter állandó marad.

A fentiekben a kaotikus mozgás jellegzetességeit tanulmányozhattuk egyszerű, könnyen megvalósítható esz-

közökkel, könnyen érthető módon. Ez alkalmas eszközzé teszi a mágneses ingát a kaotikus mozgás szemléltetésére akár a középiskolai fizikatanítás keretén belül is [11].

## Köszönetnyilvánítás

Köszönetemet fejezem ki elsősorban témavezetőimnek, akik segítségével nem lett volna lehetséges dolgozatom elkészítése: Tél Tamásnak, az ELTE TTK, Elméleti Fizika Tanszék tanárának és Máthé Márta tanárnőnek, a marosvásárhelyi Bolyai Farkas Elméleti Líceumból. Továbbá köszönöm Gruiz Márton jelentős segítségét programjaim megírásához, valamint Hantz Péter adjunktus (Babeş-Bolyai Tudományegyetem) és Péterfi István segítségét.

## Irodalom

- GÖTZ G.: *A pillangóeffektus – a káosz felfedezése a meteorológiában* – Fizikai Szemle 43/12 (1993) 487
- E.N. LORENZ: *Deterministic nonperiodic flow* – J. Atmos. Sci. 20 (1963) 130
- TÉL T., GRUIZ M.: *Kaotikus dinamika* – Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 2002
- K. BRIGGS: *Simple experiments in chaotic dynamics* – Am. J. Phys. 55 (1987) 1083
- <http://members.lycos.co.uk/ScienceAndScripture/wr/chaospnd.html>
- J.P. BERDAHL, K.V. LUGT: *Magnetically driven chaotic pendulum* – Am. J. Phys. 69 (2001) 821
- H.O. PEITGEN, H. JÜRGENS, D. SAUPE: *Chaos and fractals* – Springer, Berlin, 1992, 12.8 fejezet
- K. LUCHNER, R. WORG: *Kaotikus rezgések* – Fizikai Szemle 36/6 (1986) 372
- D.B. MEADE, A.A. STRUTHERS.: *Differential equations in the new millennium: the parachute problem* – Tempus publications, 1999
- C. GREBOGI, E. OTT, J.A. YORKE: *Chaos, strange attractors, and fractal basin boundaries in nonlinear dynamics* – Science 238 (1987) 632
- GRUIZ M., TÉL T.: *A káosz* – Fizikai Szemle 55/5 (2005) 191

# KVANTITATÍV PROBLÉMAMEGOLDÁS MINKOWSKI-DIAGRAMON

Nagy Péter

Kecskeméti Főiskola GAMF Kar,  
Matematika és Fizika Tanszék

A speciális relativitáselmélet alapvető összefüggései matematikailag igen egyszerűek. Például egy tetszőleges esemény különböző vonatkoztatási rendszerekben megfigyelhető tér- és időkoordinátáit összekapcsoló (egydimenziós) Lorentz-transzformáció:

$$\begin{aligned}x' &= \gamma [x - \beta (ct)], \\ct' &= \gamma [-\beta x + (ct)],\end{aligned}\quad (1)$$

illetve az inverz Lorentz-transzformáció:

$$\begin{aligned}x &= \gamma [x' + \beta (ct')], \\ct &= \gamma [\beta x' + (ct')],\end{aligned}\quad (2)$$

ahol:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad \text{és} \quad \beta = \frac{v}{c}.\quad (3)$$

A Lorentz-transzformációból levezethető további összefüggések (mint pl. a sebesség-összeadódás törvénye, a hosszkontrakció, az idődilatáció és a Doppler-effektus stb.) sem bonyolultak, de hétköznapi szemléletűnkől idegenek, nehezen érthetők. Mint sok más esetben itt is igaz, hogy a szemléltetés megkönnyítheti a megértést és ezáltal a problémamegoldást is. E célra *a relativitáselméletben a Minkowski-diagramot használjuk, amely egy ábrán jelenít meg két (vagy több) vonatkoztatási rendszert, így az anyagi világ eseményeihez rendelhető fizikai tulajdonságok különböző vonatkoztatási rendszerekben mérhető értékeit egyszerű (a megfelelő koordinátatengelyre való) vetítésekkel olvashatjuk le.* A téridő hiperbolikus geometriájából eredően azonban a választott „nyugalmi” rendszerhez képest mozgó további vonatkoztatási rendszerek koordinátatengelyei az ábrán torzulnak: mind a szögek, mind a léptékek megváltoznak. A tengelyek felvétele a relatív sebesség, illetve egy tetszőleges esemény mindkét vonatkoztatási rendszerben mért adatainak ismeretében könnyen elvégezhető (lásd az *Egy kidolgozott példa* fejezetet). Gondot jelent azonban a tengelyek léptékeinek kalibrálása.

Az alábbi idézet (az egyik legjobb relativitáselméleti tankönyvnek tekinthető) [1] könyvből származik: „Kalibráljuk a  $K'$  vonatkoztatási rendszer tengelyeit! Rajzoljuk meg a  $t^2 - x^2$  hiperbolát! Azon a helyen, ahol a hiperbola metszi a  $K$  rendszer  $t$  tengelyét (ahol  $x = 0$ )  $t = 1$  m. De a  $t^2 - x^2$  mennyiség invariáns, ezért ugyanakkor  $t'^2 - x'^2 = 1$ . Így azon a helyen, ahol a hiperbola metszi a  $K'$  vonatkoztatási rendszer  $t'$  tengelyét (ahol  $x' = 0$ ), ott  $t' = 1$  m, tehát megkaptuk a  $K'$  vonatkoztatási rendszer léptékét.”

Mindez igen világos, a kérdés csupán az, hogy *miként rajzoljuk meg azt a bizonyos hiperbolát pontosan?!* Továbbgondolva a dolgot a válasz persze az, hogy *valójában* nem rajzoljuk meg a hiperbolát, a fenti megfogalmazás csak *egy lehetséges definíciót ad a léptékre* vonatkozóan. Ezek után a didaktikus lépés az lenne, hogy egyszerű és gyakorlati utasítást adjunk a skálázás manuális elkészítésére. Furcsa, hogy ezen a problémán a tankönyvek átsiklanak, pedig e nélkül a pontos rajz nem készíthető el, s így a Minkowski-diagram kvantitatív információk kinyerésére alkalmatlan. Több mint egy tucat tankönyvet, jegyzetet, valamint több száz (a Google kereső által „Minkowski-diagram” kulcsszóra talált) internetes anyagot átböngészve sem letem erre vonatkozó konkrét javaslatot. Nyilvánvaló pedig, hogy a  $K'$  vonatkoztatási rendszer tengelyeinek léptéke a relatív sebesség által meghatározott. Léteznie kell tehát egy, a továbbiakban  $\eta$ -val jelölt skálafaktornak, amely megadja, hogy a „nyugalmi” rendszer léptékéhez képest hányszorosára kell nyújtanunk az új tengelyek léptékét, és hogy ez csak a relatív sebesség függvénye:  $\eta(\beta)$ . Végül *Hraskó Péter* nagyszerű, új könyvében [3] találtam egy feladatot, amely erre vonatkozott, de a Minkowski-diagramon való problémamegoldást ő sem vitte tovább.

## A skálafaktor meghatározása

Készítsük el egy egydimenziós mozgás Minkowski-diagramját a szokásos módon! A  $K$  vonatkoztatási rendszer vízszintes tengelyén az időt (pontosabban a  $ct$  mennyiséget), a függőleges tengelyén pedig a távolságot (az  $x$  mennyiséget) vesszük fel; a két tengely léptékét válasszuk azonosnak (*1. ábra*).

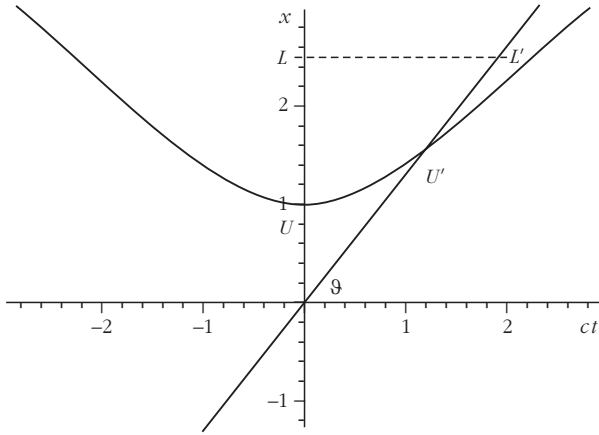
Keressük meg most az ábránkon a  $K'$  vonatkoztatási rendszer  $x'$  tengelyét! Ezt könnyen megtehetjük, ha észrevesszük, hogy az  $x'$  tengely nem más, mint a  $t' = 0$  pontok mértani helye, tehát az (1) Lorentz-transzformáció második összefüggése alapján az

$$x = \frac{1}{\beta} (ct)$$

egyenletre jutunk, amely a diagramunkon egy

$$\tan \vartheta = \frac{1}{\beta}$$

meredekségű egyenest jelöl ki (most az általánosság megszorítása nélkül a két vonatkoztatási rendszer origóját azonosnak vesszük fel, az *Egy kidolgozott példa* részben bemutatjuk, hogy miként kell dolgozni, ha a két



1. ábra. A K rendszer Minkowski-diagramja

origó nem esik egybe). Jegyezzük meg, hogy a legutóbbi összefüggésünkéből következik, hogy:

$$\sin \vartheta = \frac{1}{\sqrt{1 + \beta^2}}. \quad (4)$$

A kérdés az, hogy milyen kapcsolat van a vesszőtlen tengelyek  $U$  léptéke és vesszős tengelyek  $U'$  léptéke között a Minkowski-diagramon. (Szemléltetésül az 1. ábrán megrajzoltuk a hiperbolát, de a levezetésben nem támaszkodunk rá.) Vegyünk fel az  $x'$  tengelyen egy tetszőleges  $L'$  ( $\Delta t' = 0$ ) szakaszt, majd tekintsük ezen szakasz  $x$  tengelyre vetített  $L$  hosszát!

A két vonatkoztatási rendszerben mérhető hosszadatok:

$$\Delta x = \frac{L}{U} \quad \text{és} \quad \Delta x' = \frac{L'}{U'}. \quad (5)$$

A hosszadatok között a (2) első összefüggése teremt kapcsolatot:

$$\Delta x = \gamma \Delta x', \quad (6)$$

miel  $t' = 0$ . Olvassuk még le az ábráról azt az egyszerű trigonometriai kapcsolatot, hogy:

$$L = L' \sin \vartheta. \quad (7)$$

Az (5), (6) és (7) felhasználásával:

$$\frac{L}{U} = \Delta x = \gamma \Delta x' = \gamma \frac{L'}{U'} = \gamma \frac{L/\sin \vartheta}{U'},$$

azaz:

$$U' = \frac{\gamma}{\sin \vartheta} U = \eta U,$$

ahol (3) és (4) felhasználásával a keresett skálafaktor:

$$\eta = \frac{\gamma}{\sin \vartheta} = \sqrt{\frac{1 + \beta^2}{1 - \beta^2}}. \quad (8)$$

*Ez utóbbi eredményünk azt az egyszerű és praktikus utasítást jelenti a Minkowski-diagram készítője számára, hogy a  $K'$  vonatkoztatási rendszer tengelyein a  $K$  rendszer tengelyein használt lépték  $\eta$ -szorosát kell felvenni,*

*így minden további szerkesztés számszerűen pontos eredményeket szolgáltat.*

1. megjegyzés: a skálafaktort természetesen levezethetjük a hiperbola és a tengely metszetére vonatkozó definíció alapján koordináta geometriai számolással, de didaktikusabbnak tűnik a fenti út, amely a Lorentz-transzformációból indul ki.

2. megjegyzés: a (8) skálafaktort sokkal rövidebb (de sokkal kevésbé szemléletes) teoretikus úton is levezethetjük: a Minkowski-diagramon a léptéktorzulás tulajdonképpen annak a következménye, hogy téridő hiperbolikus geometriáját „erőszakoljuk bele” a diagram euklidészi geometriájába, így lényegileg a hiperbolikus geometria  $[(c\Delta t)^2 - \Delta x^2]$  metrikáját skálázzuk át az euklidészi  $[(c\Delta t)^2 + \Delta x^2]$  metrikába, azaz:

$$\eta^2 [(c\Delta t)^2 - \Delta x^2] = (c\Delta t)^2 + \Delta x^2,$$

tehát:

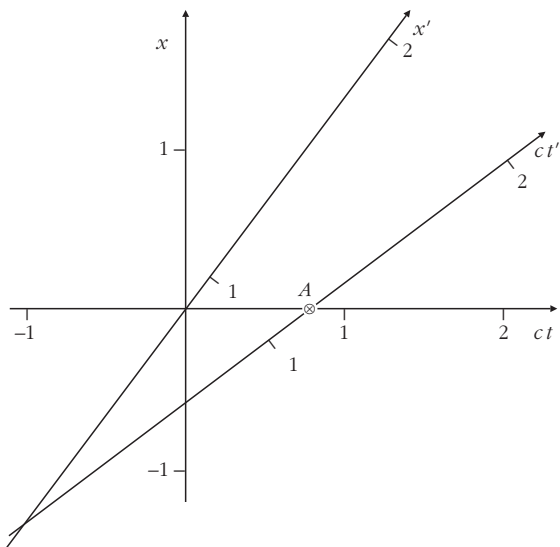
$$\begin{aligned} \eta &= \sqrt{\frac{(c\Delta t)^2 + \Delta x^2}{(c\Delta t)^2 - \Delta x^2}} = \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{\Delta x}{c\Delta t}\right)^2}{1 - \left(\frac{\Delta x}{c\Delta t}\right)^2}} \\ &= \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}{1 + \left(\frac{v}{c}\right)^2}} = \sqrt{\frac{1 + \beta^2}{1 - \beta^2}}. \end{aligned}$$

## Egy kidolgozott példa

Gondor városa fölött kétely és félelem csüngött. Uruk meghalt, megégett, Rohan királya ott feküdt holtan a Fellegvárban, s a király, aki eljött hozzánk egy éjszaka, reggelre elvonult, hogy megvívjon a sötét és rettentő hatalommal, azt pedig nincs erő, nincs vitészség, ami legyőzhetné. (Tolkien)

Napjaink egyik moziislágeré Tolkien remekművé meséje a *Gyűrűk Ura*. A történet helyszíne, Középfölde különös világ, talán egyik legkülönösebb vonása – melyet Tolkien nem említ, lévén nyelvész és nem fizikus –, hogy a fény terjedési sebessége mindössze 100 km/h. Trufa, a történet egyik főszereplője csodálatos lovat kap Rohan (Lovasvég) királyától, e táltos varázslatosan gyors, 75 km/h sebességgel (a fénysebesség háromnegyedével!) képes száguldani. A döntő csatában – melyet a Gyűrű Szövetsége vívott meg a Sötét Úrral Minas Tirith falai alatt – Trufa az álló Lidérc Király mellett elvágatva tündéerkardjával levágja annak fejét (nevezük ezt profán egyszerűséggel A eseménynek).

a) Rajzolja fel a Lidérc Királyhoz rögzített  $K$  vonatkoztatási rendszer Minkowski-diagramját úgy, hogy mindkét tengelyen  $[100 \text{ km}] = [45 \text{ mm}]$  léptéket használ! Ábrázolja ezen a diagramon a vágató Trufához rögzített  $K'$  vonatkoztatási rendszer tengelyeit léptékhelyesen, ha tudjuk, hogy A esemény  $K$  (Lidérc Király) órája szerint 7/9 óraker,  $K'$  (Trufa) órája szerint pedig 100/85 óraker történt!



2. ábra. A  $K'$  origójának meghatározása

b) A Lidérc Király halála ( $A$  esemény) után nem sokkal, Trufa órája szerint pontosan 0,9 órával, összedől – legyen ez a  $B$  esemény – Minas Morgul (a Gyűrűlidérek Tornya), amelynek  $K$  rendszerbeli helykoordinátája  $x_B = -50$  km. A Lidérc Király órája szerint mennyi idő telik el a Lidérc Király halála és a torony összeomlása között? (Számolással és szerkesztéssel is!)

c) Középfölde népe persze meg van győződve arról, hogy a Lidérc Király halála okozta Minas Morgul összeomlását. Önnek mi a véleménye erről?

d) A csatába igyekező Trufa kénytelen volt átvágtatni a Halottak völgyén. Trufa saját óráját éppen a völgy bejáratánál indította, amely szerint pontosan 10 perc alatt ért át a völgyön. Milyen hosszú valójában a Halottak Völgye? (Számolással és szerkesztéssel is!)

e) Milyen színűnek látta Trufa a Lidérc Király vérvörös színű pajzsát, mikor felé vágatott? (Számolással és szerkesztéssel is!)

## Megoldás

a)

$$\beta = \frac{3}{4}; \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{4}{\sqrt{7}} = 1,512;$$

$$\eta = \sqrt{\frac{1 + \beta^2}{1 - \beta^2}} = \sqrt{\frac{25}{7}} = 1,89;$$

$$L' = 1,89 \times 45 \text{ mm} \approx 85 \text{ mm a lépték.}$$

Tehát a  $K'$  vonatkoztatási rendszer időtengelye  $\beta = 3/4$  meredekségű, és áthalad az  $(x = 0; t = 7/9)$  koordinátákkal adott  $A$  ponton (lásd a 2. ábrán). A  $K'$  vonatkoztatási rendszer origóját abból az információból határozhatjuk meg, hogy az ábrán felvett  $A$  pont időkoordinátája  $K'$  szerint  $100/85$  óra, tehát a már kiszámolt lépték birtokában az időtengelyen visszamérve a  $100/85$  egységet (azaz jelen esetben 100 millimétert), megkapjuk a keresett origót, melyen keresztül pedig meghúzzhatjuk az  $1/\beta = 4/3$

meredekségű  $x'$  tengelyt. Ezzel a Minkowski-diagramon pontosan ábrázoltuk a két vonatkoztatási rendszer tengelyeit, készen állunk arra, hogy tetszőleges információt leolvassunk az ábránkról.

b)  $\Delta x = -50$  km;  $\Delta t' = 0,9$  óra. A Lorentz-transzformáció (1) képlete szerint:  $\Delta t' = \gamma[-(v/c^2)\Delta x + \Delta t]$ , amiből:  $\Delta t = 0,22$  óra.

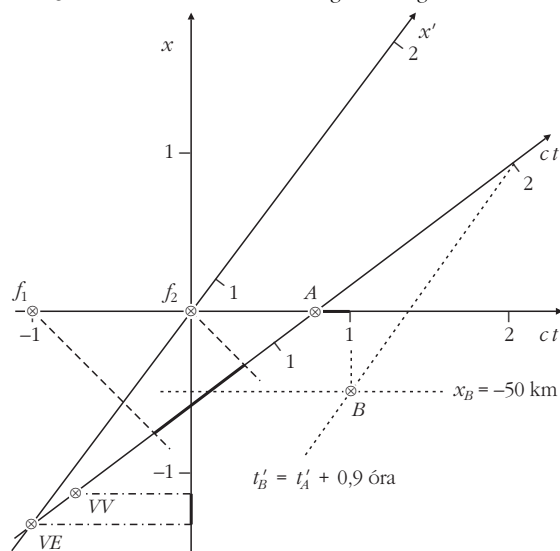
Másrészt a Minkowski-diagramon (lásd a 3. ábrát) az  $x_B = -50$  km ( $ct$  tengellyel párhuzamos) egyenes és a  $t'_B = t'_A + 0,9$  óra ( $x'$  tengellyel párhuzamos) egyenes metszéspontjával adódó  $B$  pontot a  $ct$  tengelyre vetítve  $A$  és  $B$  események  $K$  vonatkoztatási rendszerben mért időkülönbségére (a  $ct$  tengelyen megvastagított szakasz hossza  $\approx 10$  mm)  $\Delta t = (10 \text{ mm}) / (45 \text{ mm}) \cdot (1 \text{ óra}) = 0,22$  óra adódik.

c) A Minkowski-diagramon jól látszik, hogy az  $A$  és  $B$  eseményeket összekötő szakasz meredeksége abszolút értékben nagyobb egynél (kb.  $-2,25$  értékű). Így a két esemény között nem lehet ok-okozati kapcsolat (mivel a fénysebességnél gyorsabb hatásnak vagy információnak kellene összekapcsolni a két eseményt, melyet viszont a speciális relativitáselmélet nem enged meg), tehát csupán ezek alapján kijelenthetjük, hogy Lidérc Király halála semmiképpen sem okozhatta Minas Morgul pusztulását.

d) Trufa vonatkoztatási rendszerében a megtett távolság:  $\Delta x' = 1/6 \text{ óra} \cdot 75 \text{ km/óra} = 12,5$  km, de ez a völgy valódi ( $K$ -beli nyugalmi) hosszánál kisebb, mivel a *hosszkontrakció* jelensége szerint:  $\Delta x'/\gamma$ , amiből:  $\Delta x = 18,9$  km.

Másfelől a Minkowski-diagramon a megoldás ropant egyszerű. A feladat megfogalmazása szerint felvéve a  $VE$  (Völgy Eleje), illetve  $VV$  (Völgy Vége) eseményeket (természetesen mindkét pont a  $ct'$  tengelyen van, hiszen Trufa helyét jelölik, a  $VE$  pont időkoordinátája  $t' = 0$ , a  $VV$  ponté pedig  $t' = 10 \text{ perc} = 1/6 \text{ óra} = 1/6 \cdot 85 \text{ mm} = 14,2 \text{ mm}$ ), az intervallumot az  $x$  tengelyre vetítve (a megvastagított szakasz)  $\Delta x = 8,5 \text{ mm}$ . Amiből  $(8,5 \text{ mm}) / (45 \text{ mm}) \cdot (100 \text{ km}) = 18,9 \text{ km}$  adódik.

3. ábra. Az  $A$  és  $B$  időkülönbségének meghatározása



e) A Doppler-effektus relativisztikus képlete szerint a hullámhossz (és vele azonosan a periódusidő) torzulása:  $\lambda' = \lambda[(1-\beta)/(1+\beta)]^{1/2} = 0,378\lambda$ , így ha a vörös szín hullámhossza 700 nm, akkor mintegy 280 nm értéket kapunk, tehát kevéssel alatta van a látható tartománynak.

Az ábráról ugyanezt az arányt például a következőképpen olvashatjuk le. Tekintsük a  $K$  vonatkoztatási rendszerben a fény periódusidejét egységnyiinek (ezt megtehetjük, hiszen úgyis csak az arány érdekel bennünket)! Vegyük fel az időtengelyen periódusidőnyi távolságban két fényjel (az ábrán  $f_1$  és  $f_2$  pontozott egyenesek) világvonalát (ezek  $-1$  meredekségűek, hiszen Trufával szemben kell haladniuk), és keressük meg ezek metszéspontját a  $K'$  vonatkoztatási rendszer időtengelyével! A metszéspontok távolsága (a  $ct'$  tengelyen megvastagított szakasz) a  $K'$ -ben mért periódusidő, ami jelen esetben  $(32 \text{ mm})/(85 \text{ mm}) = 0,377$ -szerese az egységnek, tehát ez a torzulás aránya.

## Gyakorló feladat

A Roxfort Boszorkány- és Varázslóképző Szakiskola számára sok tekintetben különös világ. Sok egyéb furcsaság mellett a mi szempontunkból fontos, hogy az iskola területén például a fény terjedési sebessége csak 100 m/s.

Most éppen kviddics-mérkőzés zajlik, a Griffendél-Mardekár rangadó. Madam Hooch a mérkőzés játékvezetője a pálya középpontja felett lebeg, amikor közvetlenül mellette (pont a nézőkkel zsúfolt lelátó irányában) elhúzza az aranycikeszt (az egyik labda, melynek elkapása 150 pontot ér), szorosan a nyomában – Madam Hooch órája szerint csupán fél másodperc hátránnyal – Harry Potter száguld csaknem lelökve a seprűjéről szegény repüléstantanárt. Madam Hooch szerint az aranycikeszt sebessége 60 m/s, míg Harry Potter Tűzvillám seprűje a 80 m/s végsebességével halad, így Harry hamarosan elkapta a cikeszt. Nevezzük ezt a továbbiakban  $A$  eseménynek!

a) Készítse el a Madam Hoochhoz rögzített  $K$  vonatkoztatási rendszert és a Harry Potterhez rögzített  $K'$  vonatkoztatási rendszert ábrázoló Minkowski-diagramot! A  $K$  vonatkoztatási rendszer léptéke legyen  $100 \text{ m} = 30 \text{ mm}$ , az egyszerűség kedvéért Madam Hooch óráját indítsuk abban a pillanatban, amikor az aranycikeszt elhalad mellette, Harry Potter óráját pedig a cikeszt elkapásának pillanatától.

b) Az  $A$  esemény után kevéssel – Harry órája szerint pontosan 1,5 másodperccel – a lelátón ülő Piton professzort megüti a guta ( $B$  esemény). Madam Hooch szerint a  $B$  esemény 250 méterrel távolabb történt hozzá képest, mint az  $A$  esemény (tehát Harry még a lelátó előtt 250 méterrel kapta el a cikeszt). Ön szerint lehetséges-e, hogy Piton professzort (aki köztudomásúlag ki nem állhatja Harry Pottert) azért ütötte meg a guta, mert Harry elkapta az aranycikeszt? Számolással és szerkesztéssel is válaszoljon a kérdésre!

c) Mekkora az aranycikeszt sebessége Harry szerint? Számolással és szerkesztéssel is válaszoljon a kérdésre!

## Összefoglalás

A (8) összefüggéssel adott skálafaktor meghatározása lehetővé teszi bármilyen, a speciális relativitáselmélet keretei között megválaszolható egydimenziós probléma pontos számszerű megoldását a Minkowski-diagramon való ábrázolással tulajdonképpen egyetlen további képlet ismerete nélkül, csupán geometriai szerkesztéssel (az így elkészített Minkowski-diagram szerkezetébe „bele van kódolva” a Lorentz-transzformáció és ezen keresztül minden, abból származtatható összefüggés). A kidolgozott példa során nem került bemutatásra, de természetesen a sebesség-összeadódási probléma is kezelhető (a mozgó objektum világvonalát az egyik vonatkoztatási rendszerben ábrázolva leolvassuk a meredekségét a másik vonatkoztatási rendszerben), illetve tetzőleges dinamikai probléma is (az időtengelynek az energiatengelyt, a távolságtengelynek pedig az impulzustengelyt feleltetve meg).

Mindez didaktikai szempontból kettős haszonnal jár: egyfelől megkönnyíti a speciális relativitáselmélet megértését, másfelől minden problémát két teljesen eltérő módon oldhatunk meg (képletekkel, illetve szerkesztéssel), így az önmegerősítés (egy diák számára igen fontos) lehetőségét nyújtja.

### Irodalom

1. E.F. TAYLOR, J.A. WHEELER: *Téridő-fizika* – Gondolat Kiadó, Budapest, 1974.
2. VERMES M.: *A relativisztikus távolságmérés* – KöMaL 1973/11
3. HRASKÓ P.: *Relativitáselmélet* – TypoTex, Budapest, 2002.

# FIZIKAVÉRSÉNYEK BORSOD-ABAÚJ-ZEMPLÉN MEGYÉBEN

Ambrózy Béla, Kandó Kálmán Híradástechnikai és Műszeripari Szakközépiskola, Miskolc  
Mester András, Diósgyőri Gimnázium, Miskolc  
Petróczi Gábor, Ságvári Endre Gimnázium, Kazincbarcika

Az egyes tantárgyak népszerűsítésében, színvonalának megőrzésében nagy szerepük van az iskolák közötti megmérettetéseknek, éppen ezért sajnálatos, hogy a tanulmányi versenyek lebonyolítása az utóbbi időben anyagi források és támogatások csökkenése miatt egyre

több nehézségbe ütközik. Igaz volt idő, amikor – egyesek szerint – nagyon megnőtt a számuk, de mára a versenyek versenyében kevesen maradtak talpon.

Jelen cikkben, a megyénkben rendezett, nem országos szervezésű fizikaversenyekről készült összeállítás. A fel-



sorolt versenyek többségét középiskolások számára írták ki. Ahol ettől eltérés van, azt külön jeleztük. Az említetteken kívül még természetesen számos, más megyében és városban is rendeznek helyi szervezésű versenyeket, ezek régióink diákjait azonban ritkán érintik.

## A fizikaversenyek csoportosítása

### Országos versenyek

*Az Oktatási Minisztérium által anyagilag támogatott versenyek*

Országos Középiskolai Tanulmányi Verseny  
Öveges József Fizikaverseny (általános iskolás korúak számára)

Mikola Sándor Országos Tehetségkutató Fizikaverseny  
Vermes Miklós Nemzetközi Fizikaverseny

*Az Oktatási Minisztérium által szakmailag támogatott versenyek*

Országos Szilárd Leó Fizikaverseny (általános és középiskolás korúak számára)

*Egyéb országos versenyek*

Békésy György Fizika Emlékverseny  
Eötvös-verseny (középiskolások és adott évben érettségizettek számára)

### Borsod-Abaúj-Zemplén megyei versenyek

Nagy László Fizikaverseny (gimnazisták számára)  
Törő Gábor Fizika Emlékverseny (szakközépiskolások számára)

### Városi versenyek Miskolcon

Fizikavetélkedő a Diósgyőri Gimnáziumban

A továbbiakban a három, utolsóként szereplő, nem országos szervezésű fizikaversennyel foglalkozunk. Ezek lehetőséget adnak Miskolc város és megyénk tanulói számára a megmérettetésre. A rendezvények népszerűek, általában 10–12 csapat vesz rajtuk részt.

## Nagy László Fizikaverseny

A kazincbarcikai Ságvári Endre Gimnázium igazgatósága és fizika munkaközössége az 1985/86-os tanévben hirdette meg először a Borsod-Abaúj-Zemplén megyei gimnáziumok számára a később Nagy László nevét viselő fizikaversenyt. A verseny célja az volt, hogy a fizika iránt érdeklődő, tehetséges tanulók számára megmérettetési lehetőséget teremtsenek, a tanulók problémamegoldó képessége fejlődjön, emellett cél volt még konzultációs lehetőség teremtése a megye gimnáziumaiban tanító fizikatanárok számára.

A versenyt a jubileumi 15. évtől kezdődően a 10., 11. és 12. osztályos gimnazisták számára hirdették meg. A verseny csapatverseny, amelyen az iskolák évfolyamonként 3 kétfős csapattal vehetnek részt. A versenyre minden iskola

elhozhatja legfőbb három 9. osztályos diákját is, akik írásbeli és gyakorlati fordulón vehetnek részt, de eredményük nem számít bele az iskolák közötti csapatversenybe.

### A verseny lebonyolítása

Az első napon 10.20-kor ünnepélyes megnyitó. Ezután a versenyzők (9–12. osztály) 20 perces írásbeli tesztet töltenek ki, amely 15–20 kiegészítendő, esetleg néhány szóban megválaszolandó kérdést tartalmazó, az elméleti tudás színvonalát felmérő kérdéssorból áll. A teszt megírását követi a kétórás írásbeli feladatsor megoldása, amelyhez függvénytáblázat és zsebszámológép használható. A csapatok teljesítményét évfolyamonként (10–12.) a csapattagok egyéni írásbeli és tesztpontszámainak összege adja.

Az első nap délutánján a legeredményesebb 9. osztályos részvevők számára gyakorlati mérési feladatot adnak, amelyet önálló kísérletezéssel, méréssel, megfigyeléssel kell megoldaniuk. A 9. osztályosok csapatversenyen kívüli eredményét az elméleti és gyakorlati forduló pontszámának összege adja.

A második napon 8.00 órától a 10–12. évfolyam legjobb 4–4 csapata szóbeli, gyakorlati fordulón vesz részt. Az első fordulóban a csapatnak egy bemutatott kísérlet értelmezését kell elvégezni néhány perces gondolkodási idő után.

A második fordulóban a csapatok egy önállóan elvégzendő mérési feladatot kapnak, mely megoldására 20–30 perc áll rendelkezésükre. A munkáról és eredményéről, annak kiértékeléséről 4 percben számolhatnak be a tanulók.

A verseny csapatok és iskolák között folyik. Évfolyamonként az első három helyezett csapatot díjazják. A legjobb iskola vándorserleget kap, amelyet ha három alkalommal elnyer, végleg meg is szerez. A szervezők szükségét érzik az egyéni teljesítmények értékelésének is. Ezért kérik, hogy a részt vevő iskolák lehetőleg ajánljanak fel könyvjutalmat a legkiemelkedőbb teljesítményt nyújtó tanulók részére.

Ha a gimnázium nem kívánja a 10–12. évfolyam minden csapatát indítani, akkor is részt vehet a versenyben, de az összetett eredménybe nem számít bele a teljesítménye.

Az első feladatsorok készítője és a zsűri elnöke a debreceni Kossuth Lajos Tudományegyetem docense, *Nagy László* volt, aki nagyon sokat segített a verseny feltételeinek kialakításában. 1988-tól a feladatsorok összeállítását *Szegedi Ervin*, a Debreceni Kossuth Lajos Tudományegyetem Gyakorlóiskolájának tanára végzi, aki több országos versenybizottságnak is tagja.

### A verseny névadója, Nagy László

1931-ben született Sopronban. A debreceni Kossuth Lajos Tudományegyetemen (KLTE) kitüntetéses diplomával végzett fizika-matematika szakos tanárként. 1962-ben nyerte el a KLTE adjunktusi állását, a fizikatanítás szakmódszertanával foglalkozott. Közel félszáz munkája jelent meg folyóiratokban, könyvekben, amelyeket igen jól használhatnak tanárok és diákok egyaránt. Rendkívül sokoldalú volt, munkáját több kitüntetéssel ismerték el. Nagy Lászlót az 1987-ben bekövetkezett halála után követői és tanítványai a verseny névadójául választották.

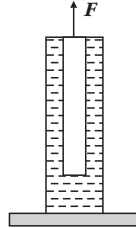
Néhány érdekes feladat a Szegedi Ervin által 2004-ben összeállított feladatsorból

9. évfolyam 2. feladata

A talaj egy pontjáról és a felette  $h = 10$  m magasan lévő pontból egyszerre dobunk el egy-egy acélgolyót egyformán  $v_0 = 10$  m/s kezdősebességgel függőlegesen felfelé, illetve lefelé. Mennyi idő múlva és milyen magasságban találkoznak a golyók? (Számoljunk  $g = 10$  m/s<sup>2</sup> gravitációs gyorsulással!)

9. évfolyam 3. feladata

Egy  $A = 4$  cm<sup>2</sup> alapterületű,  $h = 20$  cm magasságú,  $\rho = 2$  g/cm<sup>3</sup> sűrűségű fémhenger egy  $2A$  alapterületű hengeres edényben lévő vízbe merül. A fémhengert teljesen ellepi a víz, felső lapja az edénybeli víz szintjével van azonos magasságban. A fémhengert lassan kiemeljük a vízből. Jelölje  $x$  a fémhenger elmozdulását!



a) Határozzuk meg, hogy mekkora  $F$  erővel kell tartani a hengert az  $x$  alábbi értékeinél!

$x$ (cm)	0	2	4	6	8	10	12	14
----------	---	---	---	---	---	----	----	----

b) Ábrázoljuk grafikonon a szükséges  $F$  erőt az  $x$  elmozdulás függvényében!

A víz sűrűsége 1 g/cm<sup>3</sup>.

10. évfolyam 1. feladata

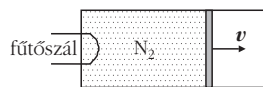
Vízszintes talajon egy kezdetben álló,  $m = 20$  kg tömegű szánkót vízszintes irányú,  $F = 24$  N nagyságú állandó erővel húzunk  $t = 2$  s ideig. A szánkó és a havas talaj közötti súrlódási tényező  $\mu = 0,02$ .

a) Határozzuk meg a szánkó gyorsulását, a vizsgált időszakban általa megtett utat és az elért sebességet!

b) Határozzuk meg, hogy az általunk végzett munka hány százaléka növelte a szánkó mozgási energiáját!

10. évfolyam 2. feladata

Egy vízszintes hengerben nitrogéngáz van. A gázt könnyen mozgó,  $A = 10$  cm<sup>2</sup> alapterületű dugattyú zárja el a külső,  $p = 100$  kPa nyomású levegőtől. A hengerbe zárt gázt egy  $P_f = 5$  W teljesítményű fűtőszállal melegítjük. A fűtőszál által leadott hő 70%-a a nitrogént melegíti. A melegítés hatására a dugattyú egyenletesen mozogva kifelé tolódik a hengerből. Határozzuk meg a dugattyú  $v$  sebességét!

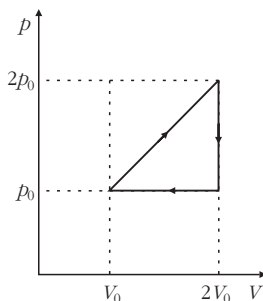


11. évfolyam 4. feladata

Az *ábra* héliumgázzal végrehajtott körfolyamatot mutat nyomás-térfogat grafikonon,  $p_0 = 50$  kPa,  $V_0 = 2$  dm<sup>3</sup>.

a) Határozd meg a gáz által felvett és a gáz által leadott hőt!

b) A körfolyamatot munkavégző körfolyamatnak tekintve, határozd meg a körfolyamat termikus hatásfokát!



Törő Gábor Fizika Emlékverseny

A verseny lebonyolítása

A versenyt először 1976. március 10-én a Kandó Kálmán Híradástechnikai és Műszeripari Szakközépiskola – akkori nevén 2. számú Ipari Szakközépiskola – rendezte meg az intézmény fennállásának 10. évfordulója alkalmából, és azóta is ők szervezik. A verseny gondozója eleinte Szabó Kálmán fizika szakfelügyelő volt. Az ő javaslatára nevezték el a versenyt Törő Gáborról. 1986-ig a Miskolc város szakközépiskoláinak 9 fős (évfolyamonként 3–3–3 tanulóval) csapatai indulhattak. 1987-től kiterjesztették a versenyt egész Borsod-Abaúj-Zemplén megyére, és a csapatok létszámát 6 főre csökkentették (évfolyamonként 2–2–2 tanulóval). A csapatverseny győztesei – a tanulók egyéni jutalmazása mellett – a megyei önkormányzat által alapított vándorszerleget is kezdetől fogva átvehették.

A versenyen a szakközépiskolák 10–11–12. évfolyamának tanulói kétórás dolgozatot írnak. A dolgozatokat a részt vevő iskolák fizikatanáraiból alakult zsűri javítja és értékeli. Az évfolyamonként első három egyéni versenyző, illetve az első három csapat jutalomban részesül.

A feladatokat 1978-tól 1992-ig Horváth Lajos megyei szakfelügyelő állította össze. Őt követően 1992-től Kopcsa József nyugalmazott debreceni tanár állítja össze a feladatsorokat, aki – Szegedi Ervinhez hasonlóan – több versenybizottságnak is tagja.

A feladatlap 12 példából áll, ezekből az egyes évfolyamokból résztvevőknek külön-külön megválasztva, 4–4 feladatot kell megoldaniuk. Lehet foglalkozni több feladattal is, de beadni csak 4 megoldást lehet.

A verseny névadója, Törő Gábor

Törő Gábor (1906–1964) a mai Mezőszemerén született. Matematika-fizika szakos középiskolai tanári oklevelet 1933-ban a szegedi Tisza István Tudományegyetemen szerzett. Egyetemi tanulmányai után Szegeden, Kassán, majd négyéves hadifogság után Miskolcon tanított. 1954-től haláláig a miskolci Kilián György Gimnázium fizikatanára és a fizika tantárgy megyei szakfelügyelője volt. Tanári munkásságának kiemelkedő részét képezték azok a demonstrációs kísérletek, melyeknek többségét saját tervezésű és készítésű eszközökkel mutatott be. A gimnázium politechnikai műhelyében készített eszközöket 1955-ben Budapesten, 1957-ben Miskolcon kiállításokon mutatták be. Szakfelügyelőként sokat tett a kísérletező fizikaoktatás népszerűsítéséért.

Néhány érdekes feladat a Kopcsa József által 2004-ben összeállított feladatsorból

2004/2. feladat

Egy ébresztőóra kis- és nagymutatói 3 cm és 4 cm hosszúak.

a) Melyiknek és hányszor nagyobb a szög-, illetve kerületi sebessége?

b) Pontosan 12 óra után hány perccel lesznek a mutatók végpontjai 5 cm távolságra egy mástól?

c) Pontosan 6 óra után mennyi időnek kell eltelnie ahhoz, hogy a mutatók végpontjai ismét 5 cm távolságra legyenek egymástól?

### 2004/3. feladat

Az egyik oldallapján fekvő szabályos hatszög keresztmetszetű egyenes hasábot a fedőlap egyik éle mentén – anélkül, hogy megcsúszna – felállítjuk.

a) Mekkora munkát kell végezni?

b) Hányszorosára növekedett az alátámasztásra kifejtett nyomás?

A hatszög csúcsait tartalmazó kör sugara 5 cm, a hasáb magassága 20 cm, a test anyagának sűrűsége  $2,7 \text{ kg/dm}^3$ .

### 2004/5. feladat

A 4 Hz frekvenciájú harmonikus rezgőmozgást végző pontszerű test az amplitúdó egynegyed részébe jutott.

a) Az egyensúlyi helyzeten való áthaladást véve alapul, mennyi idő alatt jutott ebbe a helyzetbe a test?

b) Hány százalékkal és hogyan változott meg közben a test sebessége?

Egy másik esetben a testre ható erő a maximális érték egyharmad részével egyezik meg.

c) Mennyi idő alatt következett be a nullátmenet elkövetően?

## Fizikavetélkedő a Diósgyőri Gimnáziumban

2005-ben negyedik alkalommal került lebonyolításra a Diósgyőri Gimnázium szervezésében a hagyományos fizikavetélkedő. Ez a hagyományos versenyektől kicsit eltér. A vetélkedő az iskolák között zajlik. Egyéni értékelés nincs.

A vetélkedőn háromfős csapatok vehetnek részt. A tanulóknak három különböző évfolyamról kell kikerülniük. Az első részben a három tanulónak 12 feladatot kell közösen megoldania egy óra alatt. Ez természetesen csak megfelelő munkamegosztással megy. A második részben minden évben más-más jellegű problémákkal (fizikusok fotó alapján történő felismerése, villámkérdések megválaszolása, grafikonok elemzése) kellett 15 perc alatt megbirkózniuk a versenyzőknek. A feladatokat Mester András, az iskola szaktanára, szaktanácsadó állítja össze. (A rendező iskola tanulói hivatalosan nem indulnak a versenyen.) A dolgozatok javítását az iskola tanárai a csapatokat kísérő kollégák segítségével végzik. A javítás ideje alatt a tanulók számára kísérleti bemutató zajlik.

Néhány feladat a Mester András által összeállított feladatsorokból

### 2002/8. feladat

Milyen távolságra kell lennie a Föld felszínétől egy geostacionárius (a Földhöz képest álló) pályán lévő műholdnak? A gravitációs állandó:  $\gamma = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$ ,  $M_{\text{Föld}} = 6 \cdot 10^{24} \text{ kg}$ ,  $R_{\text{Föld}} = 6,4 \cdot 10^6 \text{ m}$ .

### 2002/11. feladat

A  $0,2 \text{ T}$  indukciójú, homogén mágneses mezőbe egy  $5 \cdot 10^{-6} \text{ C}$  töltésű,  $4 \cdot 10^{-11} \text{ kg}$  tömegű pontszerű részecske

$\sqrt{2} \cdot 10^5 \text{ m/s}$  sebességgel lép be, a részecske sebességének iránya az indukcióvonalakkal  $45^\circ$ -os szöget zár be.

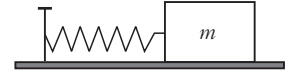
a) Mekkora erő hat a töltésre?

b) Milyen alakú lesz a pályája a homogén mágneses mezőben? Miért?

c) Milyen távolságban tartózkodik a részecske az időmérés kezdetekor észlelt helyétől  $8\pi \cdot 10^{-5} \text{ s}$  múlva?

### 2003/6. feladat

Egy vízszintes helyzetű táblára egy szöghöz rugóval kötünk egy testet. A testet a rugó megnyújtásával távolabb húzzuk a szögtől.



a) Felfelé vagy lefelé kell mozgatnunk a táblát, hogy a test megmozduljon a szög felé?

b) Mekkora a rugó megnyúlása, ha a test a tábla  $2 \text{ m/s}^2$ -es függőleges irányú gyorsulása esetén mozdul meg?

A tábla és a test között a tapadási súrlódási együttható  $0,2$ , a test tömege  $0,2 \text{ kg}$ , a rugó direkciós ereje:  $D = 10 \text{ N/m}$ .

### 2003/8. feladat

Egy  $2 \mu\text{F}$ -os kondenzátort  $20 \text{ V}$ -ra töltünk fel, majd ezután párhuzamosan kapcsoljuk egy feltöltetlen kondenzátorral. Azt találjuk, hogy a feszültsége  $4 \text{ V}$ -ra esik vissza le. Mekkora kapacitása van az eredetileg feltöltetlen kondenzátornak?

### 2004/9. feladat

Egy kelet–nyugat és észak–dél irányú utak kereszteződésénél karambol történt. A nyugatról érkező,  $m_1 = 1000 \text{ kg}$  tömegű autó ütközött a délről jövő  $m_2 = 2000 \text{ kg}$  tömegű autóval. Az összeakadt roncok pontosan északkeleti irányba csúsztak, a csúszás nyomában megállapíthatóan  $50 \text{ km/h}$  sebességgel.

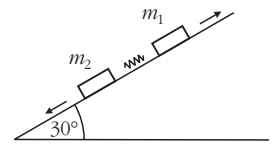
a) Mekkora a roncok lendülete az ütközés után?

b) Mekkora távolságra csúszott el a két összeakadt autó, ha a mozgási súrlódási együttható  $\mu = 0,3$ ?

c) Melyik autó lépte túl a  $80 \text{ km/h}$  sebességhatárt?

### 2005/5. feladat

Egy igen hosszú,  $30^\circ$  fokos lejtőn egy rugó szétlök két testet ( $m_1 = 1,2 \text{ kg}$ ,  $m_2 = 2,4 \text{ kg}$ ). A szétlökés után a testek együttes mozgási energiája  $360 \text{ J}$ . A lejtő és a testek között a súrlódási együttható  $0,2$ .



a) Mekkora sebességgel lökődnek szét a testek?

b) Milyen messze lesz egymástól a két test  $1 \text{ s}$  múlva? ( $g = 10 \text{ m/s}^2$ .)

## Egy kis nosztalgia

Szaktanácsadóként elkezdtem gyűjtögetni az anyagot a korábbi versenyekkel kapcsolatosan. Ez nem megy könnyen. Szerencsére akadnak olyan kollégák, akik megőriztek régi feladatsorokat, jegyzőkönyveket. Ezekből közlök néhány részletet az továbbiakban.

## 1969/70. tanévi fizika feladatmegoldó verseny

Az 1969/70. tanévi fizika feladatmegoldó versenyt a miskolci Földes Ferenc Gimnázium munkaközössége rendezte 1970. január 27-én az előírásoknak megfelelően. A feladatokat *Váradai János* megyei szakfelügyelő állította össze. A jeligés dolgozatok javítását a miskolci 2. sz. Ipari Szakközépiskola (mai Kandó Kálmán Híradástechnikai és Műszeripari Szakközépiskola) fizika munkaközössége végezte *Szabó Kálmán* tanár (Földes Ferenc Gimnázium) vezetésével. Ezen a versenyen 10 iskolából 67 tanuló vett részt.

### A gimnáziumok általános tantervű III. osztályai számára kiírt feladatok

1. feladat: Egy test 270 méter magasságból szabadon esik. Ezt a magasságot osszuk három részre úgy, hogy a test minden útszakaszt azonos idő alatt fusson be!

2. feladat: Az asztal lapjára 2 kp súlyú testet helyezünk, melyet vízszintes irányban, csigán átvett kötélen húz. A kötélen másik végén ugyancsak 2 kp súlyú test függ. Mennyi idő alatt tesz meg a test az asztal lapján 2 méter utat, ha álló helyzetből indul és a súrlódási tényező 0,2?

3. feladat: Egy test, amelynek súlya 100 pond, teljesen benzinbe merítve 20%-kal nehezebb, mint teljesen vízbe merítve. Mekkora a test térfogata, ha a benzin faj-súlya  $0,7 \text{ pond/cm}^3$ ?

## 1970/71. tanévi fizika feladatmegoldó verseny

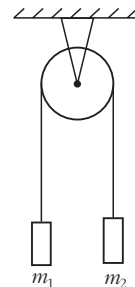
Az 1970/71. tanévi fizika feladatmegoldó versenyt a miskolci Herman Ottó Gimnázium munkaközössége rendezte 1971. február 27-én az előírásoknak megfelelően. A feladatokat *Szombathy Miklós*, az egri Gárdonyi Géza Gimnázium tanára állította össze, és a dolgozatokat is ő javította. Ezen a versenyen 14 iskolából 88 tanuló vett részt.

### A III. osztályos tanulók feladatai a következők voltak

1. feladat: Az *ábrán* látható elrendezésben a testek tömege:  $m_1 = 5 \text{ kg}$ ,  $m_2 = 4 \text{ kg}$ . A csiga tömege 2 kg. A csiga tengelyénél a súrlódás elhanyagolható, a kötélen nem csúszik meg a csigán. Mennyi idő alatt tesznek meg a testek 1 m-es utat?

2. feladat: Megnyújtható-e egy acélhuzal eredeti hosszának 1%-ával? A rugalmassági modulusa  $E = 2,2 \cdot 10^4 \text{ kp/mm}^2$ , szakítási szilárdsága  $88 \text{ kp/mm}^2$ .

3. feladat: Egy szabályos háromszög metszetű prizma egyik lapjára  $60^\circ$ -os szögben esik egy fénysugár. Hogyan halad, ha elhagyja a prizmát? A prizma anyaga gyémánt, törésmutatója  $n = 2,4$ .



## NÉGYSZÖGLETES KERÉK

### 137. PROBLÉMA

Van egy négyzet alakú drótkeretünk, melyre vékony, hajlékony és nyújthatatlan cérnaszázból készített hurkot helyezünk. A zárt hurok hossza megegyezik a négyzet kerületével, és a hurok két átellenes (egymástól ugyanakkora hosszúságú cérnaszálakkal elválasztott) pontját a drótkeret valamelyik átlójának két végpontjához rögzítjük.

A drótkeretet egy másik (vele egy síkban fekvő, és pl. ugyancsak négyzet alakú) nagyobb drótkeretbe foglaljuk, és az egész elrendezést szappanoldatba mártjuk. A kialakuló hártványok közül a cérnaszálon belül levőket kipukasztjuk, a cérnaszálon kívül, de a kisebb négyzetben levő hártványok felületi feszültségét pedig (valamilyen vegyszer hozzáadásával) az eredeti érték felére csökkentjük.

Milyen alakot vesz fel a cérnaszál egyensúlyi helyzetben? (Feltételezhetjük, hogy a cérna – a két rögzített pontját leszámítva – szabadon elcsúszhat a drótkereten.)

(G. P.)

### A 137. PROBLÉMA MEGOLDÁSA

Jelöljük az *1. ábrán* látható módon a kisebb négyzet területét  $t$ -vel, a nagyobb (befoglaló) négyzetét  $T$ -vel, a cér-

naszál által körülfogott, de a kisebb négyzetben kívül eső teljes (4 darabból álló) területet  $T_2$ -vel, a kis négyzetben is és a cérnaszálon is belül eső rész területét pedig  $T_1$ -gyel!

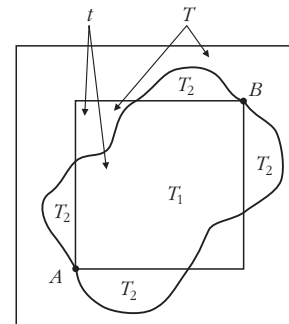
Ha a cérnaszálon és a kis négyzetben kívül eső  $T - t - T_2$  nagyságú felületet  $2\sigma$  felületi feszültségű hártvával borítjuk, a kis négyzetben belüli, de a cérnahurkon kívül eső  $t - T_1$  nagyságú felületet pedig  $\sigma$  felületi feszültségű hártvával, akkor a rendszer teljes (felületi) energiája:

$$E = 2\sigma \cdot (T - t - T_2) + \sigma \cdot (t - T_1) = \\ = K - \sigma \cdot (2T_2 + T_1) = \text{minimum.}$$

Ez a kifejezés  $K$  és  $\sigma$  állandó volta miatt akkor a legkisebb, amikor

$$T_1 + 2T_2 = \text{maximum.}$$

A szappanhártvány feladat megoldása tehát valóban egyenértékű a 136. problémában szereplő (a kis négyze-



1. ábra

ten kívül a benti négyzetméterárnál kétszer drágább telek) ároptimalizálási feladattal.<sup>1</sup>

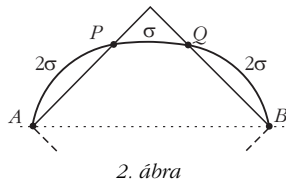
Az optimumfeladatot azzal a mellékfeltétellel kell megoldanunk, hogy a cérnaszál két pontban (az 1. ábrán  $A$  és  $B$ ) rögzített, hossza pedig a négyzet területével egyezik meg. A vizsgálandó feladat az  $AB$  egyenesre szimmetrikus, elegendő tehát a „félmegoldással” foglalkoznunk. A kis négyzet oldalának hosszát *egységnyi*nek választhatjuk (az eredeti problémában ez 25 m, a kerítés teljes hossza 100 m volt, ezeknek megfelelő megoldás arányos nagyítással kapható az „egységnégyzetből”).

Tekintsük tehát a 2. ábrán látható elrendezést: mindkét végén rögzített (hajlékony és nyújthatatlan) cérnaszál, amelyre az  $AP$  és  $QB$  görbeszakaszokon kívülről  $2\sigma$  felületi feszültségű hártya feszül, a  $PQ$  ív mentén viszont csak  $\sigma$  a hártya felületi feszültsége. A cérnaszál hossza  $A$  és  $B$  között ugyanakkora, mint a négyzet fél kerülete, vagyis 2 egységnyi.

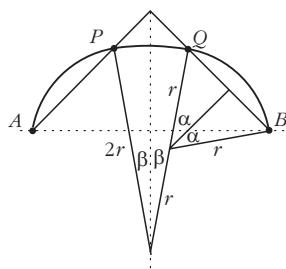
Vizsgáljuk most a problémát az erők egyensúlya szempontjából! A cérnaszál mindenhol ugyanakkora ( $F$ ) nagyságú erő feszíti; ellenkező esetben a szál valamely darabkája elmozdulna az érintője irányában. Másrészt a szál az érintőre merőlegesen sem mozdul el, ez pedig akkor teljesül, ha a felületi feszültségből származó (hosszegységenként  $\sigma$ , illetve  $2\sigma$  nagyságú) erő egyensúlyt tart a szál görbültségéből adódó, hosszegységenként  $F \cdot G$  nagyságú erővel. ( $G$  a szál görbülete, a simulókör görbületi sugarának reciproka.)

Az elmondottak alapján az energiaminimumot szolgáló „optimális megoldásban” a cérnaszál görbülete szakaszonként állandó, tehát körívekből áll, de a felületi feszültségek (az eredeti feladatban a telekárak) különbözősége miatt az  $AP$  és  $QB$  körívek sugara fele akkora, mint a  $PQ$  körív. A  $P$  és a  $Q$  pontokban – ugyancsak az erőegyensúly miatt – a körívek törésmentesen, folytonosan változó érintővel csatlakoznak egymáshoz, továbbá a három körív teljes hossza 2 egység kell legyen. Ezek a megszorítások már – elemi geometriai összefüggésekkel – meghatározzák a körívek sugarát és az ívek középponti szögeit.

<sup>1</sup> Az érdekes fizikai–közgazdasági ikerfeladványt – a problémát eredetileg megfogalmazó – V. Sedach (Seattle, USA) más geometriai feltétellel adta meg egy internetes versenyen. A *Négyyszögletes kerék* hangulatához közelebb álló változatot Nagy Győző (Budapest) dolgozta ki.



2. ábra



3. ábra

A 3. ábra jelöléseit követve felírhatjuk, hogy

$$r \cdot 2\alpha + 2r \cdot \beta = 1,$$

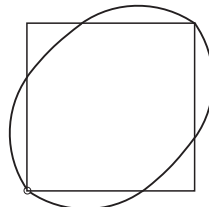
$$\alpha + \beta = \frac{\pi}{4},$$

$$r(\sin\beta + \cos\beta) = \frac{1}{\sqrt{2}},$$

melyekből  $r = 2/\pi$ , valamint  $\cos\alpha = \pi/4$ , azaz  $\alpha = 38,2^\circ$  és  $\beta = 6,8^\circ$  adódik. A teljes megoldás megoldás vázlatos rajza a 4. ábrán látható.

*Megjegyzés:* A megoldás során (a feladat szimmetriájára gondolva) hallgatólagosan feltettük, hogy a cérnaszál (illetve a 136. problémánál a kerítés) nemcsak az  $AB$  egyenesre, hanem annak felező merőlegesére is szimmetrikus, vagyis hogy a kerület összesen 6 körívvel rakható össze. Ez egyáltalán nem nyilvánvaló! Ha egy szívószál két végére egy-egy szappanbuborékot illesztünk, a pontosan egyforma sugarú buborékok esete egyensúlyi állapotnak felel meg, azonban ez az állapot *instabil*, az összenergiának *nem* minimuma. A stabil egyensúlyi állapotban (energiaminimumban) az egyik buborék sugara nullává válik, s a gáz teljes mennyisége a másik buborékba kerül, tehát az elrendeződés aszimmetrikus lesz, jóllehet a probléma tükörszimmetrikus! Hasonló módon elképzelhető lenne, hogy a 3. ábrán látható szimmetrikus állapot egyensúlyi ugyan, de *instabil*, és a stabil egyensúly aszimmetrikus: a  $P$  és az  $A$  pont egybeesik, a teljes határgörbe pedig nem 6, hanem csak 4 körívvel áll. Ténylegesen nem ez a helyzet, de a megnyugtató megoldásnak ezen lehetőség vizsgálata is részét képezi.

(G. P.)



4. ábra

## 138. PROBLÉMA

Egy tavon lebegő, álló vízibicikliről fejest ugrik a tóba egy gyerek. Melyik állítás igaz a vízibicikli és a gyerek vízszintes irányú lendületére az ugrás pillanatában?

a) Vízibiciklinek és a gyereknek azonos lesz a lendülete.

b) Egyenlő nagyságú, de ellentétes irányú lesz a lendületük.

c) A gyereknek nagyobb, a vízibiciklinek ezzel ellentétes irányú és kisebb lesz a lendülete.

(A 2005. évi középszintű fizika érettségi egyik – *bibásan értékelt* – feladata.)

Szerkesztőség: 1027 Budapest, II. Fő utca 68. Eötvös Loránd Fizikai Társulat. Telefon/fax: (1) 201-8682

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

Kiadja az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, felelős: Németh Judit főszerkesztő.

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

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

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

Megjelenik havonta, egyes szám ára: 700.- Ft + postaköltség.

HU ISSN 0015-3257

## ALAP- ÉS ALKALMAZOTT KUTATÁSOK AZ UKRÁN NEMZETI TUDOMÁNYOS AKADÉMIA ELEKTRONFIZIKAI KUTATÓINTÉZETÉBEN

Az Ukrán Nemzeti Tudományos Akadémia (UNTA) Elektronfizikai Kutatóintézete (EFKI) az első akadémiai kutatóintézet Kárpátalján, amely az UNTA elnökségének határozata alapján jött létre 1992 szeptemberében. Ez az egyetlen olyan kutatóintézet Ukrajna nyugati vidékén, ahol modern kutatások folynak az atomfizika, az elektron-atom ütközések fizikája, az alacsony energiájú magfizika, a fémgözlézerek fizikája, valamint kristálynövesztési és vékonyrétegek technológiáinak kidolgozása terén.

Az EFKI megalakulásának előzményei még a múlt század 60-as éveinek végére és 70-es éveinek elejére nyúlnak vissza, amikor is Ungváron létrejöttek az akadémiai és az ágazati kutatások első hajtásai. Így 1969 szeptemberében megalakult az Ukrán Szovjet Szocialista Köztársaság (USZSZK) Tudományos Akadémiája Fizikai Kutatóintézetének Fotonukleáris Folyamatok Osztálya, amely 1970-ben az akkor létrejött Magfizikai Kutatóintézetbe került át. Az osztály első vezetője *V.O. Skoda-Uljanov* (1927–1978) professzor volt, aki előtte az Ungvári Állami (ma Nemzeti) Egyetem Magfizikai Tanszékét vezette. Rövidesen, 1970 januárjában megalakult az USZSZK Tudományos Akadémiája Elméleti Fizikai Kutatóintézetének Hadronelemtani Osztálya. Ennek kezdeményezője és vezetője (1978-ig) *J.M. Lomszadze* (1924–1988) professzor volt, aki addig az egyetem Elméleti Fizikai Tanszékét irányította.

1981 júliusában az említett két osztály és az egyetemről átjött kutatók egy nagyobb csoportjából megalakult az Akadémia Magfizikai Kutatóintézetének Ungvári Fiókjá. E fiókinézet szervezője és első vezetője (1987-ig) *I.P. Zapiszocsnij* (1922–2001) professzor volt, aki előtte az egyetemen megalapította és vezette előbb az Optikai, majd a Kvantumelektronikai Tanszékét. A fiókhoz 1986-ban csatlakozott az Össz-szövetségi Monokristály Kutatóintézet ungvári laboratóriuma, melynek vezetője *M.I. Holovej* professzor volt.

Tíz év megfeszített munka eredményének köszönhetően az ungvári fiókinézetben megépült egy sor eredeti tudományos berendezés, közben olyan kutatási módszereket fejlesztettek ki, melyek révén az atomfizika, a magfizika, a kvantumelektronika, a lézerezés, a besugárzásos anyagkutatás aktuális területén világszínvonalon folyhattak kutatások. A fiókinézet számbelileg is fokozatosan bővült, azonban különösen minőségileg fejlődött. Rendelkezett saját tudományos kutatási irányzatokkal, volt tudományos tanácsa, aspirantúrája, könyvtára, alkatrészkészítő műhelye. Az említett idő alatt készült el az új jelentős méretű laboratóriumi épületkomplexum terve, majd elkezdődött az építkezés, amely 1992-ben sikeresen be is fejeződött. Mindez elősegítette, hogy ezen év szeptemberében – mint említettük – megalakulhatott az UNTA Elektronfizikai Kutatóintézete.

Az intézet tudományos kutatásainak főbb irányzatai a következők:

- elemi folyamatok és jelenségek kutatása, melyeket alacsony és közepes ütközési energiával rendelkező elektron-, ion-, foton-, és molekulanyalábok egymással és a kondenzált állapotú anyaggal való kölcsönhatásuk vált ki;
- elemi folyamatok és gerjesztési mechanizmusok kutatása gázlézereknél, új típusú lézerek, optikai anyagok és kvantumelektronikai műszerek kifejlesztése és megépítése.

Az intézetben 7 tudományos osztály működik közel 70, kutatással foglalkozó munkatárssal, közülük 11-en a tudományok doktori, 35-en pedig kandidátusai. Az intézet korszerű kutatási felszereléssel és eredeti berendezésekkel rendelkezik. Itt említhető meg a 25 MeV energiájú elektronrotyorsító (M-30 mikrotron), a gázdinamikai atom- és molekulanyaláb-forrás, a nehéz atomok alacsonyban fekvő héjainak kisugárzását és ionizációját vizsgáló elektronütközéses berendezés, a széles hullámhosszhatárok között változtatható festéklézer, a szilárdtestek ultravákuumban történő kutatására alkalmas berendezés, kristálynövesztő és különböző módszerek segítségével történő vékonyrétegek felvívó berendezések. Ezenkívül az intézet korszerű számítástechnikai eszközökkel rendelkezik, beleértve a kísérleteket vezérlő számítógépes mérőrendszereket.

Az eltelt évek alatt az intézet munkatársai közül heten a doktori, 14-en pedig a kandidátusi értekezésüket védtek meg. Az intézet működését fémjelzi, hogy több kutatója szerzője volt öt tudományos monográfiának, s ezek közül kettő angolul jelent meg. A munkatársak által, csak a folyóiratokban publikált cikkek száma meghaladja a kétszázat, méghozzá többségük külföldön és igen rangos lapokban jelent meg. Az intézet hét kutatója megkapta Ukrajna Állami Díját a tudomány és a technika terén elért eredményekért, ugyancsak heten az UNTA kiváló tudósairól elnevezett díjak kitüntetettjei lettek.

Az EFKI több nemzetközi konferencia és más tudományos fórum rendezője volt. Ezek közül csak a legfontosabbakat említjük meg: *Atomí ütközések folyamatai* háromszög-szeminárium (Ungvár–Debrecen–Miskolc) (kezdeményezője: *Berényi Dénes* akadémikus, 1992, 1993),

Cím: Universzitetzkaja u. 21., 88017 Ungvár, Ukrajna. A kézirat nem felkérésre, hanem önálló kezdeményezésből született, és bár az intézet nem a magyar határokon belül működik, örömmel közöljük ebben a rovatban.

*Hadronok-94* munkatalálkozó (1994), *Infravörös optoelektronika anyagtudománya és anyagainak tulajdonságai* (1996), *Száz éves az elektron* (1997), *Nem-euklideszi geometria a modern fizikában* (1997), *Nemzetközi ukrán–magyar szeminárium a sugárzásos gyógyításról* (1999), *Elemi folyamatok az atomi rendszerekben* európai konferencia (2000). Évente az intézet 5–6 munkatársa utazik külföldi konferenciákra, amelyeken bemutatják legújabb eredményeiket. Néhányan huzamosabb ideig vendégkutatók voltak Németországban, Nagy-Britanniában, Franciaországban, Hollandiában, Belgiumban, Ausztriában, Olaszországban, Lengyelországban, Magyarországon, Szlovákiában, az USA-ban. A közös kutatások újabb gyümölcsöző személyes kapcsolatok kiépítéséhez vezettek, ami sokszor döntő momentumnak számít a külföldi pályázatok elnyerésénél. A hazaiak mellett eddig az intézet négy Soros-, egy INTAS (*International Association for the Promotion of Cooperation with Scientists from the Independent States of the Former Soviet Union*), és két CRDF (*Civilian Research and Development Foundation*) ösztöndíjat nyert el.

Az eltelt évek alatt az intézet gyümölcsöző kapcsolatokat épített ki sok tudományos intézménnyel, többségükben külföldiekkel. A kapcsolatok elsősorban egyéni kezdeményezésekre jöttek létre a kutatási témáknak megfelelő tanszékekkel, osztályokkal, laboratóriumokkal. Ezen intézmények közül csak azokat említjük meg, amelyekkel szoros együttműködés alakult ki. Ezek az MTA Atommagkutató Intézete (Debrecen), a Gdanski Műszaki Egyetem, a Cseh Műszaki Egyetem (Prága), a Fizikai Kutatóintézet (Pozsony), a Szilárdtestfizikai Kutatóintézet (Szófia), a Manchesteri Egyetem, a Nashville-i Egyetem, a Dubnai Egyesített Atommagkutató Intézet.

Megemlítendő még, hogy intézetünk több kutatója tagja az MTA Szabolcs-Szatmár-Bereg megyei Tudományos Testületének (1992-ben alakult meg), valamint a Magyar Professzorok Világtanácsának (MPV, 1998-ban alakult meg), melyeknek kezdeményezője és elnöke *Kecskés Mihály* professzor. A Testület évente rendszeresen megrendezett munkakonferenciáin aktívan részt vesznek kutatóink, beszámolni legújabb eredményeikről. Ugyancsak a tudományos kapcsolatokat gazdagítják az MPV munkatalálkozó, valamint a DAB-ban Berényi Dénes akadémikus vezetésével két évente megtartott tanácskozások, melyeken a tudomány és az oktatás problémáival foglalkoznak a résztvevők, köztük többen az intézetünkből is.

## Alapkutatások: irányzatok és eredmények

Az intézet elsősorban alapkutatásokkal foglalkozik.

Az *Elemi Kölcsönhatások Elmélete Osztályon* továbbfejlesztik és széleskörűen alkalmazzák a többrészecskes rendszerek leírására szolgáló olyan hatásos kvantumelméleti módszereket, mint például az átlózási módszert, a hipergömbfüggvény-koordináták módszerét, a sűrűségfüggvény elméletét, a Hartree–Fock, a konfigurációkeverés, a reakciócsatornák erős kötődése és az optikai potenciál módszerét. Úgyisgint a kutatások tárgyát képezik a kvantumelmélet általános kérdései, a Maxwell- és Dirac-egyenletek pótlólagos szimmetriái, ezek következményei. A felsorolt módszerek alapján sokoldalú programcsomagokat dolgoztak ki az atomfizikában és az elemi részek fizikájában adódó bonyolult feladatok megoldására. Ezen programok megfelelő nagyteljesítményű számítógépeken futnak.

Az eredmények közül csak a legfontosabbakat ismertetjük. Kiszámították több atom és pozitív ion autoionizációs állapotainak (AIÁ), valamint negatív ionok autoleváló (*autodetaching*) állapotainak energiáit és szélességeit. Leírták azokat a rezonanciastruktúrákat, melyeket az intézetben és másutt elvégzett kísérletekből nyert elektron–atom és elektron–ion szóródás hatáskeresztmetszeteiben figyeltek meg. Az AIÁ-k által előidézett pótlólagos rezonanciákat jósoltak meg a munkatársak több atom sokfotonos ionizációjának teljes és differenciális hatáskeresztmetszetein. A háromrészecske-rendszerek esetében a szög- és radiálkorrelációk járulékaiknak számítása során sikerült kilépni az adiabátikus közelítés kereteiből. Lényeges eredmények születtek az elektromágneses térrősség fogalmára alapozott klasszikus és kvantum-elektrodinamika kidolgozásában. Az utóbbiban megalkották a definit metri-kájú axiomatikus elméletet. A fent említett egyenletekre egy sor geometriai, valamint nem geometriai szimmetriákat kaptak, kivizsgálták a spinor és az elektromágneses mezők közötti összefüggéseket. A szabad elektromágneses mező esetére teljes leírást nyert az elsődleges megmaradási törvények csoportja.

Az *Ionfolyamatok Osztályán* alacsony energiájú monoenergiás ( $\Delta E = 10\text{--}20$  meV) elektronok atomokkal, ionokkal, molekulákkal és szilárd felülettel történő ütközései során fellépő folyamatokat tanulmányozták. A kutatásokat főleg egymást metsző részecskenyalábokkal végzik, alkalmazva a foton-, elektron-, küszöb- és metastabil-spektroszkópiát. E kutatások megvalósításához több eredeti berendezést és módszert fejlesztettek ki a munkatársak, közöttük nagy hatású, kisméretű elektron-, atom- és ionforrásokat, elektron-monokromátort és -analizátort, hipocikloidális elektron-spektrométereket, semleges és töltött részecskék detektorait.

A kísérletekből nyert adatok elsősorban a rugalmas és rugalmatlan ütközések hatáskeresztmetszeteire vonatkoznak. Sikerült észlelni és megbízhatóan tanulmányozni ezen görbék energiafüggő finomsztruktúráját, amely a görbék nem monoton – extrémumok (maximumok és minimumok) váltják egymást – viselkedésében nyilvánul meg. Kimutatták, hogy a struktúrák küszöb- és rezonanciajelenségei (rövid életű negatív ionok keletkezése és bomlása) a lassú, szórt elektron és az autoionizáció következtében emittált elektronok közötti, ütközések utáni kölcsönhatás, illetve a kinematikus (az elektron által a célatomnak átadott impulzussal összefüggő) jelenségek következményei is lehetnek. A hidrogént és deutériumot tartalmazó egyszerűbb molekulák disszociációs ionizációjánál, amelyet alacsony energiánál végbemenő elektronütközés vált ki, felfedezték az úgynevezett izotopikus eltolódást. Az alacsony energiájú elektronok hátraszóródásánál a germániumnál új felületi elektronállapotokat mutattak ki.

Az *Elektronfolyamatok Osztályán* kísérleti kutatások folynak az atomok és az ionok belső elektronhéjaiban végbemenő folyamatokkal kapcsolatban, amelyek az elektronokkal való ütközéskor keletkeznek. A kutatásokban elektron-, foton- és röntgenspektroszkópiai módszereket alkalmaznak. A kísérletekhez korszerű berendezéseket építettek a munkatársak, eredeti készülékeket fejlesztettek ki a mérésekhez.

A kutatások főbb eredményei a következők: 1) a belső elektronhéjak lényeges hatása az AIÁ-k gerjesztési függvényeire; 2) a rezonanciafolyamatok domináló jellege a kálium- és a stronciumatomok p-alhéjainak gerjesztésekor a küszöbenergia közelében; 3) korreláció léte azon elektronok között, amelyek a kálium legbelsőbb K-héját hagyják el az atom ionizációjakor, és ilyen korreláció hiánya a bárium L-héjának ionizációja esetében; 4) a rezonanciafolyamatok lényeges hatása a tallium átmeneteinek elektronokkal való gerjesztésénél a küszöb közelében, amikor is a lassú elektronokat befogja az ion, létrejönnek a semleges atom AIÁ-i, melyek spontán elbomlanak gerjesztett állapotú ionokra; 5) monoenergiás elektronok cink-, kadmium- és tallium-ionokkal való ütközések kimutatták, hogy az AIÁ-k sugárzásos szétválása, melyeket nem vesznek figyelembe az elméleti számításoknál, lényegesen megváltoztatja a küszöb melléki gerjesztési keresztmetszeteiket, erősen csökkenti a rezonanciaerjesztés járulékát, valamint a tiltott optikai és az interkombinációs átmenetek keresztmetszetei közel olyan nagyságúak, mint az engedélyezett optikai átmenetek gerjesztési keresztmetszetei.

A *Kvantumelektronikai Osztály* kutatásai fémgözlézerek, kémiai vegyületek tartalmazó, plazmadinamikus és excimerlézerek inverz állapotainak létrehozásával, valamint a nagy teljesítményű lézersugárzás és a szabad atomok kölcsönhatását kísérő nemlineáris jelenségek tanulmányozásával kapcsolatosak. A kutatások elvégzésére az osztályon korszerű kísérleti bázist hoztak létre, amelyben megtalálható holográfberendezés, excimer- és változtatható hullámhosszú festéklézer, impulzus üzemmódban működő plazmasugárforrás, repülésidő-tömegspektrométer, gyors működésű oszcillográfok.

Az osztály munkatársai kidolgozták a lézerek aktív közegei plazmájának, valamint a sugárzási szintek populációkinetikájának kísérleti diagnosztizáló módszereit. A rézgőzlézer atomjaiban lévő metastabil nívók téridő relaxációjának elemzése következtében először sikerült megállapítani, hogy az önkorlátozott átmeneteken alapuló lézerekben az impulzusközi időtartam alatt az aktív közeg tüzemképségének visszaállításánál a lézeryanyag alapállapotban lévő atomjainak koncentrációredukciója játsza a főszerepet. Az atom-molekuláris bizmutgőz aktív közegű lézereknél kimutatták, hogy a generálásnál a dimérek disszociációs gerjesztése a legfontosabb. Első alkalommal sikerült generálást elérni – excimer ArF-lézer sugárzását alkalmazva – a bizmut diméreinek fotodisszociációs gerjesztésénél. Ukrajnában elsőként építettek olyan excimerlézert, amelynél röntgen-előionizációt alkalmaztak. Széles hullámhossztartományban változtatható lézer segítségével részletesen tanulmányozták a nátrium alsó nívóinak háromfotonos ionizációját és rezonanciagerjesztését. A színekép látható tartományában az itterbiumatom három- és négyfotonos ionizációjánál új nívókat sikerült megfigyelni. Kimutatták, hogy – ellentétben az alkáliföldelemekkel – ennél az atomnál a pótlólagos f-héj lényeges hatással van az ionizációra.

A *Fotonukleáris Folyamatok Osztályán* a kutatások zöme az M-30 mikrotronon bonyolódik. Ez az Ukrajnában egyedülálló gyorsító 25 MeV energiájú képes felgyorsítani az elektronokat, amelyeknek, vagy az általuk létrehozott fékezési sugárzás hatására keletkeznek a tanulmányozandó folyamatok. A berendezésben a 0,02% hibahatárt nem meghaladó monoenergiájú elektronok árama eléri az 50 mikroamperet.

A nehéz atommagok széles skáláján az E1 óriásrezonancia tartományában a munkatársak tanulmányozták a  $(\gamma,\gamma)$ - és  $(\gamma,n)$ -reakciókban az izomérállapotok létrejöttének hatáskeresztmetszeteit, ezeknek arányát az alapállapotokhoz viszonyítva, más szóval az izomérarányokat. A kísérleti eredményekből a Fermi-gázból kiinduló statisztikus magelmélet Bethe-Bloch-képletén keresztül következtettek az arányok függőségére az alap- és az izomérállapotok spinjeinek különbségéből. Ugyancsak kiszámították az úgynevezett spin-határparaméter azon értékeit, amelyeknél a kísérlet egyezik az elmélettel. Ezen értékek a deformált magoknál 2–3-szoros eltérést mutatnak az elméleti képletekből számítottaktól, ami az elmélet még meglévő hiányosságaira utal. A Th, U, Np és Am egyes izotópjainak fotobomlásánál vizsgálták a neutronok idő- és energiaspektrumait, kiszámították a megfelelő hatáskeresztmetszeteiket. Továbbá a bomlásnál létrejövő különböző magokra megmérték a kumulatív hozamokat. A kísérleti adatokból energia- és impulzusmomentum-függésekre következtettek, kiszámították a bomlási termékek anizotrópiáit.

Az osztály elméleti részecskefizikai kutatásai elsősorban a nagy energiájú proton–proton és antiproton–proton ütközésekkel kapcsolatosak. A tripólusú módosított Regge-modellben sikerült jó leírást kapni az említett folyamatok gyorsalmas differenciális és teljes hatáskeresztmetszeteire, valamint a  $\sigma_{tot}/\sigma_{el}$  arányra. Ugyancsak jó leírást nyertek a proton szerkezetfüggvényei.

A *Kvantumelektronika Optikai Anyagainak Osztályán* kidolgozták a nagyméretű ( $d = 60$  mm,  $b = 60$  mm) paratellurit, valamint a tetraborát-lítium kiváló tisztaságú egykristályok előállításának technológiáját. Az utóbbi ötvözőt általában is növesztik a laboratóriumomban. A kapott egykristályokat széles körű fizikai vizsgálatnak vetik alá. Például mérték a tetraborát-lítium dielektrikus állandójának függését a hőmérséklettől és a besugárzás frekvenciájától, termoluminenciás karakterisztikáját, elnyelési tulajdonságát, az energianívókat stb. Az olvasztott közegből húzással olyan egykristálynövesztést fejlesztettek ki, amikor a közeg nem érintkezik az edény falával. Az osztályon fontos irányzat a vékonyréteg-bevonatok létrehozása az előállított egykristályokon, s ezek fizikai tulajdonságainak tanulmányozása. Itt elsősorban a fényelnyelő, -osztó és -áteresztő karakterisztikák vizsgálata fontos. Kutatásokat folytatnak gazdaságos napelemek létrehozására. Sikerült előállítani elasztikus anyagon olyan napelemet, amelynek a hatásfoka ugyan csak 1% körül mozgott, de könnyen kezelhető és olcsó.

A *Kristályfizikai Osztály* fő figyelmét az  $A^2B^5$ ,  $A^3B^5$  típusú félvezető kristályok megaelektronvolt nagyságrendű energiájú elektronokkal való besugárzásnál keletkező elektrofizikai és optikai karakterisztikák törvényszerűségeinek és ezen anyagok radiációs hibáinak keletkezési és kilégvási mechanizmusának feltárására irányítja. Az utóbbi néhány évben fontos téma lett a különböző üvegmátrixokba ágyazott nanostruktúrák tanulmányozása nagy nyomásnál, lézerbesugárzásnál stb. Az említett irányzatokban az osztály szép eredményekkel büszkélkedhet. A fotolumineszcenciánál kimutatták például, hogy az elnyelési határ a rövid hullámok felé tolódik el. Az elektronbesugárzás hatásának tanulmányozása során az  $A^3B^5$  monokristályoknál arra a következtetésre jutottak, hogy a töltéshordozók szóródásának fő mechanizmusa a radiációs hibákat övező kristály-

rács deformációin való szórásban rejlik. Az említett besugárzásnál tanulmányozták a szennyeződés hatását az optikai elnyelési spektrumra és a fotolumineszcenciára, új állapotokat fedeztek fel a sugárzási hibák alacsony hőmérsékletű kilégvátsánál. Kimutatták továbbá, hogy egyes kristály nagy energiájú (15 MeV-ig) elektronokkal való besugárzásának esetén a töltéshordozók mozgékonyságának nem monoton függését az elektronfluxustól, ami a sugárzás ideje alatt a hibakomplexumok átrendeződésének a következménye. Más anyagokkal ellentétben ezek az anyagok a koncentráció és a hordozók mozgékonytsága dózisfüggvényének sajátossága alapján magas szintű sugárzási rezisztenciával bírnak. A paratellurit monokristályoknál az optikai spektrum vizsgálata rámutatott arra, hogy bennük a 10 MeV energiájú elektronbesugárzás hatására olyan hibák keletkeznek, amelyekben oxigénvakanciák vannak.

## Alkalmazott kutatások

*Lézerfizika.* A múlt század 80-as éveinek második felében még a kutatóintézet elődjében megépítettek egy XeF excimerlézert, melynek impulzusa elérte az 1 J-t 10 Hz frekvenciánál. Ez a lézer sikeresen működött egy ózónmérő (lidár) berendezés részeként. Ugyancsak egy kisebb ózónmérő blokkjaként elkészült egy alacsonyabb teljesítményű elektromos kisüléssel gerjesztendő XeCl-lézer, amely 308 nm-en sugárzott 200 mJ energiájú impulzusüzemben. Ebben a lézerben a hullámhossz változtatható volt, mégpedig az első komponens 353 nm-nél 15 mJ, a második komponens 414 nm-nél 4 mJ energiát vitt magával.

A világűrben szükséges kommunikáció és a tengerek felületének ökológiai vizsgálata céljából kidolgozás alatt áll egy a zöld-kék hullám-sávban sugárzó előzetes röntgenionizációs excimerlézer, valamint egy olyan lézer, amely az infravörös sugárzást láthatóvá tévő berendezésben fog működni.

Az ungvári városi kórházzal közösen kidolgozták a lézer alkalmazását a vér intravénás besugárzásában. Ez a vizsgálati és gyógyítási mód-szert még ma is megállja helyét a kórházban.

*Magfizika.* Nagy jelentőségű munkának bizonyult a mikrotron hasznosítása, mint technikai módszer, a nyersolajban és származékaiiban lévő nehézfémek koncentrációjának és mennyiségének meghatározására. A besugárzás egyidejű hőkezeléssel történt, hogy a frakciókra gyakorolt hatást is lehessen vizsgálni. A hőmérsékleti sáv 50 és 340 °C között volt, míg az elektronok energiája elérte a 15 MeV-et. A kísérletek a következő vizsgálatokat ölelték fel: 1) a nyersolaj frakcióösszetételének; 2) a kémiai elemek frakciók közötti átcsoportosulásának; 3) a nyersolaj szállítására, tartálékolására, feldolgozására hatással lévő paraméterek és 4) a származékok paraméterváltozásainak tanulmányozása. A kidolgozott neutron- és gamma-aktivációs módszerrel nemcsak nyersolajban, hanem aranytartalmú ércben is meg lehetett állapítani a mikroelem-tartalmat. Ezen elemzéseket alkalmazzák a nyersolaj nehézfémektől való megtisztításánál, az ércben lévő arany mennyiségének meghatározásánál is.

A mikrotron sterilizálásra is alkalmazható. Például a sebészszekéket és az ivóvizet lehet csíramentesíteni vele. A cukorgyárakból kifolyó szennyvízben még a  $10^6$  Rg besugárzás sem tudta megtisztítani a mel-léktermékeket az erjedést okozó baktériumoktól.

Széles körű alkalmazást nyert a gamma-spektrometria is. Az elemek kimutatása és mennyiségük meghatározása a vérben, a vizekben, a talajban, a levegőben és más közegekben gyakran és szinte rutinszerűen megy végbe. A megrendelők széles köre veszi igénybe a munkatársak ilyen szolgáltatásait, amit gyakran ingyen is elvégeznek.

A mikrotron hasznosítható a világűrben jelenlévő sugárzás imitálására is. A munkatársak megszerkesztettek egy olyan berendezést, melynek segítségével tanulmányozható a sugárzás hatása a mérőműszerekre, készülékekre. A berendezés segítségével vizsgálták a félvezetőket, a vékonyrétegeket viselkedését nagy intenzitású és dózisú besugárzás után. Az eredmények alapján döntöttek el, hogy a műszer vagy a készülék megbízhatóan viselkedik-e a világűrben.

*Monokristályok, vékonyrétegek.* Az intézetben, mint említettük, külön osztály foglalkozik egykristályok növesztésével és vékonyrétegek felvitelével bizonyos alapokra vagy az előállított monokristályokra.

Legnagyobb mértékben a TeO<sub>2</sub> paratellurit egykristály növesztésével és paramétereinek tanulmányozásával foglalkoznak az osztály munkatársai. Az eddig kidolgozott technológiával optikailag nagyon tiszta és viszonylag nagyméretű (lásd följebb) paratellurit egykristályokat növesztenek, majd megrendelés szerint ezeket metszik, csiszolják. A kristályokat elsősorban akusztikai–optikai spektrométerekben alkalmazzák. Szállítottak már olyan megrendelőnek is, aki a bor és a vodka szesztartalmát meghatározó mérőműszerbe építette be a megfelelően előkészített kristályt.



Érdekes és perspektivikus a lítium-tetrabor ( $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ) egy- vagy polikristály. E vegyület fontos tulajdonsága, hogy a radioaktív sugárzással szembeni ellenállóképessége megfelel az emberi testszövetnek, vagyis alkalmazható sugárdózsát mérő műszerekben. Az intézetben továbbra is folynak a kutatások ebben az irányban.

Még 15 évvel ezelőtt fontos szerepet töltött be a prouzit ( $\text{Ag}_3\text{AsS}_3$ ) növesztése. Ezt a kristályt univerzálisnak is lehet nevezni tulajdonságai miatt: egyidejűleg félvezető, nemlineáris optikai kristály. Piroelektromos, piezoelektromos, akusztikai–optikai sajátosságai elterjedté tették a műszergyártásban. Továbbá kettős fénytörésű, és a nemlineáris kristályok között rekordtartó a fényáteresztő-képességben (0,6–13  $\mu\text{m}$ ). Használható az infravörös sugárzás láthatóvá tételére. A lézerekben generálja a második harmonikus rezgést, vagy, mint parametrikus generátor, transzformálja a sugárzást az 1,22–8,5  $\mu\text{m}$  sávba. Régebben, az intézet elődje sok megrendelőnek szállította ezeket az egykristályokat (átmérő 40 mm, hossz 60–80 mm).

Itt csak felsoroljuk azokat az egykristályokat, amelyeket szintén az intézetben (vagy az elődjében) növesztettek és szállítottak a megrendelőnek: a pirargirit ( $\text{Ag}_3\text{SbS}_3$ ), az ezüst-tiogallát ( $\text{AgGaS}_2$ ), a kadmium-tiogallát ( $\text{CdGa}_2\text{S}_4$ ), a tallium-tioarzenát ( $\text{Tl}_3\text{AsS}_4$ ) és analógjai ( $\text{Tl}_3\text{PS}_4$ ,  $\text{Tl}_3\text{PSe}_4$ ,  $\text{Tl}_3\text{AsSe}_4$ ), a kadmium-tiogallát ( $\text{CdGa}_2\text{S}_4$ ).

Az intézetben a vékonyrétegek előállítására kidolgozott technológiák szintén alkalmazást nyertek. Például a KCl vagy a ZnSe alapra felviszik a lítium-metaszelen-arszenát ( $\text{LiArSe}_2$ ), illetve az ólom-fluoridot (PbF). Ezeket a kész elemeket nagy teljesítményű  $\text{CO}_2$ -lézerekben ki-

meneti ablakokként és rezonátortükrökként alkalmazzák. Kidolgozás alatt vannak másfajta rétegek is (például germánium- és arzén-szulfid  $\text{GeS}_2$ ,  $\text{Ar}_2\text{S}_3$ ), de ezeknek egyelőre csak a vizsgálata folyik. Együttal megemlítjük, hogy a vékonyrétegek előállításához nagy tisztaságú vegyszerek szükségesek. Ezért az intézetben a gyári vegyszereket további tisztításnak vetik alá, vagyis addig tisztítják, amíg a szennyező anyagok mennyisége nem több mint  $10^{-5}$ – $10^{-6}$  tömegrész.

## Utószó

Ebben az ismertetőben csak a leglényegesebb alap- és alkalmazott kutatásokról tettünk említést. A több mint húsz év alatt nagyon sok, az alkalmazott kutatáshoz kapcsolódó rendelést teljesített az intézet és elődje. Annnyit feltétlenül meg kell jegyezni, hogy a megrendelések zöme és a megfelelő bevétel a szovjet érára esett. Akkor az alkalmazott kutatásokból befolyt pénzösszeg egyes években az intézet költségvetésének 50%-át is elérte. Ma ez alig 2–3%, néha még kevesebb is.

*Spenik Ottó*

## BÚCSÚZUNK

# HEVESSY JÓZSEF

1931–2005

## Egy fizikus polgármester halálára

*Hevessy József* Debrecen város rendszerváltás utáni első szabadon választott polgármestere 2005. július 18-án elhunyt. Ki volt Ő és mi kvalifikálta arra, hogy fizikus és mérnöki diplomával a Debreceni Orvostudományi Egyetem Biofizikai Intézetében közel másfél évtizedig végzett tanácsadói és kutatói tevékenysége után Magyarország második legnagyobb városának polgármesterévé válasszák?

Hevessy József 1931. október 10-én Hámorban született, ahol erdész édesapjától tanulta a természet szeretetét. Hámor, Újvidék, Zánka és Esztergom voltak alsóbb iskoláinak színhelyei, míg középiskolába Miskolcon járt. Debrecennel 1951 és 55 között ismerkedett meg, ahol az akkori Kossuth Lajos Tudományegyetemen a fizika és matematika szakot végezte el. A tanulmányait kiemelkedően végző fiatalember a KLTE *Szalay Sándor* akadémikus által vezetett Kísérleti Fizikai Intézetében kapott tanársegédi állást. Gyakorlati érdeklődését mutatja, hogy a debreceni Gördülőcsapágy Művektől kapott megbízást: dolgozzon ki röntgenátvilágításon alapuló módszert a selejt kiszűrésére.

A történelem hamar beleszólt a kibontakozó karrierbe! 1956-ban részt vett az egyetemi ifjúság forradalmi megmozdulásában. E tevékenysége miatt a forradalom leve-

rése után az egyetemről eltávolították, majd 3 évi börtönbüntetésre ítélték. 1958-ban ugyan kiszabadult a börtönből, de végzettségének megfelelő állást nem kapott, ezért a Képcsarnok Vállalatnál képügyökként helyezkedett el.

1961-ben végre a Miskolci Műszaki Egyetemen megalkult Tüzeléstechnikai Intézetben sikerült kutatóként elhelyezkednie. A feladatkörébe tartozó kutatási feladatok, amelyekkel a helybeli nagyüzemek látták el az intézetet, nagy lelkesedéssel oldotta meg. Sikerét azon is lemérhetjük, hogy a kohók biztonságosabb üzemeltetése érdekében kifejlesztett Certa elnevezésű szellemes lángőrző berendezés szabadalmát Hevessy József is jegyezte.

1966-ban került vissza Debrecenbe családjával együtt, ahol a MEDICOR gyár fejlesztőmérnökeként helyezkedett el. Erre a periódusra is rányomta maradandó hozzájárulása bélyegét egy új gázsterilizátor kifejlesztésével. Nem feledkezett meg saját továbbképzéséről sem. Munka mellett a Budapesti Műszaki Egyetem Villamosmérnöki Karán 1971 és 73 között második diplomáját is megszerezte.

A gyári munkához képest minőségileg új lehetőséget kapott, amikor – baráti segítséggel – 1976-ban a Debreceni Orvostudományi Egyetem Biofizikai Intézetében kapott műszaki főtanácsadói állást. Itt már valóban elmélyült kutatómunkát végezhetett, és párhuzamosan az akkori tudományos rektorhelyettes tanácsadója is volt az egyetem



műszerbeszerzéseinek összehangolásában. Tevékenyen részt vett a Közép-Európában először itt bevezetett áramlási citometria (nagysebességű egyedi sejtanalízis) tovább-

fejlesztésében. Rangos nemzetközi folyóiratokban e tárgyban megjelent közleményei alapján egyetemi doktori címet szerzett biofizikából.

Életében nagy változás a rendszerváltás idején, 1990-ben következett be, amikor az SZDSZ debreceni szervezete jelölése után a helybeli önkormányzati képviselők Debrecen város polgármesterévé választották. Ezt a tisztséget két ciklusban töltötte be. Megromlott egészségi állapota miatt – bár még négy évig önkormányzati képviselő maradt – a közélettől lassan visszavonult. 1998-ban nyugdíjba vonult.

Korábbi érdemeiért 2004-ben Debrecen városa díszpolgárává választották. Ha a történelmi események nem törik meg karrierjét, ma minden bizonnyal hazánk egyik jelentős fizikusától búcsúznánk. Így is maradandót alkotott! Barátai és munkatársai nem felejtik. Nyugodjon békében!

*Damjanovich Sándor*

## PÁLYÁZATOK

# A JÖVŐ SZÁZAD ŪRÁLLOMÁSA

A Magyar Csillagászati Egyesület és a dorogi Zsigmondy Vilmos Gimn. és Informatikai Szakközépisk. pályázatot hirdet általános iskolás tanulók és tanulócsoporthoz számára.

*A feladat:* tervezzétek meg, rajzoljátok le, milyen lesz száz év múlva, 2106-ban egy ūrállomás? Ismertessétek az állomás részegységeit, berendezéseit, az ott folyó kísérleteket, az ott élő emberek mindennapjait!

Eredményeiteket egy legfeljebb A1 formátumú (840 × 594 mm) poszteren foglaljátok össze, és juttassátok el a következő címre: Zsigmondy Vilmos Gimnázium és Informatikai Szakközépiskola, 2510 Dorog, Otthon tér 3.

*Jelige:* A jövő század ūrállomása

*Beadási/postázási határidő:* 2006. március 31.

*A poszter feltétlenül tartalmazza a következő adatokat:* az alkotó(k) nevét, e-mailcímét, iskoláját, osztályát, az iskola postacímét.

A zsűri a poszter elkészítésekor végzett önálló munkát, a kreatív ötleteket díjazza elsősorban, ugyanakkor a szakirodalomból, internetről kimásolt idézetek gyűjteményét nem tudjuk értékelni.

A beküldött munkákból kiállítást rendezünk a TIT Budapesti Planetáriumában.

# MIRŐL MESÉLNEK A CSILLAGOK?

Pályázati felhívás a 100 éve született Detre László csillagász emlékére

A XX. század jeles magyar csillagászának tisztelegve a Magyar Csillagászati Egyesület és a dorogi Zsigmondy Vilmos Gimnázium és Informatikai Szakközépiskola pályázatot hirdet középiskolás tanulók, illetve tanulócsoporthoz számára.

*A feladat:* készítsétek digitális vagy hagyományos filmes fényképezőgéppel állókamerás éjszakai égboltfelvételt! (Az úgynevezett állókamerás felvételek során a fényképezőgép állványra van rögzítve, avagy másképp fixen elhelyezve, és mozdulatlan az expozíció alatt. Az expozíció időtartama több másodperctől néhány percnél át egy-két óráig is terjedhet, hosszának elsősorban a fényképe-

zőgép teljesítménye és az égbolt állapota szab határt.) Természetesen több felvétel is készülhet, de a pályázat-hoz csak egyet használjatok fel!

A kép elkészülte után a tanulmányaitok és a szakirodalom alapján magyarázzátok el, mit örökítettetek meg, és hogy mi a jelenség(ek) tudományos magyarázata? Milyen tapasztalatokat szerezhetünk a csillagokról és a minket körülvevő világról az elkészült kép alapján? A képhez tartozó magyarázat kiterhet bármely csillagászati vonatkozásra, az égitestek látszó mozgására, távolságára, különböző fizikai paramétereire, akármilyen fontos avagy érdekes jellemzőre.

Eredményeiteket egy legfeljebb A1 formátumú (840 × 594 mm) poszteren foglaljátok össze, és juttassátok el a következő címre: Zsigmondy Vilmos Gimnázium és Informatikai Szakközépiskola, 2510 Dorog, Otthon tér 3.

*Jelige:* Miről mesélnék a csillagok?

*Beadási/postázási határidő:* 2006. március 31.

*A poszter feltétlenül tartalmazza a következőket:* az alkotó(k) nevét, e-mailcímét, iskoláját, osztályát, az iskola postacímét, a kép készítésének körülményeit (helyszín,

időpont, földrajzi hely, fényképezőgép, expozíció paramétereit). Az eredeti képen kívül megjelenhetnek annak kinagyított, feldolgozott részletei is!

A zsűri a poszter elkészítésekor végzett önálló munkát, a kreatív ötleteket díjazza elsősorban, ugyanakkor a szakirodalomból, internetről kimásolt idézetek gyűjteményét nem tudjuk értékelni.

A beküldött munkákból kiállítást rendezünk a TIT Budapesti Planetáriumában.

## CERN-LÁTOGATÁS

A Magyar Fizikushallgatók Egyesülete idén is látogatást szervez, főként matematika és/vagy fizika tanároknak a világ legnagyobb részecskefizikai kutatóintézetébe, a CERN-be és a lausanne-i egyetem két laboratóriumába.

*Az utazás időpontja:* 2006. május 18–22. (csütörtök délelőttől hétfő reggelig). Ebből két éjszakát a buszon töltünk, kettőt pedig Genf belvárosában, egy ifjúsági szálláson – a csoport tagjai együtt, 6–8 ágyas szobákban.

*Ellátás:* 2 reggeli (szombat és vasárnap) és 2 fakultatív ebéd (kb. 5 euro, illetve 7–9 CHF, pénteken és szombaton a kutatóintézetekben).

*Tervezett program:* Pénteken a lausanne-i egyetem egyik szilárdtestfizika-laboratóriumát tekintjük meg, ahol egy a Földön elég ritka, nagyterű ESR-berendezés található, és megmutatják nekünk a híres fúziós kísérleti berendezést, a TOKAMAK-ot. Szombaton a CERN (www.cern.ch)

látogatása, ismerkedés az épülő kísérletekkel és a pillanatnyilag folyó kutatásokkal. Vasárnap városnézés Genfben, fakultatív hajókirándulás a Genfi-tavon (kb. 1 óra, 12 CHF). Hétfő délelőtt érkezünk meg Budapestre.

A lehetőségeknek megfelelően mindkét intézetben magyar nyelvű idegenvezetést biztosítanak az ott dolgozó magyar fizikusok.

*Részvételi díj:* körülbelül 36 000.- Ft.

*Jelentkezés:* Maximum 46 fő utazását tudjuk biztosítani, jelentkezési sorrend alapján. Előzetes jelentkezés 2006. március 15-ig e-mailben (tanar\_cern@mafihe.hu) vagy levélben (Magyar Fizikushallgatók Egyesülete, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/a) név, cím, telefonszám, e-mailcím elküldésével.

Kérdéseivel forduljon bizalommal hozzánk az alábbi címeken: david@mafihe.hu és jegesm@yahoo.co.uk.

## HÍREK – ESEMÉNYEK

### 2005. ÉVI FIZIKAI NOBEL-DÍJ

A 2005. évi fizikai Nobel-díjat két amerikai és egy német fizikus, ROY J. GLAUBER, JOHN L. HALL és THEODOR W. HÄNSCH nyerte el. A díj felét Roy J. Glauber (Harvard Egyetem, USA) kapta „az optikai koherencia kvantumelméletéhez való hozzájárulásáért”, a díj másik felén John

L. Hall (Colorado Egyetem, USA) és Theodor W. Hänsch (Max Planck Institut für Quantenoptik, Garching, Németország) osztozik „a lézer alapú precíziós spektroszkópia kifejlesztéséhez való hozzájárulásukért, beleértve az optikai frekvencia átfésülési technikát is”.

## TÁRSULATI ÉLET HÍREI

### Társulati események és tervek a 2005/06-os akadémiai évben

Az ELFT elnöksége továbbviszi az előző elnöki időszakban növekvő hangsúlyt kapott aktivitását a fizika oktatásának és társadalmi népszerűsítésének ügyében.

- A szeptemberi elnökségi ülésen *Härtlein Károly* mutatta be a Csodák Palotája helyzetét. A széles közismertséget kivívott intézmény kuratóriumának elnöke és

két tagja, valamint a kuratórium titkára is társulati tagunk. *Kroó Norbert* (elnök), valamint *Radnai Gyula* és *Sükösd Csaba* (kuratóriumi tagok) is aktívan részt vettek a megbeszélésen. *A Csodák Palotája hírnevét tovább növelő lépéseket sürget a megbeszélés végén elfogadott állásfoglalás*, amelynek a Társulat honlapján adtunk nyilvánosságot.

- Az októberi ülésen *Kotek László* összeállítást mutatott be a Társulat által gondozott regionális és országos fizika tanulmányi versenyekről. Az impozáns áttekintés háttérrel adott a Társulat elnökségének az Oktatási Minisztérium közoktatási, illetve felsőoktatási államtitkárhoz eljuttatott javaslatához, amelyben kértük, hogy *az Eötvös-verseny és a Szilárd Leó-verseny minősüljön országos tanulmányi versennyé*. E besorolással a versenyeken legjobban szereplők, javaslatunk szerint, automatikusan emelt szintű érettségi minősítést kapnának.

- A nyár folyamán megújított közoktatási díjbizottságunk új összetételében először tett javaslatot az *Ericsson Fizikatanári Díjra*, továbbá a *Rátz Tanár Úr Életműdíj*ban részesítendő fizikatanárok személyére.

- A *Fizika Éve* eseménysorozata iránt, elsősorban tagjaink és szakcsoportjaink aktivitásával, pozitív érdeklődést keltettünk. Egyes, e hírnevet lejártni szándékozó események szervezőivel szemben *Härtlein Károly* kezdeményezésére sikerült a Magyar Tudományos Akadémiával összehangoltan fellépni. A FIZINFO-n ehhez kapcsolódóan spontán lefolyt vita iránti nagy érdeklődés azt jelzi, hogy tagjaink közül többen vállalnának aktív fellépést. *Folyamatos tevékenységet végző munkacsoport alakítását kezdeményezzük!*

- Az Elnökség megismerte és támogatja *Németh Judit* főszerkesztői elképzeléseit, aki 2006 januárjától veszi át *Berényi Dénestől* a *Fizikai Szemle* főszerkesztői feladatait. Jóváhagyta a Főszerkesztő asszony által a szerkesztőbizottság személyi összetételének megújítására tett javaslatot. A *Fizikai Szemle* feladata jelentősen bővül a *Mindentudás Egyetemével* kötött együttműködési szerződésből fakadóan: *önálló, lefűzésre alkalmas, színes mellékletként készül a jövőben a Mindentudás az iskolában rovat*.

- Az Elnökség támogatja a tavasszal megválasztott elnököt abban a szándékában, hogy a Társulatot *megnyissa azok előtt a fizikusok előtt, akik a műszaki-tudományos innováció vállalkozói gyakorlatában értek el tartós sikereket*.

- Az MTA Fizikai és az MTA Műszaki Osztályaival együttműködve szerveztük meg október elején a *Vállalkozó fizikusok a technológiai innováció élvonalában* című pódiumvitát. *Szabó Gábor* vezetésével nyolc kollégánk számolt be cége létrejöttéről, fizikusi végzettsége abban játszott szerepéről. Minden résztvevő megfogalmazta a folytatás iránti igényét.

- A Társulathoz nyár elején meghívás érkezett a lengyel, az osztrák és a szlovák társszövetségektől, hogy képviseltesük magunkat éves rendezvényeiken.

- A cseh és szlovák fizikusok Kassán megrendezett találkozóján *Kovács Ádám* főtítkárr, az Osztrák Fizikai Társaságnak a *Fizika Ünnepe* alkalmából rendezett összejövetelén *Patkós András* elnök képviselte a Társulatot (utóbbin az MTA Fizikai Osztály képviselőjében *Fai-gel Gyula* is részt vett). *Helmuth Rauch* professzor, az

Osztrák Fizikai Társaság elnöke kezdeményezte a társulati képviselők között rendszeres konzultációk tartását, amely segítheti az Európai Unió tudománypolitikájának szerény eszközeinkkel való befolyásolását.

- Az Elnökség *Nagy Dénes Lajost* megbízta, hogy az ott betöltött feladataihoz társítva legyen állandó képviselőnk az Európai Fizikai Társaság Tanácsában.

- Az ösztársulati élet fellendítését régebbtől fogva igényli sok tagtársunk.

- A szeptemberi elnökségi üléshez kapcsolódva *Kroó Norbert*, az MTA alelnöke mutatta be a megalakulóban lévő Európai Kutatási Tanácsot (ERC), amelynek fő feladata az alap kutatások európai szintű támogatása.

- A novemberi nyilvános elnökségi ülés tudományos részén *Dombi Péter* (SzFKI) számolt be a 2005. évi fizikai Nobel-díj szakmai háttéréről. *Várjuk tagtársaink javaslatait a márciusi elnökségi üléshez kapcsolható szakmai program témájára és előadójára!*

- A *Fizika Évének* sikerét látva, amelyben döntő szerepe volt a tanári szakcsoportoknak és több területi szakcsoportnak, céljainkat a következő évben sem adhatjuk alább.

- A 2006. évi rendezvénynaptárt e törekvés jegyében minél átfogóbban, a hazai fizika szakmai eseményeit maximálisan átfogóan kívánjuk összeállítani. *Kérjük a Társulat területi csoportjait és szakcsoportjait, hogy rövid, tényszerű jelentésüket a 2005. évi munkájukról és 2006. évi terveikről mielőbb küldjék meg a Társulat titkárságának.*

- A novemberi elnökségi ülésen a következő 2006. évi eseményeket jelentették be:

*Középiskolai Fizikatanári Ankét és Eszközbemutató*, Paks, 2006. március 30. – április 3.

*Általános Iskolai Fizikatanári Ankét és Eszközkiállítás*, Kaposvár, 2006. június végén

*Öveges József Általános Iskolai Fizikaverseny* döntője, Győr, 2006. május 19–21.

*Magyar Magfizikus Találkozó*, Jávorkút, 2006. május (Magfizikai Szakcsoport)

*Elméleti Fizikai Iskola*, Gyöngyöstarján, 2006. május 29. – június 2. (Részecskefizikai Szakcsoport)

Tanári tanulmányút a CERN-be (Szervező *Sükösd Csaba* alelnök), 2006. tavaszi szünet, az időpont még nem végleges.

- *Härtlein Károly* tájékoztatta a vezetőséget, hogy *Jeszenszky Sándor* igazgató szeretne az Elektrotechnikai Múzeumban létrehozni egy olyan tantermet, ahol a *Csodák Palotájához* hasonló módon fizikaórát lehetne tartani. A segítőkész tagtársak, a koncepció kialakítására vállalkozó tanárkollégákat segítjük a kapcsolatfelvételben.

- Kezdeményezzük, hogy az Országos Találmányi Hivatal védnökségével, a Műszaki Múzeum szakmai munkájára építve, *2006 őszén kiállításon mutassák be a magyar vállalkozó fizikusok cégeinek a modern fizika eredményeit hasznosító termékeit és alkotóikat.*

- *A 2007. évi Fizikus Vándorgyűlés lebonyolítására a következő koncepciót bocsátjuk vitára:*

- A rendezvényen, amely várhatóan 2 és fél napos lesz, félnaponként legyen egy-egy kiemelt előadás (összesen 5), 50–50 perc hosszúságban.

– A normál (25 perces) előadásokon a 2002–2007 között PhD-t szerzett fiatal fizikusok mutatkozzanak be eredményeikkel.

– Egy-egy szekciót szervezzünk a fizika közoktatásában, illetve a fizikusi tevékenységre alapított vállalkozásokban elért eredmények bemutatására.

• Rendezvényekkel is őrizzük Társulatunk történetében aktív szerepet játszott kiváló magyar fizikusok emlékét. 2006. május 25-én, az Ortvyay-kollokvium keretében az ELTE Fizikai Intézettel közösen rendezzük meg a 2006.

évi *Marx György Emlékelőadást*, amelyet *Gianni Fiorentini*, a ferrarai egyetem professzora tart a földi eredetű neutrínók észlelhetőségéről és jelentőségéről a földtörténeti kutatásokban.

• A Társulat 2006. évi közgyűlése 2006. május 27-én, szombaton délelőtt 10 órakor kezdődik az ELTE Fizikai Intézet Lágymányosi épületében. Ezen megválasztjuk a Társulat 2007 májusában hivatalba lépő elnökét. A közgyűlés előtt a Társulat nevében megkoszorúzzuk Eötvös Loránd új emléktábláját a MOM Parkban.

## A Magyar Nukleáris Társaság Közgyűlése

A Magyar Nukleáris Társaság 2005. december 2-án tartotta Ünnepi Közgyűlését. A Közgyűlésen *Sükösd Csaba* elnök adta át a társaság *Szilárd Leó-díját* VASTAGH GYÖRGY balatonfüredi fizikatanárnak életművéért, a nukleáris ismeretek fiatalok körében való terjesztéséért, valamint a tanári szakcsoporthoz élén sok éven át végzett kiemelkedő munkájáért.

A Magyar Nukleáris Társaság és az Olasz Nagykövetség által *Enrico Fermi* születésének századik évfordulójára alapított *Fermi Fiatal Kutatói Díjat* ebben az évben DÓCZI RITA debreceni kutató kapta *A Fermi-féle albedómódszer általánosítása hidrogéntartalom meghatározására* című pályamunkájáért. A díjat az Olasz Nagykövetség tudományos attaséja adta át.

Az ünnepi közgyűlésen került sor a Magyar Nukleáris Társaság által középiskolák számára kiírt *Fizika Éve Pályá-*

*zat* eredményhirdetésére és ünnepélyes díjkiosztására is. A fődíjakat *Kroó Norbert*, a Magyar Tudományos Akadémia alelnöke, a zsűri elnöke, a különdíjakat pedig az azokat felajánló intézmények, cégek vezető képviselői adták át.

Az I. díjat a SZTÁRAI MIHÁLY GIMNÁZIUM (Tolna),

a II. díjat a DEBRECENI EGYETEM KOSSUTH LAJOS GYAKORLÓ GIMNÁZIUMA,

a III. díjat a PUSKÁS TIVADAR TÁVKÖZLÉSI TECHNIKUM (Budapest) kapta.

A fődíjak mellett ez a három iskola megkapta az Eötvös Loránd Fizikai Társulat által felajánlott három különdíjat is.

A további különdíjakat, a díjazott iskolák nevét, valamint a pályázattal kapcsolatos minden további információt a <http://www.reak.bme.hu/mnt> weboldalon találhatják meg az érdeklődők.

## A Vákuumfizikai Szakcsoport szemináriumai 2006 I. félévében

2006. január 17., kedd, 14 óra, MTESZ székház, Budapest, II. ker. Fő utca 68. II. emelet 222. szoba:

*Radnóczy György* (MFA, Budapest): *Kemény bevonatok – nanokompozitok*

2006. február 14., kedd, 14 óra, MTESZ székház, Budapest, II. ker. Fő utca 68. II. emelet 222. szoba:

*Kovács András, Bíró Domokos, Barna Péter* (MFA, Budapest): *Fázisok képződése és növekedése fém kompozitrétegekben*

*Sáfrán György* (MFA, Budapest): *Vékonyréteg-szerkezetek merőleges mágneses adathordozók céljára*

2006. március 14., kedd, 13 óra, MFA tanácsterme, Budapest, XII. ker., Konkoly Thege Miklós út 29–33., 26. épület, I. emelet:

*Lábár János* (MFA, Budapest): *Új anyagtudományi*

*mérési lehetőségek energiaszórt elektronmikroszkópia segítségével* – előadás és műszerbemutató.

2006. április 4., kedd, 13 óra, MTA Reakciókinetikai Kutatócsoport laboratóriuma, Szeged, Dóm tér 7.:

*Kiss János, Deák László, Berkó András* (MTA Reakciókinetikai Kutató Csoport): *Ultravákuumban végzett felülettudományi kutatások Szegeden* – három (25–30 perces) előadás és laborlátogatás.

2006. május 9., kedd, 14 óra, MTESZ székház, Budapest, II. ker. Fő utca 68. II. emelet 222. szoba:

*Szedlacsek Katalin* (MFA, Budapest): *Fém-szén nanokompozitok kialakulása, mechanikai és elektromos tulajdonságai*

*Kovács György* (MFA, Budapest): *Ni-C nanokompozitok szerkezete és spektroszkópiai tulajdonságai*

## Fizikatörténeti labirintus középiskolásoknak

A fizika története olyan, mint egy labirintus: rengeteg mellékággal, zsákutcával tarkított. Ennek bemutatására és érzékeltetésére vállalkozott a Magyar Fizikushallgatók Egyesülete és a Magyar Elektrotechnikai Múzeum.

Az útvesztő állomásai A2-es plakátok lesznek, amelyeket érdekes szöveggel, színes ábrákkal díszítünk, és a fizika történetének egy-egy meghatározó eseményéről vagy alakjáról szólnak (pl. ókori görögök, *Galilei*, *Einstein*).

Minden plakát alján egy kérdést teszünk fel, és az erre adott válasz kalauzol el a következő plakátig. Figyelem! Egy kérdésre több helyes válasz is lehetséges, és rossz válaszok is lehetnek (pl. alkímia, asztrológia).

A labirintus célja a fizika fejlődésének érzékeltetése és a jelenkor eredményeinek bemutatása.

*Megnyitó időpontja:* 2006. március 20., 14 óra

*Helyszíne:* Magyar Elektrotechnikai Múzeum, Budapest, VII. ker. Kazinczy utca 21.



A Múzeum befogadóképessége véges, ezért kérjük Önöket, hogy előre jelezzék érkezési szándékukat a következő elérhetőségek valamelyikén: telefon: (1) 342-5750, e-mail: info@emuzeum.hu.

A labirintus előzetes bejelentkezés alapján a megnyitó után is megtekinthető!

További információ és felvilágosítás kérhető a fenti elérhetőségeken, valamint *Zsom András*-tól a [labirintus@mafihe.hu](mailto:labirintus@mafihe.hu)-n és a (1) 372-2701-es telefonszámon.

## AKADÉMIAI ÉLET HÍREI

Az Magyar Tudományos Akadémia Részecskefizikai Bizottsága 2005. november 9-én tartotta alakuló ülését. Az új elnök *Palla László* (ELTE), a titkár *Horváth Dezső* (RMKI) lett.

Az MTA Magfizikai Bizottsága 2005. november 16-án tartott ülésén megválasztotta a Bizottság vezetőit a következő akadémiai periódusra, az elnök *Kiss Ádám* (ELTE), titkár *Krasznaborkay Attila* (ATOMKI) lett.

## HÍREK ITTHONRÓL

### Kitüntetés

Az MTA Atommagkutató Intézet 2005. évi *Szalay Sándor-díját* MOLNÁR JÓZSEF tudományos főmunkatárs nyerte el az intézetben folyó digitális elektronikai fejlesztő tevékenységéért. Jelentős eredményeket ért el a TTL in-

tegrált áramkörök alkalmazása és digitális elektronikai részegységek fejlesztése terén. Meghonosította az elektronikai alkatrészek sugárzástűrésére vonatkozó vizsgálatait.

## Fizikusok a technológiai innováció élvonalában

2005. október 26-án a *Fizika Éve* eseménysorozatába illeszkedő pódiumbeszélgetést rendeztek a Magyar Tudományos Akadémia székházában az Eötvös Loránd Fizikai Társulat és az MTA Fizikai és Műszaki Tudományok Osztályainak szervezésében. A beszélgetés kezdeti szakaszában *Bojár Gábor* (Graphisoft Rt.), *Czakó Ferenc* (Synergon Rt.), *Horváth Zoltán* (HALO-Laser Kft. és MTA SzFKI), *Mogyorósi Péter* (Laser Consult Kft.), *Pavelka Tibor* (Semilab Rt.), *Rosta László* (Mirrotron Kft. és MTA SzFKI), *Sánta Imre* (Dél-Dunántúli Kooperációs Kutató Központ és PTE Fizikai Intézet) és *Szendrői István* (Microvacuum Kft.) mutatta be fizikusként induló pályájuknak az innovatív termékekhez kapcsolódó sikeres vállalkozások alapításába és felfuttatásába történt átalakulását. A beszélgetés moderátora, *Szabó Gábor*, a Szegei Tudományegyetem egye-

temi tanára, a Magyar Innovációs Szövetség alelnöke volt. A közönség (amelynek sorában szintén számos, vállalkozóként boldoguló fizikus ült) számos kérdéssel „provokált” vitát a fizikus pályára vezető ambíciók és az oktatás irányának kérdéseiről, az innovatív vállalkozói készségek felsőoktatási fejleszthetőségének lehetőségéről.

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat a komoly érdeklődésen és a tartalmas vitán felbuzdulva a 2007. évi Fizikus Vándorgyűlésén önálló szekciót szervez a vállalkozó fizikusok és eredményeik bemutatására. Partnereket keresnek egy 2006 őszén rendezendő kiállításához, amelyen a mai magyar fizikusok által kifejlesztett és piaci sikert aratott olyan termékeket mutatnának be, amelyek megalkotásában a fizika eredményei és annak felsőfokú ismerete egyaránt szerepet játszottak.

## Marx György: Gyorsuló idő – könyvbemutató

2005. november 21-én az MTA Felolvasótermében bemutatták a *Marx György* válogatott tanulmányait tartalmazó, *Gyorsuló idő* című könyvet, melyet *Juhász Ferenc*, *Patkós*

*András* és *Sükkösd Csaba* szerkesztett, a TypoTeX Kft. adott ki. A bemutatón a könyvet *Meskó Attila*, az MTA főtitkára méltatta, majd a szerkesztők mondták el gondolataikat.

## A CUNAMI

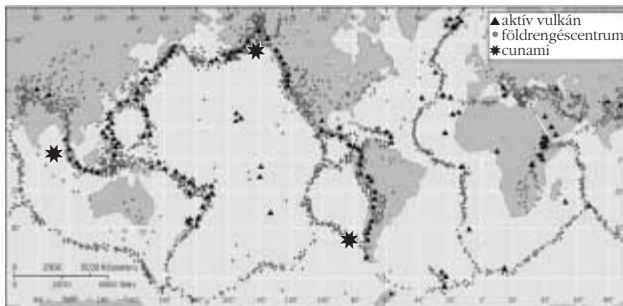
A cunami (japánul „cu” = kikötő, „nami” = hullám) egy óceánfelszíni hullámfajta, amely a nyílt vízben rendkívüli sebességgel terjed, de ott csekély magassága miatt például hajókról alig észrevehető. A part közeli sekély vízben azonban lelassul, több méter magasságúra torlódik fel, és a partra csapva akár kilométeres mélységben okozhat óriási pusztítást. Éppen emiatt övezi különleges figyelmet a cunamikkal kapcsolatos ismereteket, ugyanis a remények szerint jobb megértésük elősegítheti a károk csökkentését, a 2004-es szumátraihoz hasonló katasztrófák esetleges megelőzését.

A cunamik 86%-át tenger alatti földrengések okozzák. Jól ismert tény, hogy a földrengések hely szerinti eloszlása nem egyenletes, a szilárd kéreg mozgó tektonikus lemezeinek határán különösen nagy az aktivitás. Az 1. ábra mutatja, hogy 10 év rengési epicentrumainak térképen történő ábrázolása a vulkánokkal együtt meglehetősen jó képet ad a kéreglemezek elhelyezkedéséről. Nem csoda hát, hogy a legnagyobb feljegyzett cunamik forrása is ezen „forró zónákban” található.

Nem mindegyik erős földrengés okoz veszélyes nagyságú cunamit. Ennek oka, hogy a hasonló hullámok keléséhez a vízfelszín lökésszerű, jelentős nagyságú kiemelkedése szükséges. Ez viszont csak akkor következik be, ha a földrengés során megcsúszó kéreglemezek elmozdulásának elegendően nagy a függőleges irányú komponense (2. ábra). A földrengések mellett cunamit okozhatnak a tenger alatti földcsuszamlások (ilyen következett be 1998-ban Pápua Új-Guinea partjai mentén), vulkáni tevékenység (Hawaii környékén gyakori), vagy a tengerbe csapódó nagyméretű aszteroidák (ilyenről modern megfigyelés szerencsére nincs).

A cunami előfordulása egyáltalán nem olyan ritka, mint gondolnánk (3. ábra). Szerencsére többségük nem okoz károkat, mert a part menti legnagyobb hullámmagasságuk nem haladja meg az adott helyen jellemző árpály-ingadozás, vagy a szokásos viharok hullámainak nagyságát, amire a part menti építményeket méretezték.

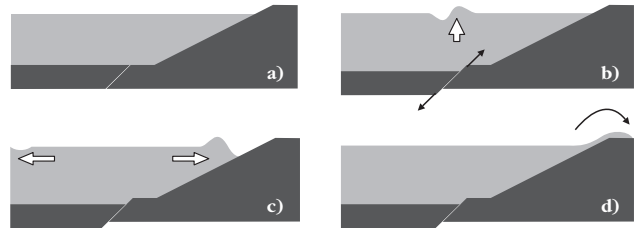
1. ábra. Földrengés-epicentrumok (1990–2000) és aktív vulkánok földrajzi elhelyezkedése. Az utolsó száz évben feljegyzett három legnagyobb cunamiforrás: 1958 Alaszka, 1960 Chile, 2004 Szumátra.



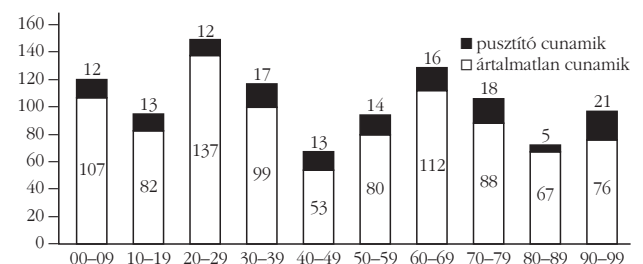
A vízfelszíni hullámok fizikája jelentős múltra tekint vissza. A sűrűdásmentes folyadékok mozgásegyenletét Euler 1755-ben írta fel. (Az csak véletlen, hogy ugyanebben az évben az Európa környékén valaha feljegyzett legerősebb cunami – a kiváltó földrengéssel együtt – teljesen lerombolta Lisszabont, a közvetlen áldozatok számát az akkori 250 ezres lakosság negyedére becsülik.) A cunamihoz hasonlóan „elkent”, viszonylag csekély magasságú, gyengén csillapodó, alakját őrző hullámformát John Scott Russel „fedezte fel” 1834-ben. E nemlineáris hullámok viselkedését jól közelíti a Korteweg–deVries-egyenlet (1895), melynek első analitikus (szoliton) megoldása csak mintegy ötven éve ismert. A cunami fizikája lényegében nem különbözik a „közönséges” felszíni hullámokétól, a viszonylag jól értett jelenségek közé tartozik.

A viharos szél által keltett felszíni hullámok 100–200 méteres tipikus hullámhosszához képest a cunamik vízszintes kiterjedése sokszorososan nagyobb, jellemzően 100–500 kilométer (nem elírás). Minthogy az óceánok mélysége nem nagyon haladja meg az 5–6 kilométert, a cunamik terjedésének jellemzésére jól használhatóak az úgynevezett „sekély folyadék” egyenletek. Eszerint a  $c$  terjedési sebességüket lényegében a  $b$  vízmélység határozza meg a  $c = \sqrt{g b}$  egyszerű formulának eleget téve ( $g$  a nehézségi gyorsulás), ez körülbelül 800–1100 km/h értékű, ami megfelel egy utasszállító repülőgép sebességének. A nagy kiterjedés és szédítő sebesség mellett

2. ábra. A cunamik leggyakoribb fajtájának vázlatja. a) Kezdő állapot: nyugodt vízfelszín. b) Jelentős függőleges elmozdulással járó tenger alatti földrengés, amely lökésszerű kiemelkedést okoz a felszínen. c) A forrástól gyorsan távolodó, nagyon széles, kis magasságú hullámok a sekély partmenti vizekben összehúzódnak, de eközben fel is torlódnak. d) A szárazföld közelében a meredek hullámok átbuknak (hullámtörés) és a partra csapnak, energiájuk legnagyobb része ilyenkor szabadul fel.



3. ábra. Cunami-előfordulások a múlt században, évtizedes bontásban.



csúcsmagasságuk a nyílt vízben alig haladja meg a néhány decimétert. A hasonlóan szétkent, lapos hullámok a szomszédos folyadékelemek rendkívül csekély relatív elmozdulásával terjednek, ezért a belső súrlódás (viszkózitás) szerepe elhanyagolható: ha csak a víz belső súrlódása fékezne a cunamikat, lecsengésükhöz több száz évre lenne szükség.

A mélységfüggő sebesség a part közelében szükségképpen lassuláshoz vezet, a hullám eleje lefékeződik. Ez a kontinuitás miatt torlódáshoz vezet: a szállított energia egyre rövidebb, ám egyre magasabb hullámhegyben összpontosul. Tetszőleges magasságú hullámok azonban nem alakulhatnak ki, mert egy kritikus frontoldali meredekség elérése esetén a hullám hegye átbukik, és lejátszódik a hullámtörés jelensége. Az átbukáshoz tartozó kritikus  $a_c$  magasságot szintén a vízmélység határozza meg elsődlegesen. A kísérletek és numerikus szimulációk segítségével megerősített  $a_c/b \approx 0,8$  empirikus összefüggés minden esetben teljesülni látszik. Ezen egyszerű összefüggés ismeretében gyaníthatjuk, hogy – például az interneten oly kedvelt – felhőkarcoló magasságú „cunamik” nem fordulhatnak elő a valóságban, hiszen az leg-

alább 200 méteres vízmélységet feltételez a part közelében, ez pedig valóságos tengeröblökben igen ritka.

A szumátrai katasztrófát követően ismét felvetődött egy világméretű cunamifigyelő és -figyelmeztető hálózat kiépítésének ötlete. Ezzel kapcsolatban a fő gond, hogy a földrengések mai tudásunk szerint egyáltalán nem jelezhetőek előre. Minthogy nem minden rengés vált ki erős cunamit, a valódi veszély detektálásához tengerfenékre telepített nyomásérzékelők szükségesek. Az USA partjai mentén hat hasonló szonda már üzemel, de ez csak a Csendes-óceán medencéjében használható előrejelzésre. Biztató azonban, hogy ha egy földrengés a partoktól elegendően távol következik be, melynek hullámkeltő hatását nyomásmérő szondák is megerősítik, akkor a létrejött cunami terjedése viszonylag jól modellezhető. Japánban például igen komoly figyelmeztető rendszer üzemel, mert az előző száz évben feljegyzett 1043 kisebb-nagyobb cunami közül (3. ábra) mintegy 200 Japán partjait közvetlenül is érintette.

Jánosi Imre

ELTE TTK Komplex Rendszerek Fizikája Tanszék  
Kármán Környezeti Áramlások Laboratórium

## KÖNYVESPOLC

### VERMES MIKLÓS, A LÍCEUMI DIÁK

Írta és szerkesztette Nagy Márton középiskolai tanár,  
kiadta a Vermes Miklós Tehetségkutató Alapítvány, 2005. Sopron, 148 old.

Vermes Miklós tanár úr a 20. század csaknem egyedülállóan legendás hírű középiskolai tanáregyénisége, a fizika és a fizika tanításának lángelkű apostola száz évvel ezelőtt született. Ez a kötet e tanáregyéniség pályafutásának bemutatásával állít emléket. Mégpedig sajátos módon: mert alig egy tizedrésze a kötetnek a kortársak, pedagógusok és *Mastalir Márta*, egykori (1992. évi) gimnáziumi tanuló diákkorában írt dolgozata mellett a Vermes-dokumentumok egész sora szerepel a kötetben. Vermes Miklós levele a szerzőhöz (kézírás fotokópiája) a tanár úr feljegyzései, személyes iskolai dokumentumai. A kötet fő részét azonban Vermes Miklós diákként készített dolgozataiból terjedelmesebb részletek alkotják. Így például *Erdély természeti kincseiről* készített pályamunkájából *A fémek* és *Az ásványok*, *Az épületanyagok* és *Energiaforrások* fejezetek az 1920–21 tanévből, amikor a tanár úr még csak 15 éves volt. Majd *A kupola története* című dolgozat. Ezt követi a nyolcadikos tanuló korában készített és díjat nyert pályamunka *A spektroszkópia* címmel. Ez a mintegy félszáz oldalas reprodukció a könnyen olvasható zsinórirásos kézirat formájában is rendkívül tanulságos. Ezt követően a kötet részleteket mutat be *Az evangélikus főgymnázium ifjúsági Magyar Társaság* jegyzőkönyvé-

ből, amely Vermes tanár úr kézírását őrzi. A kötet záró fejezete *Vermes Miklós iskolája – a Soproni Líceum, Tollí Balázs*, a Berzsenyi Dániel Evangélikus Gimnázium igazgatójának írása. A kötetet színes felvételek gyűjteménye illusztrálja, részben a Gimnázium fizikaszertárának eszközleíról, részben a tanár úr emléktáblájáról (a felvételen a tábla előtt *Habsburg Ottó* áll) és a Vermes Miklós-díj, a Vermes Miklós Emlékverseny és a „Muki bácsi”-emlékérem fotója, majd végezetül *Soproni képeslapok Muki bácsi korából* című gyűjtemény, melynek fő része *Magyarné Derszib Eti* 16 soproni tájékművészeinek reprodukciója.

A sajátos méltóságú kötet emberi oldaláról mutatja be Muki bácsit, aki kitörölhetetlen nyomot hagyott azokban, akik hosszabb-rövidebb ideig kapcsolatban lehettek vele. Az impozáns kötet ötletét, kidolgozását és azt a bizonyára nem mindennapi erőfeszítést, ami a megvalósítás anyagi feltételeit biztosította, mind *Nagy Márton* tanár úrnak köszönhetjük. A nagy élményért, melyet Muki bácsiról bennünk, a „tanítványokban” felidézett, hálás szívvel köszönjük. (A kötet megrendelhető a Vermes Miklós Alapítványnál, Sopron, Mátyás Király u. 24.)

Abonyi Iván