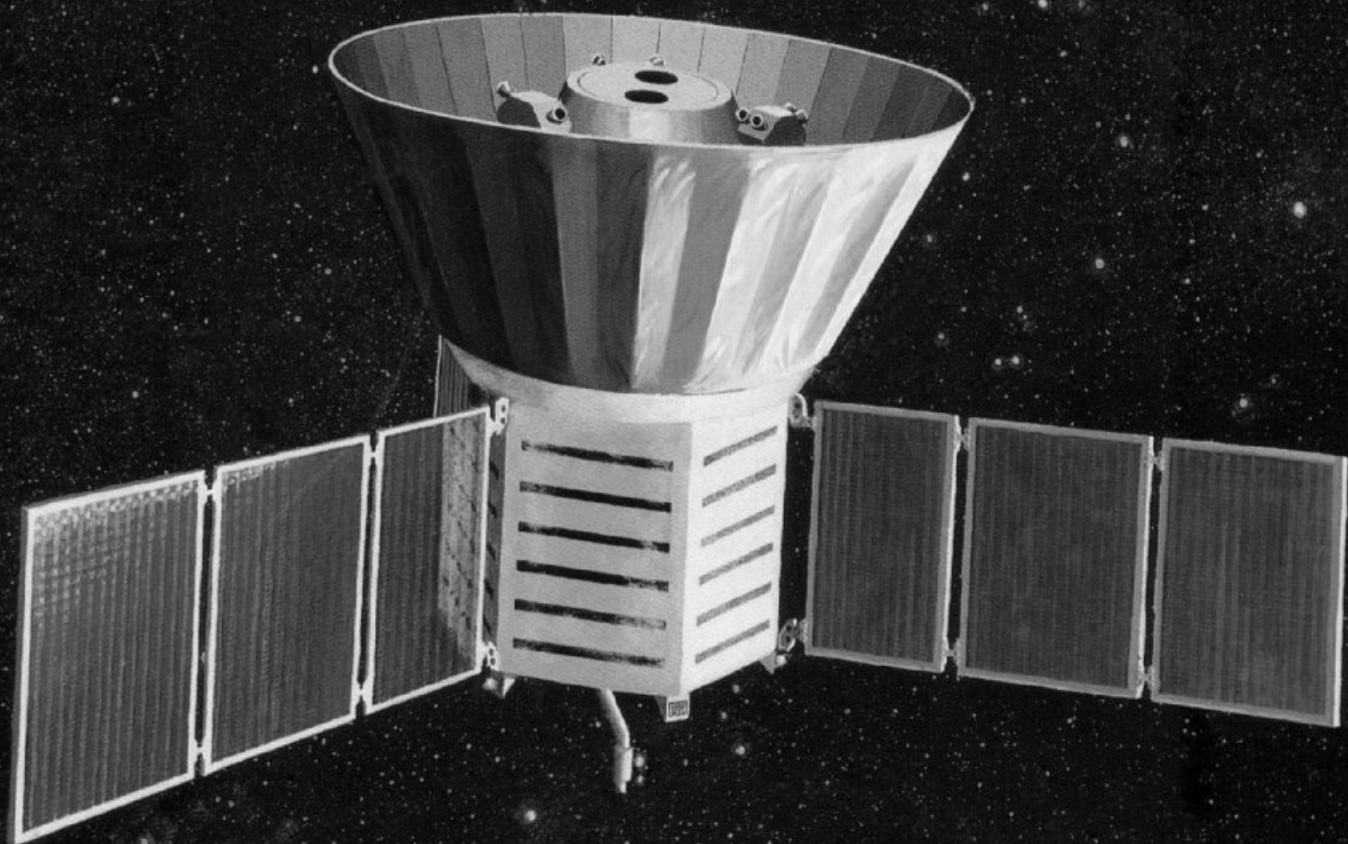


# fizikai szemle



2006/11

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,  
Czitrovszky 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, Tóth Kálmán,  
Trócsányi Zoltán, Turiné Frank Zsuzsa,  
Ujvári Sándor

Szerkesztő:

Tóth Kálmán

Műszaki szerkesztő:

Kármán Tamás

A folyóirat e-mailcíme:

szerkesztok@fizikaiszemle.hu

A lapba szánt írásokat erre a címre kérjük.

A folyóirat honlapja:

<http://www.fizikaiszemle.hu>

A címlapon:

Az 1989 novemberében útnak indított  
COBE szatellit. Műszerei a kozmikus  
háttérsugárzás tulajdonságairól  
egyedülálló jelentőségű információkhoz  
juttatták az asztrofizikusokat.

## TARTALOM

|   |     |
|---|-----|
| <i>Trócsányi Zoltán</i> : A 2006. évi fizikai Nobel-díj                 | 357 |
| <i>Németh Judit, Szabados László</i> : A sötét anyag                    | 362 |
| <i>Földes István</i> : Részecskegyorsítás lézerplazmában                | 365 |
| <i>Gergely György</i> : 25 éves a rugalmas elektronszórás-spektrometria | 369 |

### A FIZIKA TANÍTÁSA

|   |     |
|---|-----|
| <i>Jubász András</i> : Egyszerű kísérletek mágnesekkel                    | 371 |
| <i>Szatmári-Bajkó Ildikó</i> : „Káoszt”? – azt!                           | 376 |
| <i>Ujvári Sándor</i> : Az Országos Szilárd Leó Fizikaverseny feladatairól | 380 |
| A 2006/2007. tanévi Országos Szilárd Leó Fizikaverseny meghirdetése       | 384 |

### KÖNYVESPOLC

|            |     |
|------------|-----|
| PÁLYÁZATOK | 386 |
|------------|-----|

### HÍREK – ESEMÉNYEK

### MINDENTUDÁS AZ ISKOLÁBAN

|   |     |
|---|-----|
| Kozmikus infrahang-diagnosztika ( <i>Kolláth Zoltán</i> ) | 392 |
|---|-----|

*Z. Trócsányi*: The 2006 Nobel prize in physics

*J. Németh, L. Szabados*: The dark matter

*I. Földes*: Particle acceleration in a laser plasma

*G. Gergely*: 25 years of elastic peak electron spectroscopy

### TEACHING PHYSICS

*A. Jubász*: Simple demonstration experiments with magnets

*I. Szatmári-Bajkó*: Some Chaos? Yes, let us have it!

*S. Ujvári*: Comment on the problems of the Hungarian Szilárd Leó physics competition

### BOOKS, TENDERS, EVENTS

### SCIENCE IN BITS FOR THE SCHOOL

Infra-acoustical vibration diagnostics of stars (*Z. Kolláth*)

*Z. Trócsányi*: Der Nobel-Preis in Physik 2006

*J. Németh, L. Szabados*: Die dunkle Materie

*I. Földes*: Teilchenbeschleunigung in Laserplasmen

*G. Gergely*: 25 Jahre Spektrometrie der elastischen Elektronenstreuung

### PHYSIKUNTERRICHT

*A. Jubász*: Einfache Demonstrationsexperimente mit Magneten

*I. Szatmári-Bajkó*: Etwas Chaos? Ja, erwünscht!

*S. Ujvári*: Über Aufgaben des ungarischen L. Szilárd-Wettbewerbs in Physik

### BÜCHER, AUSSCHREIBUNGEN, EREIGNISSE

### WISSENSWERTES FÜR DIE SCHULE

Die Diagnostik infraakustischer Schwingungen von Sternen (*Z. Kolláth*)

*З. Троцани*: Нобелевская премия по физике 2006. года

*Ю. Немет, Л. Сабадош*: Темное вещество

*И. Фёльден*: Ускорение частиц в лазерной плазме

*Г. Гергель*: 25 лет спектрометрии упругого рассеяния электронов

### ОБУЧЕНИЕ ФИЗИКЕ

*A. Юас*: Простые демонстрационные опыты с магнитами

*И. Сатмару-Байко*: Немного хаоса? Да, именно хаос!

*Ш. Уйвари*: О задачах венгерской компетенции им. Л. Силарда

### КНИГИ, ОБЪЯВЛЕНИЯ-КОНКУРСЫ, ПРОИСХОДЯЩИЕ СОБЫТИЯ

### НАУЧНЫЕ ОБЗОРЫ ДЛЯ ШКОЛ

Диагностика колебаний космических предметов в инфраакустическом диапазоне (*З. Коллат*)

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-postacíme: mail.elft@mtesz.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.

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

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

HU ISSN 0015-3257

# 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

11. szám

2006. november

### A 2006. ÉVI FIZIKAI NOBEL-DÍJ

Trócsányi Zoltán  
Debreceni Egyetem

*A természet megismerésének kulcsa  
megfigyeléseink pontosságának fokozása*

Mai, kozmológiai megfigyelésekre alapuló, elképzelésünk szerint a Világegyetem 13,7 milliárd évvel ezelőtt „Ősrobbanásban” született. Egyelőre nem ismerjük sem a robbanás okát, sem a kezdeti pillanat pontos történéseit. A tapasztalati tények *értelmezése* alapján azonban nagy biztonsággal mondhatjuk, hogy harminc perccel az Ősrobbanás után a Világegyetemet  $100 \text{ kg/m}^3$  sűrűségű elektromágneses plazma töltötte ki, amelyben nagyrészt csak elektromágneses sugárzás volt. A hőmérséklet elérte a 300 millió kelvint. Ilyen magas hőmérsékleten az elektromágneses sugárzás leginkább nyüzsgő részecskék – fotonok – halmazaként fogható fel. A fotonok mellett kevéske anyag is volt. Átlagosan 600 millió fotonra jutott egy könnyű atommag – többnyire proton vagy alfa-részecske, ritkábban deuteron, triton,  $^3\text{He}$ ,  $^7\text{Li}$  – és egy-két elektron. Az elektronok és az atommagokban található protonok száma egyenlő, és így a világ összességében elektromosan semleges volt. Helyileg az atommagok és elektronok nem alkottak semleges kötött rendszert, ezért a fotonok nem tudtak szabadon haladni, nagy gyakorisággal ütköztek a környezetükben található töltött részecskékkel. Az ilyen fotongáz ideális gáznak tekinthető, az elemi statisztikus mechanika jól ismert törvényei érvényesek rá. Egy fotonnak két szabadsági foka van.

Minél sűrűbb az anyag, annál rövidebb benne a részecskék átlagos szabad úthossza, annál gyakrabban ütköznek a részecskék egymással. Az ütközések eredményeként a forró, sűrű plazmában levő hőmérséklet-különbségek gyorsan kiegyenlítődték, a hőmérsékleti egyensúly hamar kialakult. A világ tehát átláthatatlan és mindenhol ugyanolyan, szóval nagyon unalmas volt. Volt azonban egy érdekes tulajdonsága, a geometriai tér, amelyben a Világegyetem létezik, tágult és tágul azóta is. Ezt a tágulást *Edwin Hubble* fedezte fel az 1930-as években, és tiszteletére Hubble-féle tágulásnak nevezik. Mennyiségileg azt mondhatjuk, hogy a Világegyetemben egymástól  $r$  távolságra található két pont

$v$  sebességgel távolodik egymástól, és a távolodás sebessége arányos a távolsággal,  $v = H_0 r$ . A  $H_0$  arányossági együttható a Hubble-állandó, értéke  $71 \text{ km/s/Mpc}$ , reciprokának közvetlen fizikai jelentése, hogy megadja a Világegyetem életkorát<sup>1</sup>.

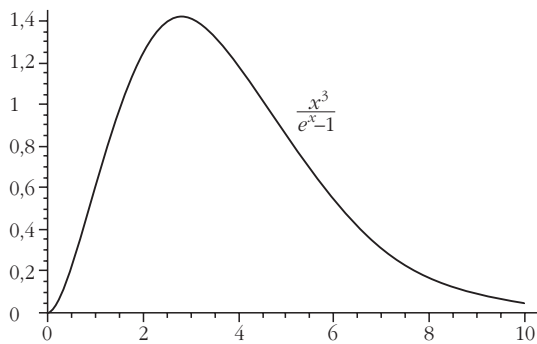
A fotongázban a hőmérséklet-kiegyenlítődéssel üteme sokkal gyorsabb volt, mint a tágulásé, ezért a tágulás egyensúlyi állapotokon keresztül történt. *Max Planck* munkássága nyomán tudjuk, hogyan lehet jellemezni az anyaggal hőmérsékleti egyensúlyban levő elektromágneses sugárzást. A fotongáz energiasűrűsége a hőmérsékletnek ( $T$ ) és a fotonok frekvenciájának ( $\nu$ ) függvénye. A  $[\nu, \nu + d\nu]$  tartományba eső fotonok energiasűrűségét a Planck-féle képlet írja le,

$$d\varepsilon(\nu, T) = \frac{8\pi h}{c^3} \frac{\nu d\nu}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1},$$

ahol  $h$  a Planck-,  $k$  a Boltzmann-állandó,  $c$  pedig a fény sebessége üres térben (*1. ábra*). Ha a térben két pont távolsága kétszeresére nő, akkor egy  $\lambda$  hullámhosszúságú foton hullámhossza is a kétszeresére nő, az energiája pedig a felére csökken ( $E_\nu = hc/\lambda$ ). A fotonok sűrűsége nyolcadára és így a fotongáz energiasűrűsége tizenhatedikére esik,

$$d\varepsilon\left(\frac{\nu}{2}, T\right) = \frac{1}{16} d\varepsilon(\nu, T) = \frac{8\pi h}{c^3} \frac{\left(\frac{\nu}{2}\right)^3 \frac{d\nu}{2}}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1},$$

<sup>1</sup> A tágulás csak egymástól távol lévő égitestek között észlelhető. A közeli testek távolodási sebességét az általános tömegvonzás megváltoztatja, stabilizálja vagy akár közeledéssé is alakíthatja.



1. ábra. A Planck-féle eloszlás dimenziótlán változókkal

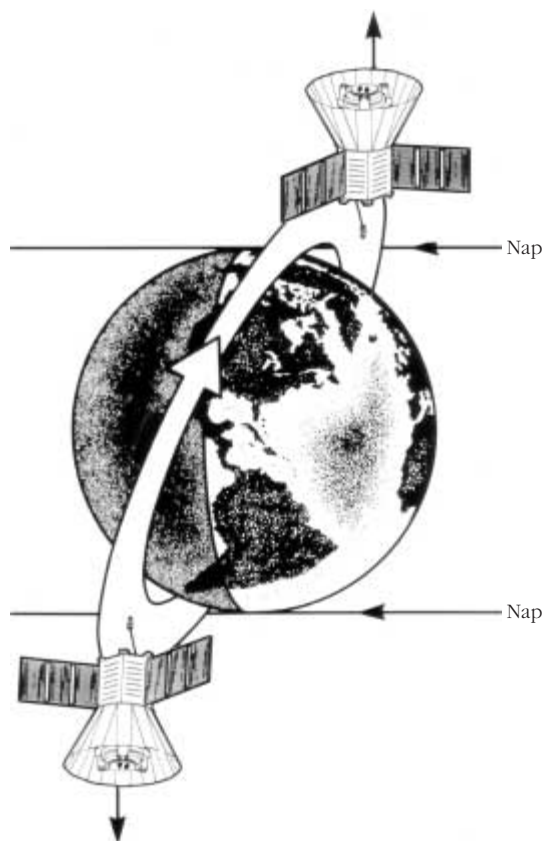
amit úgy is felfoghatunk, hogy az eredeti sugárzási kép-  
letbe feleakkora hőmérséklet került,

$$d\varepsilon\left(\frac{\nu}{2}, T\right) = d\varepsilon\left(\nu, \frac{T}{2}\right),$$

vagyis, hogy a Világegyetem a tágulással fordított arány-  
ban hűlt.

380 ezer évvel később az eredeti 300 millió K hőmér-  
séklet 3000 K-re csökkent. Ezen a hőmérsékleten a plaz-  
mában levő elektronoknak már nem volt elegendő moz-  
gási energiájuk ahhoz, hogy elszökjenek az atommagok  
vonzása elől, ezért kialakultak a semleges atomok. Sza-  
bad töltött részecske hiányában a Világegyetem átlátszó-  
vá vált a fotonok számára. Ettől kezdve a kezdetben hő-  
mérsékleti sugárzásként jellemezhető elektromágneses  
sugárzás szabadon tágult, és tágul mind a mai napig. A  
szabad tágulás eredményeként a sugárzás energiájának  
hullámhossz szerinti eloszlása csak annyiban változott,  
hogy a hőmérséklete a Világegyetem tágulásának mérté-  
kével fordított arányban csökkent. Ez a mindent kitöltő,  
egyenletesen eloszló hőmérsékleti sugárzás ma is megta-  
lálható a Világegyetemben, és 1964-ben *Arno Penzias* és  
*Robert Wilson*, két mérnök, fel is fedezték érzékeny mik-  
rohullámú antennájukkal.

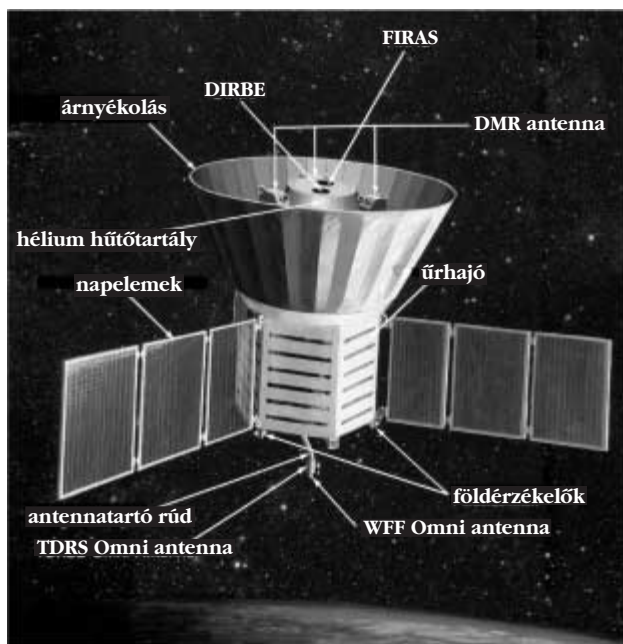
Penzias és Wilson csak egy frekvencián mérték a vil-  
lágűrből jövő sugárzás intenzitását, azt csak feltételez-  
ték, hogy a sugárzás teljes spektrumát a Planck-féle el-  
oszlás írja le. Ennek alapján a kozmikus eredetű sugár-  
zás hőmérsékletét 3 K-nek mérték. Ha valóban a rég-  
múltban jelen levő 3000 K-es hőmérsékleti sugárzás  
maradványát találták, akkor a keletkezése óta a Világ-  
egyetem 1000-szeresére tágult! Ez a sugárzás messze a  
legrégebbi, és így legtávolabbról jövő jel, amelyet a csil-  
lagászok valaha is észleltek – jóval a galaxisok és csilla-  
gok keletkezése előtt indult útjára. Természetesen ah-  
hoz, hogy a sugárzás eredetére vonatkozó értelmezés  
helyes legyen, be kell tudni bizonyítani, hogy valóban  
hőmérsékleti sugárzást észleltek. Ehhez pedig meg kell  
mérni a sugárzás erősségét különböző hullámhossza-  
kon, és be kell látni, hogy a mérési eredmények az el-  
mélet által jóslt eloszlásgörbére illeszkednek. Csak-  
hogy ilyen mérést földi antennával nem lehet kivitelez-  
ni, mert a Föld légköre, amely átlátszó a mikrohullámok  
számára, tehát az 1 cm-es, vagy annál hosszabb elektro-  
mágneses sugárzás számára, elnyeli a rövidebb – infra-  
vörös, ultraibolya, röntgen – hullámokat. A sugárzás in-



2. ábra. A COBE műhold Föld körüli pályájának vázlatos rajza. A mű-  
hold mindig úgy fordul, hogy a Földnek hátat fordítson és a napsuga-  
rakra merőlegesen álljon.

tenzitásának az 1 mm-es hullámhossznál van maximu-  
ma, ahol a légkör erősen átlátszatlan. Bár az 1960–70-es  
években sok olyan mérést végeztek különböző hullám-  
hosszakon a kozmikus sugárzás spektrumának kiméré-  
sére, amelyik alátámasztotta a Planck-féle eloszlást,  
mégsem lehetett egyértelmű következtetést levonni.

3. ábra. A COBE műhold vázlatos felépítése



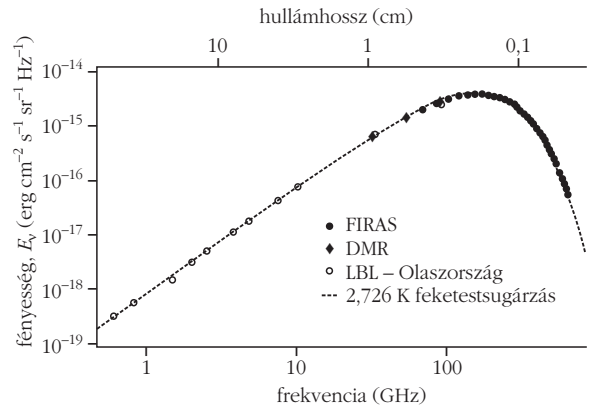
Egyrészt voltak olyan mérések is, amelyek eredménye jelentősen eltért a hőmérsékleti sugárzás intenzitáseloszlásától, másrészt a Földről csak a spektrum hosszuhullámú tartományát lehetett ellenőrizni. A mérések mindaddig nem lehettek bizonyító erejűek, amíg az antennát fel nem vitték a világűrbe. Ezzel a céllal indították útjára 1989-ben a COBE (Cosmic Background Explorer) űrszondát. A világútból való észlelésnek előnye az is, hogy napszaktól függetlenül hosszú méréseket lehet végezni, növelve a mérés pontosságát. Az antennákat mindig úgy forgatták, hogy se a Nap fénye, se a Földről kiinduló sugárzás ne zavarja a mérést (2. ábra).

A COBE története 1974-ben kezdődött, amikor a NASA felhívást adott ki az űrből végezhető csillagászati megfigyelésekre. A szerződés kötés, majd a több mint 1000 mérnökből és kutatóból álló kísérleti együttműködés közel másfél évtizedes előkészületi munkálatai után 1989. november 18-án lőtték fel a műholdat három antennával a fedélzetén (3. ábra). Az antennák különböző hullámhossztartományokban mérték a világútból érkező fotonok intenzitását. A COBE együttműködés és rajta a FIRAS (Far InfraRed Absolute Spectrometer) kísérlet vezetője *John C. Mather* volt. A céljuk a háttérsugárzás intenzitásának mérése volt a 0,1–10 mm hullámhossz tartományban, és a mérés eredményét az Planck-görbével hasonlították össze. A COBE rendkívüli jelentőségű eredményt szolgáltatott. *A COBE-ra szerelt antennákkal mért spektrum volt a legtekélyesebb hőmérsékleti sugárzási színekép, amelyet valaha is láttunk* (4. ábra), így erős bizonyítékot kaptunk arra nézve, hogy a Világegyetem valamikor legalább 1000-szer kisebb és sokkal forróbb volt, mint ma. A mai hőmérséklet 2,728 K.

## A kozmikus háttérsugárzás irányfüggése

A műholdra szerelt antennával ellenőrizni lehet még a sugárzás iránytól való függését is (a sugárzás nem szóródott a légkörön). Ha a Világegyetem valóban termikus egyensúlyban volt az atomok keletkezésekor, akkor a visszamaradt sugárzás hőmérséklete nem függhet attól, milyen irányba fordítjuk az antennánkat. A DMR (Differential Microwave Radiometer) antennák 3,3, 6,5 és 9,5 milliméteres elektromágneses hullámok észlelése céljából készültek. Ebben a tartományban a legerősebb a háttérsugárzás, és így viszonylag legkisebb a Tejútból jövő zavaró sugárzás. Minden hullámhosszon két antennát működtettek, amelyek egymással 60°-os szöget zártak be. Ennek az volt a célja, hogy a különböző irányból érkező háttérsugárzás intenzitását össze lehessen hasonlítani. A DMR kísérletet *George F. Smoot* vezette. A COBE döntő jelentőségűnek bizonyult a kozmikus háttérsugárzás irányfüggetlenségének igazolásában is.

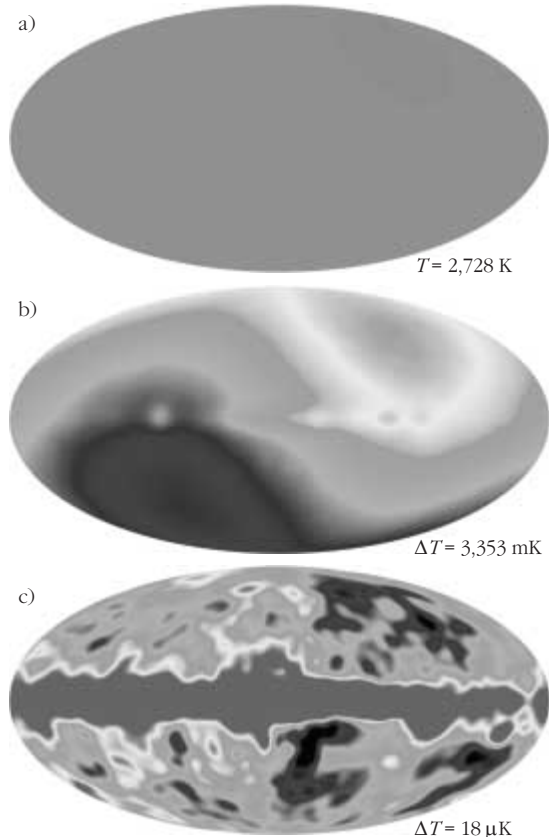
Mint említettük, az elsődleges elméleti várakozás szerint a mindenütt megtalálható háttérsugárzás hőmérsékletét minden irányban ugyanakkorának kell találnunk. Ezt a képet azonban egy lényeges hatás árnyalja. A Föld mozog a háttérsugárzáshoz képest, ezért a mozgásirányával szemben beérkező fotonok észlelt hullámhossza rövidebb (így a mért hőmérséklet magasabb), az ellentétes

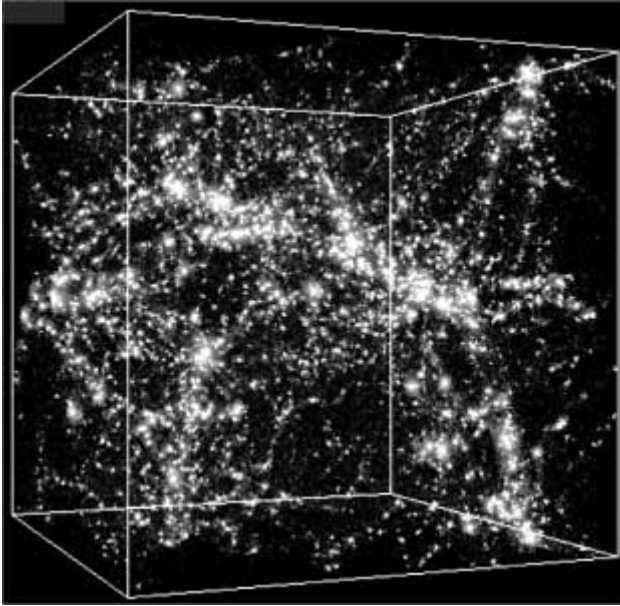


4. ábra. A FIRAS és DMR antennák által mért hőmérsékleti spektrum összehasonlítása a Planck-görbével. A vízszintes tengelyen a sugárzás hullámhossza/frekvenciája, a függőleges tengelyen a fényintenzitás van feltüntetve logaritmikus skálán.

irányban pedig az észlelt hullámhossz nagyobb (így a mért hőmérséklet alacsonyabb), mint a valóság. A mért hullámhosszaknak ez a torzulása a jól ismert Dopplereffektusnak köszönhető. A hőmérsékletnek az előre-hátra irányokban való eltérését dipólus anizotrópiának nevezik a kozmológusok. A DMR valóban felfedezte a dipólus anizotrópiát (5.b ábra). Az előre-hátra irányok között a hőmérséklet-különbség igen kicsi, 3,353 mK. Ebből az adatból meg lehet határozni a Föld sebességét a háttérsugárzáshoz képest.

5. ábra. DMR által készített hőmérsékleti térkép. a) A háttérsugárzás átlagos hőmérséklete. b) A dipólus anizotrópia. A piros melegebb, a kék hidegebb tartományt jelent. A relatív eltérés mintegy 1%. c) A háttérsugárzás hőmérséklete a dipólus anizotrópia levonása után. A középső széles sáv a Tejútrendszerből származó sugárzási háttér.





6. ábra. A Világegyetem nagyléptékű szerkezete. A kocka élhossza mintegy 40 Mpc. A fehér pontok csillagrendszereket jelölnek. A sűrűsödések galaxishalmazok.

A COBE legfontosabb felfedezése azonban az volt, hogy a mérés hibabátáránál nagyobb eltérések vannak a háttérsugárzás hőmérsékletében a különböző irányokban akkor is, ha a Föld mozgásából származó batást levonjuk (5.c ábra). A DMR szögfelbontása  $7^\circ$  volt, és azt találta, hogy  $18 \mu\text{K}$ -es hőmérséklet-különbségek fordulhatnak elő a  $7^\circ$ -nál nagyobb látószög alatt látszó tartományokban. A kozmológusok a  $10^{-5}$ -es relatív eltérést az irányfüggetlenségtől annak bizonyítékaként fogják fel, hogy az újszülött Világegyetemben eleve voltak olyan sűrűség-ingadozások, amelyek a gravitációs vonzás erősítő hatása révén a ma megfigyelt szerkezet (galaxisok, galaxishalmazok) kialakulásához vezettek (6. ábra). Hogy mi okozta ezeket a sűrűség-ingadozásokat, egyelőre nem tudjuk, de feltehetően elemirész-fizikai oka van.

A 2006. évi fizikai Nobel-díjat Mather és Smoot kapták „a kozmikus háttérsugárzás Planck-formájának és irányfüggésének felfedezéséért” (7. ábra).

## Hogyan látjuk ma a világot?

A Világegyetemről alkotott képünk pontosításához a háttérsugárzásnak az iránytól való piciny függését mennyiségileg kell tudnunk megfogalmazni, hogy a kapott eredményt a különböző ősrobbanás-modellek által jósolt irányfüggéssel pontosan össze tudjuk hasonlítani, lehetőséget teremtve ezáltal egyes modellek megerősítéséhez, mások kizárásához. Hogyan lehet ezt a mennyiségi megfogalmazást megtenni? Ennek megértése céljából egy kis kirándulást kell tennünk a hangtan területére.

A hangokat három fizikai tulajdonsággal, a hangerőséggel, a hangmagassággal és a hangszínnel szoktuk jellemezni. Ezek közül a harmadik nem független az első kettőtől. A hangerősség az észlelt hanghullámok által idő és felületegységenként szállított energia jellemzője. A



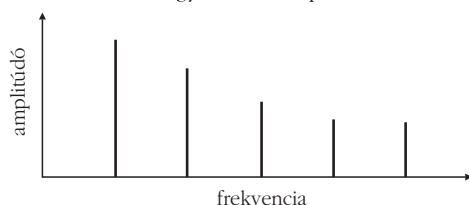
7. ábra. A 2006. évi fizikai Nobel-díj kitüntetettjei: John C. Mather (NASA Goddard Űrközpont) és George F. Smoot (Kaliforniai Egyetem, Berkeley).

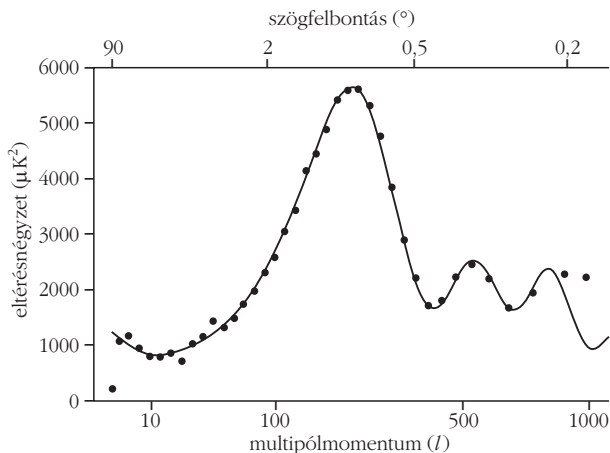
hang a hullámokat szállító rugalmas közeg, többnyire levegő rugalmas rezgése. A szállított energia a rezgés amplitúdójának négyzetével arányos, tehát az erősebb hang nagyobb amplitúdójú rezgést jelent.

A levegő rezgését valamilyen rezgésre képes rugalmas anyag kelti. Például az emberi beszéd esetén a gégefőben található hangszalag. Könnyebben tanulmányozhatóak egy kifeszített rezgő húr rezgései, például a hegedűhúr. A két végén rögzített, véges hosszúságú húron nem tud akármilyen hullámhosszú, vagy ezzel egyenértékűen akármilyen frekvenciájú rezgés tartósan fennmaradni, csak olyan, amelynek a félhullámhossza egész számszor ráfér a húrra. Ilyen módon a keltett hang frekvenciája sem lehet akármekkora. Amikor a húron csak egyetlen egy félhullám rezeg, a keltett hangot a húr alapharmonikusának nevezzük, amikor több, az úgy keltett hangok a felharmonikusok.

A rezgő húron egyszerre többféle hullámhosszú rezgés is kialakulhat, ilyenkor egyszerre halljuk az alap- és felharmonikusokat. Az alap- és felharmonikusok amplitúdójának viszonya határozza meg a hallott hang hangszínét. A hangszínt a hang spektrumával, azaz az egyes harmonikusokhoz tartozó hanghullámok amplitúdójával – tehát lényegében az erősségével – lehet jellemezni. Egy véges hosszúságú húron kialakuló bármilyen rezgés egyértelműen felbontható az alap- és felharmonikus rezgésekre, tehát egyértelműen jellemezhető a hang spektrumával (a hangszínnel, 8. ábra). Ugyanez elmondható egy kifeszített rugalmas hártya (például dob) rezgéseiről is, csak a felbontás matematikailag összetettebb: a húr esetében Fourier-sor, a hártya esetén gömbi harmonikusok szerinti sor együtthatói adják a spektrumot.

8. ábra. Egy ideális húr spektruma





9. ábra. A háttérsugárzás spektruma. Vízszintes tengelyen a Legendre-polinomok indexe, illetve a megfelelő szögfelbontás, a függőleges tengelyen az átlaghőmérséklettel való eltérés amplitúdójának négyzete.

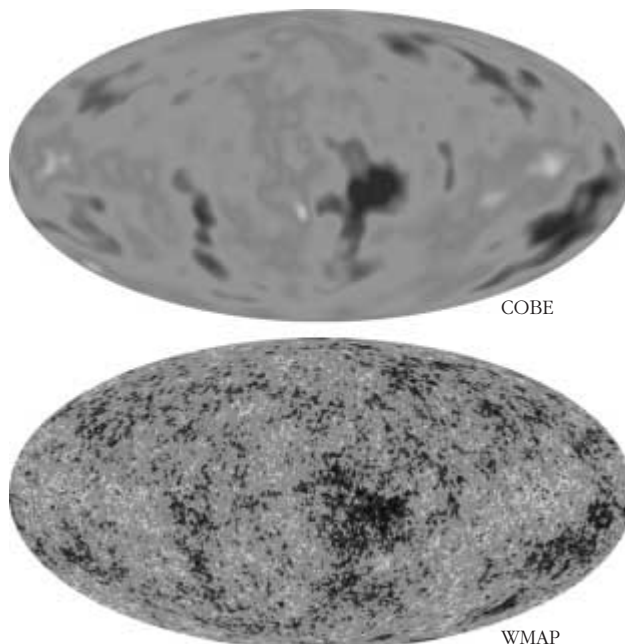
A háttérsugárzás hőmérsékletfüggése és egy kifeszített hártya rezgése között párhuzamot vonhatunk, és így meghatározhatjuk a háttérsugárzás határozatát (9. ábra). Ez a spektrum mennyiségileg határozza meg mennyire hirtelen változik a kozmikus sugárzás hőmérséklete, ha különböző irányokba tekintünk az égen. A spektrumot össze lehet vetni az ősrobbanásmodellek által számított spektrumokkal, és így egyes modelleket ki lehet zárni, másokat meg lehet erősíteni. A COBE adatai azonban nem elegendően pontosak, a hőmérsékleti térkép felbontása durva, így a spektrumnak csupán az első néhány elemét lehet meghatározni. Az adatok pontosítása érdekében 2001. június 30-án egy új műholdat, a WMAP-ot (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) bocsátották Föld körüli pályára. A WMAP minden korábbi mérésnél pontosabban határozta meg a háttérsugárzás hőmérsékleti térképét. A csecsemő Világegyetemről készített fénykép egyszerre kitisztult (10. ábra).

A WMAP adatai és más csillagászati megfigyelések alapján a következő egységes képünk alakult ki a Világegyetemről:

- A Világegyetem születése után mintegy 2 századmásodperccel, 13,7 milliárd évvel ezelőtt igen nagy sűrűségű és hőmérsékletű elektromágneses plazmával volt kitöltve. A plazmát nagyrészt elektronok, pozitronok, elektromágneses sugárzás töltötte ki, ezenkívül volt benne kevéske proton és neutron. A kor meghatározás hibája alig több mint 1%.

- A Világegyetem születése után gyorsan tágult és hűlt. Amikor a hőmérséklete 900 millió kelvin alá süllyedt, a harmadik perc végén hirtelen kialakultak a könnyű elemek (a hidrogén, a hélium, a lítium, a berillium és a bór) atommagjai.

- 379 ezer évvel később, amikor a hőmérséklet mintegy 3000 K alá süllyedt az elektromágneses plazmából kialakultak a semleges atomok, és így a sugárzás és az anyagi részecskék közötti kölcsönhatás gyakorlatilag megszűnt. Ettől kezdve a sugárzás szabadon tágult a Világegyetemmel, és hűlt a ma mérhető 2,73 K-es értékre.



10. ábra. A COBE és a WMAP által készített hőmérsékleti térképek

- Az első csillagok mintegy 200 millió évvel később gyulladtak ki a tömeggel rendelkező anyagi részecskék között fellépő gravitációs vonzás következtében keletkező sűrűsödés és felmelegedés hatására.

- A Világegyetem tágulását meghatározó Hubble-állandó jelenlegi értéke  $H_0 = 71 \text{ (km/s)/Mpc} = 1/(13,7 \text{ milliárd év})$ . A mérés relatív hibája 5%.

- Az adatok jelenlegi értelmezése szerint a Világegyetem örökké tágulni fog, azonban az erre vonatkozó ismereteinket újabb, pontosabb mérési adatok módosíthatják.

- A Világegyetem 4%-a áll a bennünket is felépítő atomokból. 23%-a olyan úgynevezett „sötét anyag”, amelyet laboratóriumban eddig nem sikerült előállítani, így tulajdonságait sem ismerjük. A Világegyetem energiájának 73%-a ismeretlen „sötét energia” formájában van jelen. (Mielőtt bárki szeretné a sötét energiát az emberiséget érintő energiaválság megoldására felhasználni, hangsúlyozni szeretném, hogy ezek az adatok a tágulással egyetemben csak elképzelhetetlenül nagy, mintegy 100 Mpc-nél nagyobb léptékben érvényesek. A Földön nincs sem titokzatos sötét anyag, sem sötét energia.) A részecskefizikusok arról álmodnak, hogy a Genf mellett épülő részecskegyorsító, a Large Hadron Collider (LHC) proton–proton ütközéseiben talán sikerül olyan újfajta részecskéket előállítani, amelyek a sötét anyag nagy részét alkotják.

A WMAP tehát megerősítette a COBE méréseit, Nobel-díjat hozva a COBE vezéregyéniségeinek. Adatai alapján azonban olyan kérdéseket is feltehetünk, hogy milyen volt a Világegyetem az első 2 századmásodpercben. A modellek által jósolt hőmérsékleti spektrum és a mért spektrum összevetése azt sugallja, hogy a nagyon korai időszakban volt egy rövid „felfűvódási” szakasz, amikor egyelőre ismeretlen fizikai ok miatt a Világegyetem lényegesen gyorsabb ütemben tágult. A mai kutatások elsősorban a felfűvódási szakasz jobb megértésére irányulnak.

Több mint 70 éve *Fritz Zwicky* megállapította, hogy a galaxishalmazok anyagának legnagyobb része nem világító, azaz sötét anyag. Három évtizeddel ezelőtt határozták meg a sötét tömeg pontos arányát az egyedi galaxisokban, és csak néhány éve, elsősorban a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás fluktuációiból, az egész Univerzumra vonatkozóan.

Időrendben először tehát a galaxishalmazok környezetében levő láthatatlan anyagkomponens létének szükségességét vetődött fel. A Coma-galaxishalmazt alkotó galaxisok mozgási sebességéből és abból a tényből, hogy a galaxishalmaz milliárd éves időskálán gravitációsan kötött rendszer, a viriál-tételt alkalmazva kiszámítható a halmaz össztömege. (A viriál-tétel értelmében egy zárt rendszer kinetikus energiája a gravitációs potenciális energiájának fele.) A látható tömeg, vagyis a halmazbeli galaxisok tömegének összege kisebbnek adódott a galaxishalmaz össztömegénél. *Zwicky* ezzel az 1933-as felfedezésével azonban messze megelőzte a korát, és meglehetősen eredményére nem fordítottak kellő figyelmet. (Amit, részben, az is magyaráz, hogy a zseniális tudóst kellemetlen modora miatt igyekeztek elkerülni a szakmabeliek.)

A sötét anyag létre csak az 1960-as évek végén született újabb bizonyíték, amikor *Vera Rubin* kezdő csillagászként spirális galaxisok forgási sebességét kezdte vizsgálni. A centrum környékétől eltekintve az ilyen galaxisokban a csillagok a vonzócentrumtól távolodva egyre kisebb sebességgel, *Kepler 3.* törvényének megfelelően keringenek a galaxis középpontja körül. Ennek értelmében a csillagok  $V$  pályamenti sebessége nagy  $r$  sugárnál

$$V^2 = \frac{GM_{vis}}{r},$$

ahol  $G$  a gravitációs állandó,  $M_{vis}(r)$  a látható anyag tömege. Am kifelé haladva ez a szabályosság egyre kevésbé érvényesül: egy bizonyos értéknél nagyobb sugárnál a keringési sebesség nem csökken tovább kifelé haladva, hanem állandósul. Minthogy a keringési sebességet az adott sugáron belüli össztömeg (és maga a sugár) szabja meg, a galaxisok rotációs görbéje (a csillagok keringési sebességének a galaxis centrumától mért távolságtól való függését ábrázoló függvény) arra utal, hogy az adott sugáron belül jelentős tömeg van, amely láthatatlan marad, sugárzását ugyanis nem észleljük (1. ábra).

A spirálgalaxisok korongja nem ér véget a centrumtól legtávolabb keringő csillagoknál. Még kijebb jelentős mennyiségű hidrogént tartalmazó felhők vannak, amelyek keringési sebessége a rádiótartományba eső 21 cm-es színképvonal Doppler-eltolódásából állapítható meg. Az így kiegészített rotációs görbe kijebb is sebességállandósulást, azaz további nagy mennyiségű sötét anyagot jelez. Ennek a nem világító, csak gravitációs hatásáról felismerhető tömegnek a galaxisok halójában, a látható tömeget magában foglaló lapult rendszert gömbszerűen körülvevő térségben kell lennie.

Az Univerzum nagyléptékű szerkezetéből, a fiatal Világegyetemben kialakult struktúrákból következtetni lehet az átlagos tömegsűrűsége, és ez nagyobbak bizonyul a világító anyag tömegéből származtatható sűrűség-nél. A barionikus anyag sűrűsége külön is meghatározható, ugyanis a primordiális  $^4\text{He}$  izotóp előfordulási gyakorisága a barionsűrűség és a foton-sűrűség arányától függ.

## A Világegyetem anyagi összetétele

Összegezzük az Univerzum energiamérlegét. Az anyagsűrűségeket a  $\rho_c$  kritikus tömegsűrűség segítségével fejezzük ki. Ha  $H_0$  a Hubble-paraméter és  $G$  a gravitációs állandó:

$$\rho_c = H_0 \frac{3}{8\pi G}.$$

A kritikus tömeg az az anyagmennyiség, amennyi ahhoz szükséges, hogy a Világegyetem sík legyen, ami azt jelenti, hogy a tér nem görbült, azaz a háromszög szögeinek összege  $180^\circ$  (l. *Németh J.* – Fizikai Szemle 2004, 1). A továbbiakban az anyagsűrűségeket a kritikus értékhez viszonyítva adjuk meg. A különböző típusú anyagformákra vonatkozóan

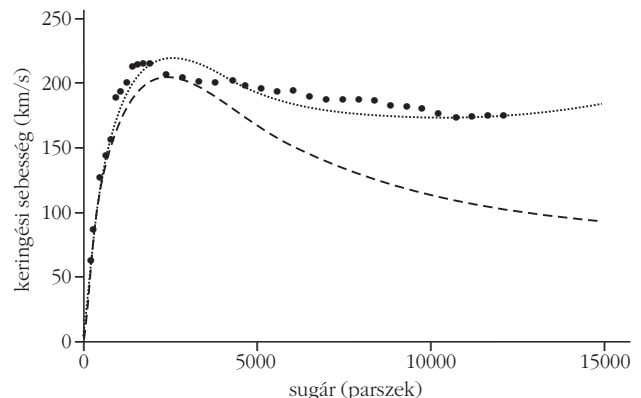
$$\rho_i = \Omega_i \rho_c.$$

A teljes anyagsűrűség pedig

$$\Omega = \sum \Omega_i.$$

Az Univerzum anyagára vonatkozóan a legpontosabb ismereteket a feketetest jellegű kozmikus háttérsugárzás (CMB) fluktuációjából nyerhetjük. A kritikus tömeg értéke, amelyet először 1992-ben határoztak meg (ezt jutalmazták 2006-ban a fizikai Nobel-díjjal), és 2003-ban rendkívül pontosan megmértek,  $\Omega \sim 1$ . Ezt az értéket adja  $\Omega$ -ra az inflációs modellek nagy része is.

1. ábra. Egy tipikus spirálgalaxis korongjának rotációs görbéje (a keringési sebesség a galaxis centrumától való távolság függvényében). A szaggatott vonal a Kepler-törvény alapján várt mozgásnak felel meg, a nagyobb pontok a mért sebességek, a pontozott vonal pedig a sötét anyag figyelembevételével végzett modellszámítás eredménye.



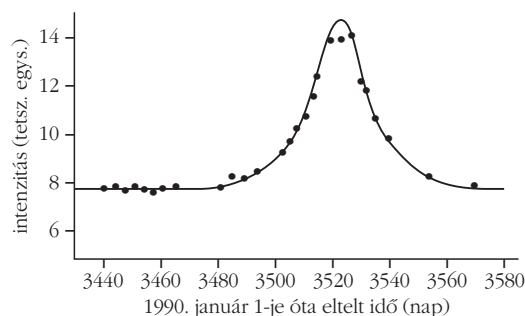
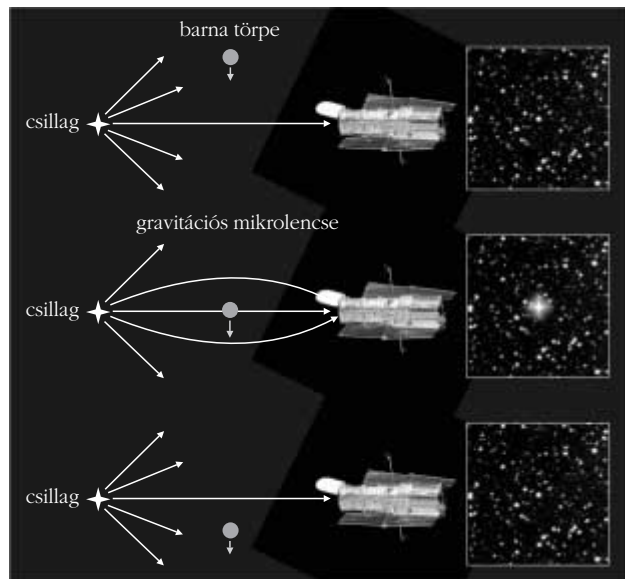


A CMB fluktuációiból a barionos anyagmennyiség értékét is meg tudták határozni, az a kritikus tömeg körülbelül 4%-ának adódott. Ugyanezt az értéket kapták a korai atommagképződés maradványaiból (a ma található primordiális, azaz a kezdetben kialakult deuterium, hélium- és lítiumatommagokból) is. A galaxisokban összecsomósodó, tehát gravitációsan kölcsönható, de ismeretlen részecskékből álló sötét anyag a kritikus tömeg körülbelül 26%-a, a teljesen ismeretlen, nem anyag jellegű, de az Einstein-egyenletekben fontos szerepet játszó sötét energia járuléka pedig ~70%-a a kritikus tömegnek. (A sötét anyag és a sötét energia teljesen más jellegű fogalmak. Például, a sötét anyag esetén a nyomás pozitív, a sötét energia esetén negatív, tehát ez utóbbi nem anyag jellegű mennyiség. A közös csak az bennük, hogy nem láthatóak.)

Korábban az a lehetőség is felvetődött, hogy nincs is sötét anyag, a létezésére utaló „tünetek” valójában „csak” a relativitáselmélettel kapcsolatos problémák. Az elmúlt 70 év alatt azonban a csillagászok annyi információt gyűjtöttek össze a sötét anyagra vonatkozóan, hogy annak létezését a cikk elején felsorolt bizonyítékok hatására mostanra majdnem mindenki elfogadta. A legfontosabb ismert tulajdonsága az, hogy gravitációsan kölcsönhat. Majdnem biztosan eddig ismeretlen elemi részecské(k)ből áll. Az asztrofizikusok és a részecskefizikusok közösen igyekeznek meghatározni, hogy miből. A sötét anyag hatását ismerjük, de az összetételét közvetlenül is szeretnénk megfigyelni. Az erre vonatkozó erőfeszítések a fizika legnehezebb kísérletei közé tartoznak. A remény az, hogy a mai kísérleti pontosság elegendő ahhoz, hogy néhány éven belül mégis megtudjuk, miből áll ez a különös anyagféleség.

## A sötét anyag lehetséges alkotórészei

A sötét anyag kétféle lehet: barionos (pl. barna törpék vagy közönséges anyagból álló más égitestek) és nem barionos. A keresett sötét anyag az Univerzum barionsűrűségének ismeretében csak elenyésző mértékben állhat protonokból, neutronokból, atommagokból. Mindenesetre a barionikus sötét anyag közvetlen kimutatásán is fáradoznak a kutatók. A testé összeállt barionikus anyag sötét marad, ha nem tud csillaggá alakulni. Ilyen égitest lehet például barna törpe vagy akár bolygó is. Akkor is sötét tömeggé válik az égitest, ha korábban csillag volt, és a csillagfejlődés végén a kezdeti csillagtömegetől függően fehér törpe, neutroncsillag vagy fekete lyuk lesz belőle. A Tejútrendszer korongjának peremvidékén, illetve a galaktikus halóban levő ilyen égitestek – amelyekre közös néven MACHO-ként (*Massive Compact Halo Object*) hivatkoznak – a sugárzásuk alapján nem mutathatók ki. A MACHO-k össztömegét a gravitációs mikrolencse jelensége alapján lehet becsülni. A sötét testek ugyanis mozgásuk során a látóirány mentén közel kerülhetnek egy-egy háttércsillaghoz. Ilyenkor az általános relativitáselméletnek megfelelően átmenetileg felerősíthetik a háttércsillag fényét (2. ábra). Az ilyen mikrolencse-jelenséget csillagokban gazdag háttér, például a két Magellán-felhő irányában érdemes keresni. Az 1990-es években több nagyszabású fotometriai projektet hajtottak végre mikrolencse okozta



2. ábra. Gravitációs mikrolencse hatására bekövetkező átmeneti felfénylés. A változó fényű csillagokkal ellentétben a mikrolencse mindig időben szimmetrikus intenzitásváltozást eredményez. Mikrolencsénél csillag vagy kisebb méretű égitest váltja ki a lencsehatást.

felfénylések kimutatására. Bár több száz ilyen jelenséget találtak, gyakoriságuk alapján mégis arra következtettek, hogy a MACHO-k össztömege csak töredéke a Tejútrendszerhez tartozó sötét anyag tömegének.

Korábban azt is feltételezték, hogy tömeggel bíró neutrínók alkotják a sötét anyagot, de ez az elképzelés két okból is rossz: egyrészt a neutrínók össztömege nem elég nagy ehhez, másrészt a galaktikák kialakításában nem játszhatnak elég fontos szerepet. A forró (közel fénysebességgel mozgó) részecskék szabadon mozognak egymás mellett, és nem csomósodnak a megfigyelt módon galaxisokba. A sötét anyagnak tehát legalább 80%-ban hideg, nem barionos részecskékből (cold dark matter, CDM) kell állnia.

A sötét anyag jelöltjeinek ki kell elégíteniük néhány feltételt: stabilnak kell lenniük kozmológiai időskálán (másképpen mostanáig elbomlottak volna), gravitációs kölcsönhatásban részt vesznek, elektromágneses sugárzással csak gyengén hatnak kölcsön (különben nem lenne sötét az anyag), és a sűrűségüknek a kívánt mértékűnek kell lenniük. Szerencsére a részecskefizika standard modellje módosításokat sugall, például arra irányuló törekvések vannak, hogy igen nagy energián az erős, elektromágneses és gyenge kölcsönhatás leírása egyesíthető legyen. A kiterjesztés során számos olyan új elmélet válik lehetségessé, amelyik magyarázni tudja a sötét anyagot. A legesélyesebb

jelöltek a sötét anyag alkotóelemeire a „gyengén kölcsönható” (csak gravitációs és gyenge kölcsönhatásban résztvevő), nagy tömegű részecskék (WIMP-ek) és az axionok.

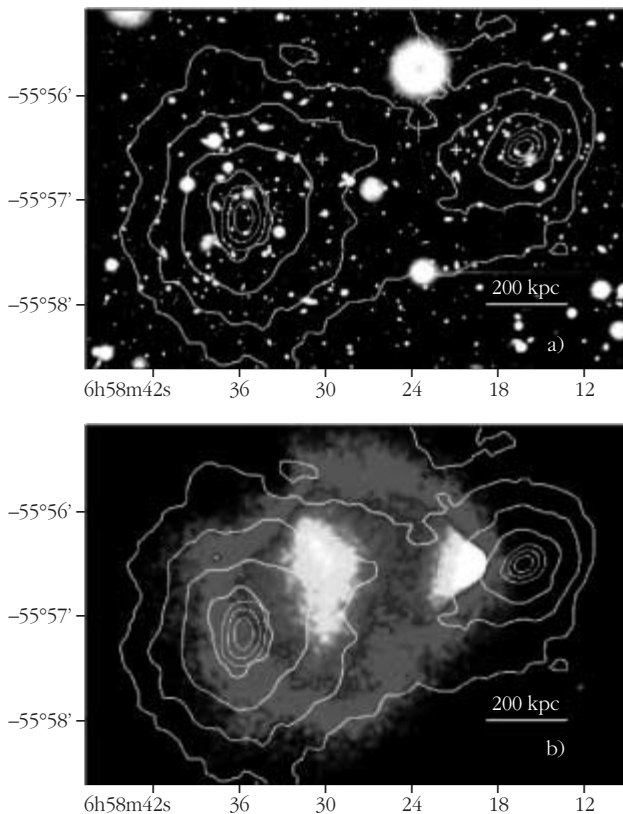
Az axionok könnyű részek,  $10^{-5} \text{ eV} < m < 10^{-2} \text{ eV}$  közötti tömeggel. Olyan gyengén csatolódnak az anyaghoz, hogy konvencionális detektorokban a megfigyelésük nem lehetséges. A részecskefizikában jóval a kvantumszindinamikai (QCD) átmenet feletti hőmérsékleten az axionok tömeg nélküliek.  $T < 1 \text{ GeV}$  alatti hőmérsékleten részecskefizikai effektusok miatt körülbelül 0,1 MeV tömeget nyernek.

A sötét anyag magyarázatára talán a szuperszimmetria-elmélet a legelfogadottabb. E szerint minden részecskének van egy „szuperpartnere”, ezek valószínűleg mind jóval nehezebbek, mint az ismert részecskék (tömegük 10 GeV és néhány TeV között lehet). A WIMP-ek a „szuperpartnerek” között keresendők. Ha infláció után ezek a részecskék termikus és kémiai egyensúlyban lettek volna a Standard Modell (SM) részecskéivel, meg lehetne határozni a jelenlegi sűrűségüket.

Az Ősrobbanás-elmélet szerint kezdetben a részecskék forró plazmája létezett. Az ütközések során részecskék keletkeztek és megsemmisültek. Amíg a hőmérséklet nagy, a WIMP-ek átmehetnek SM részecskékké, és fordítva. Legelőször azok a részek váltak ki ebből a keverékből, amelyek legkevésbé hatottak kölcsön a többivel. Kifagyás után lényegileg változatlan maradt külön-külön mindegyik típusú részecske száma. A becslések a két részecsketípus (WIMP és SM) kölcsönhatásának erősségére azt adják, hogy az körülbelül a gyenge kölcsönhatásával egyezik meg.

A sötét anyagot alkotó legvalószínűbb jelölt a (legkönnyebb) neutralínó, egyszersmind valószínűleg a legkönnyebb szuperrészecske. Ez stabilis, mert nem tud mire bomlani, ezenkívül semleges, így nem hat rá az elektromágneses erő. Meghatározható az Ősrobbanás során keletkezett és később is megmaradt neutralínók száma. Fontos körülmény, hogy az elképzelések szerint a Világegyetemben található neutralínók együttes tömege körülbelül megegyezik a sötét anyag tömegével, döntő bizonyítékot azonban csak a neutralínók közvetlen megfigyelése szolgáltathat. A szuperszimmetria-elmélet szerint a neutralínóknak van gyenge kölcsönhatásuk, így előfordulhat, hogy egy-egy neutralínó kölcsönhatásba lép azzal az anyaggal, amelyen áthalad. Manapság vannak olyan kísérleti elrendezések, amelyek ezt a kölcsönhatást próbálják különböző módon észlelni. Néhány év múlva megtudjuk, hogy ez az elképzelés helyes-e vagy sem.

A sötét anyag léte csak vagy laboratóriumi körülmények közötti mérésekkel, vagy speciális csillagászati körülmények között igazolható. Ez az utóbbi azt jelenti, hogy olyan rendszereket kell vizsgálni, ahol a barionos anyag és a sötét anyag szétválik. Összeolvadó galaxishalmazokban ez teljesül, és nemrég sikerült is ilyen galaxishalmazt megfigyelni. A Lövedék-galaxishalmaz hárommilliárd fényévre van tőlünk, és valójában egymáson áthatoló két galaxishalmaz. A rendszer teljes tömegét a gravitációs-lencse-hatás alapján állapították meg (ez azt jelenti, hogy a halmaz gravitációs tere eltorzítja a háttérgalaxisokból jövő fényt, és ezt a torzulást mérik), a világitó anyag tömegét az



3. ábra. A Lövedék-galaxishalmaz optikai képe (fent) és röntgenképe (lent). Az optikai képen jól különülnek az egymáson áthaladt két galaxishalmaz, a röntgenkép pedig arra utal, hogy az intergalaktikus plazma az ütközés során veszítve eredeti sebességéből lemaradt a galaxisokhoz képest. A szintvonalak a sötét anyagnak a gravitációs-lencse-hatás alapján meghatározott mennyiségére utalnak. A sötét anyag tehát a galaxisokkal együtt mozog, nem a röntgensugárzó intergalaktikus plazmával.

intergalaktikus röntgensugárzás és a galaxisok megfigyelésével. A két halmaz találkozásakor a barionos anyagból álló galaxisok tömegpontokként viselkedve ütközés nélkül áthaladnak egymáson, míg az intergalaktikus anyag folyadékszerűen viselkedő részecskéi egymással ütközve lelassulnak. Az intergalaktikus barionos anyag tehát lecsatolódik a galaxisokról. A két halmaz sötét anyaga viszont a látható galaxisokhoz hasonlóan mozog tovább, mivel részecskéi nem hatnak kölcsön egymással (3. ábra). A gravitációs-lencse-hatás alapján nemcsak a sötét anyag tömege, hanem az elhelyezkedése is számítható. A gravitációs potenciál eloszlása a galaxisok eloszlását követi, nem a röntgensugárzó forró plazmáét. A sötét anyag és a barionos anyag tömegének arányára ebből a mérésekből is a már ismert körülbelül hatos faktort kapták.

A sötét anyag létét sikerült tehát közvetlenül kimutatni, de változatlanul nem tudjuk, milyen részecskékből áll, csak annyit tudunk hogy gravitációsan kölcsönhat és nem barionos. A további megfigyelések már az asztrofizikusok feladatai közé tartoznak.

#### Irodalom

- KUN M., SZABADOS L.: *A Tejútrendszer változó arca* – Magyar Tudomány 2004/6, 722  
 NÉMETH J.: *A Világegyetem fejlődése* – Magyar Tudomány 2003/10, 1248  
 NÉMETH J.: *Mi az a sötét energia?* – Fizikai Szemle 54/1 (2004) 1  
 PATKÓS A.: *Mi jöhet Einstein után?* – In A fizika százada, a Természet Világa különszáma 2006, 112

Az elemi részecskék fizikájának születésétől, a 20. század 30-as éveitől kezdve a kutatások egyik legfontosabb eszköze a részecskegyorsító lett. A részecskék energiájának növelésével egyre újabb jelenségeket fedeztek és fedeznek fel. A részecskegyorsítók mérete általában növekszik a részecskék energiájával. A méretek szempontjából ökonomikus, körpályán való gyorsítás esetén az elérhető energiát a szinkrotronsugárzás fellépése korlátozza. A LEP gyorsító 4,2 km sugarú pályáján egy elektron 101 GeV-re gyorsul, a sugárzási veszteség 2 GeV egy kör alatt. Egy 290 GeV-es részecske azonban már körönként 50%-ot kisugározna, ezért továbblépést csak lineáris gyorsító jelenthet. (A hadronok nehezebbek, ezért esetükben a szinkrotronsugárzás nem olyan jelentős, az elérhető energia magasabb. A LEP 4,2 km sugarú alagútját felhasználó LHC gyűrűjében a protonok 7 TeV energiára való gyorsításához azonban csak szupravezető mágnesekkel megvalósítható 5,5 tesla térerősség szükséges.)

A lineáris gyorsítók esetében nincsenek elvi határok, nagy energiához csak megfelelő hossz kell. A hosszat a gyorsító tér gradiense határozza meg. Rádiófrekvenciás (GHz) terek esetében az üreg falán történő átütés ezt 50 MV/m-ben maximálja. Emiatt egy 500 GeV-es lineáris gyorsító hagyományos technológiával 50 km hosszú lenne, és ezt mind technológiailag, mind pedig pénzügyileg nehéz megvalósítani.

Egy izgalmas, új lehetőséget kínálnak a nagyteljesítményű lézerek, amelyekkel akár TV/m-nél is nagyobb térerősségek érhetőek el. A cikkben egy lehetséges új gyorsító-típusról, a lézerplazma-gyorsítóról írunk. A lézerplazmában a nagyteljesítményű lézerimpulzus olyan longitudinális plazmahullámot hoz létre, amely a töltött részecskéket gyorsítani képes. Mivel itt az átütés már megtörtént, az előbb említett limit már nem lép fel, plazmahullámokkal akár több száz GV/m gyorsítás is elérhető. Ez az első lépés egy kompakt részecskegyorsító irányában. Napjainkban az ultrarövid lézerimpulzusok elterjedésével rövid ideig hatalmas térerősségek érhetőek el, így az elmúlt években a részecskegyorsítás is mérföldes léptekkel haladt előre. Több száz MeV-os, lézerrel gyorsított kvázi-monokromatikus elektronnyalábot sikerült előállítani, és a proton-, illetve iongyorsítás is havonta szolgáltat új eredményeket.

## Alapfogalmak

Ha az elektromágneses tér viszonylag kicsi, akkor a töltött részecskék, így az elektronok a térerősség irányában végeznek rezgő mozgást. A rezgés periódusa az elektromágneses tér, a lézer terének periódusával egyezik meg, amplitúdóját a térerősség, azaz az intenzitás négyzetgyöke határozza meg. Ez a nemrelativisztikus

eset, amikor az elektron maximális sebessége is jóval kisebb a fénysebességnél ( $v \ll c$ ), a mágneses tér elhanyagolható. Ekkor a rezgés amplitúdója is jóval kisebb a fény hullámhosszánál. Ennek mértékéül egy dimenziótlan amplitúdót – jelöljük  $a_0$ -lal – szokás bevezetni, amely a térerősséggel, pontosabban a vektorpotenciállal arányos. Ez az  $a_0$  összefüggésben áll a lézer intenzitásával és a hullámhosszal az

$$a_0 = \sqrt{\frac{I_0 \lambda^2}{1,37 \times 10^{18} \text{ W } \mu\text{m} / \text{cm}^2}}$$

formula szerint. A relativisztikus küszöböt  $a_0 = 1$  esetén érjük el, amikor az oszcilláció sebessége már megközelíti a fénysebességet. Ebben az esetben az oszcilláció amplitúdója nagyobb a lézer hullámhosszánál, ezért a mágneses tér már nem hanyagolható el az elektronra ható Lorentz-erőben.  $1 \mu\text{m}$  lézerfényhullámhossz esetén ez a küszöb  $1,37 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$  intenzitást jelent.

Ez az intenzitás a mai ultrarövid lézerimpulzusokkal akár asztali méretekben is megvalósítható. A lézeres gyorsítás kulcsproblémája az, hogy a lézer transzverzális terét longitudinálissá kell átalakítani azért, hogy a részecskék egy irányban mozogva gyűjtsenek össze energiát. Míg a vákuumban az elektromágneses tér mindig transzverzális, a plazmának léteznek longitudinális sajátrezgései. Ezért a konverzió plazmákban történhet meg, a transzverzális elektromágneses hullám longitudinális plazma- (Langmuir-) hullámmá való átalakításával.

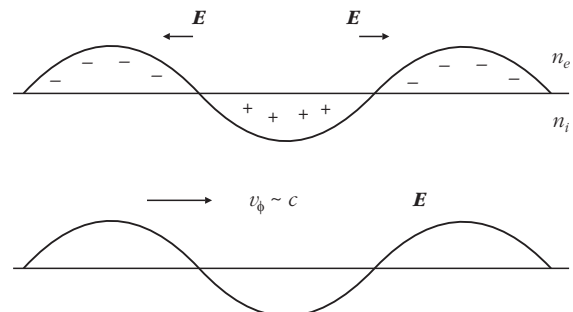
## A plazmahullámmal történő elektrongyorsítás fő mechanizmusai

A Langmuir-hullámmal való gyorsítás tárgyalásában *Jean-Raphaël Marques* kiváló összefoglalóját követjük [1]. Az elektronplazma-hullám longitudinális, azaz a térerősség párhuzamos a terjedés  $\mathbf{k}_p$  irányával, frekvenciája pedig

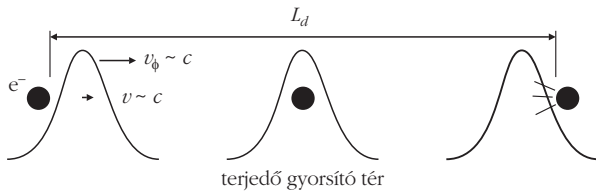
$$\omega_p^2 = \frac{4 \pi n e^2}{m}.$$

Ez már gyorsíthat, és a frekvencia csak a plazma sűrűségétől függ.

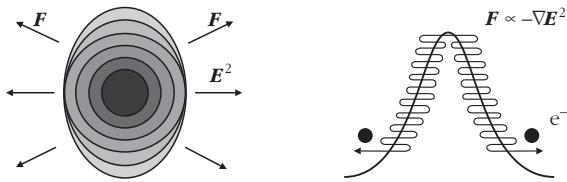
1. ábra. Töltésszétválasztás és a plazmahullám fázissebessége [1]



A munkát az OTKA K 60531 számú szerződése és a NAÜ HUN13579 szerződése támogatta.



2. ábra. A gyorsított részecske utoléri, majd elhagyja a hullámot [1]



3. ábra. A ponderomotoros erő gyorsító szerepe [1]

A transzverzális elektromágneses hullámból longitudinális teret kell csinálni, mégpedig töltésszétválasztással, amint azt az 1. ábra mutatja. Az  $E$  elektromos tér hatására az  $n_e$  sűrűségű elektronok rezgőmozgást végeznek az  $n_i$  elkent ionhátter előtt (az ionok mozgása lassabb, ezért elmozdulásuk elhanyagolható). Ez sűrűségperturbációt hoz létre, amely longitudinális plazmahullámként fog nagy sebességgel mozogni. A térerősség amplitúdója a  $\delta n$  perturbációból a Poisson-egyenlettel határozható meg:

$$E = 4\pi e v_0 \delta n,$$

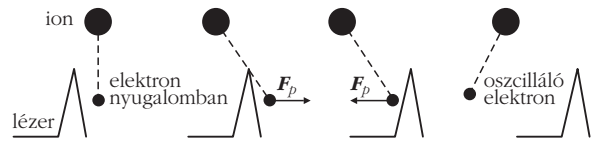
ahol  $v_0 = \omega_p / k_p$ , a perturbáció fázissebessége. Mivel a térerősség a sűrűségperturbációtól lineárisan függ, könnyen belátható, hogy  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  sűrűség esetén 1% sűrűségperturbáció már 1 GV/m longitudinális elektromos teret hozhat létre.

Egy ilyen hullám pontosan úgy gyorsítja az elektront, ahogy a vízhullám a szörfözőt. Szükség van egy kezdeti sebességre! Ha az elektron túl lassú, sebessége jóval kisebb a fénysebességnél, azaz  $\beta = v/c \ll \beta_0$ , vagy ha a hullám nem elég intenzív, akkor a hullám megelőzi a részecskét (szörfözőt), az elektron csak kevés energiát tud nyerni. Ha túl gyors, azaz  $\beta \gg \beta_0$ , akkor hasonlóan keveset gyorsul. Az optimum a közbenső esetben lesz. A hullám vonatkoztatási rendszerében a részecske kezdetben hátrafelé mozog, de mivel a fázissebességek nem sokat különböznek, az elektromos tér sokáig gyorsítja, csapdába esik, végül megelőzi a hullámot (2. ábra). Egy elegendően nagy hullám még a kezdetben nyugvó elektront is magával tudja ragadni.

A plazmahullámok növekedésének mint instabilitásnak, de a gyorsításnak is a fő mozgatója a ponderomotoros erő. A ponderomotoros erő olyan nemlineáris erő, amit egy részecske a gyorsan változó elektromágneses térben érez. Általában a térerősség négyzetének gradiensevel arányos oly módon, hogy a részecskét a nagy fénynyomású helyekről a kisebb térerősségek felé mozdítja. Leggyakrabban használt alakja:

$$\mathbf{F}_p = \frac{e^2}{4m\omega^2} \nabla E^2(x).$$

Itt  $e$  az elektron töltése,  $\omega$  a fény frekvenciája. Szerepét a részecskegyorsításban a 3. ábra illusztrálja.



4. ábra. Az „ébredő tér”-gyorsítás [1]

A lézerplazmában történő elektrongyorsítás első két mechanizmusát még Tajima és Dawson írta le 1979-ben, mégpedig az „ébredő tér”-gyorsítást (laser wake field acceleration) valamint a „lebegő hullámú”-gyorsítást (beat wave acceleration). Ehhez járult a kettő kombinációja, az „önmodulált ébredő tér”-gyorsítás, valamint az elmúlt év szenzációja, a „buborék”-gyorsítás.

### Az ébredő teres gyorsítás

Az ébredő teres gyorsítás az inga elvén működik, amint azt a 4. ábra mutatja. A lézerimpulzus emelkedő élén a ponderomotoros erő az elektronokat előre löki. A fényimpulzus megelőzi az elektronokat, amikor is a leszálló él az elektronokat hátra löki. A rövid impulzus nyomában egy  $\omega_p$  frekvenciájú rezgés keletkezik. Legjobb, ha az impulzus  $\tau$  hossza a plazmarezgés periódusának a fele, akkor ez egy rezonanciajelenség.

Az ébredő teres gyorsításhoz még kis sűrűség esetén is ultrarövid impulzus (pl.  $n = 2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  esetén 400 fs) kell. A maximálisan kinyerhető energia arányos lesz a lézer intenzitásával és az úgynevezett Rayleigh-hosszal. (Ez az a távolság, amelyen a fókuszált lézerimpulzus a fókusz előtt és után közel párhuzamosan halad.) Célszerű, hogy a hullámhossz közel egyenlő legyen a Rayleigh-hosszal, rövidebb a fázisból való kiesés távolságánál. Az eredmény nem függ a fókuszálástól, mert kisebb fókusz nagyobb térerősséggel, de rövidebb hosszal jár. Például  $\lambda = 1 \mu\text{m}$  hullámhosszon egy  $E = 10 \text{ J-os}$ ,  $\tau = 100 \text{ ps-os}$  lézer esetén a felgyorsított elektron energiája  $\Delta W_{\text{max}} = 1 \text{ GeV}$  lehet.

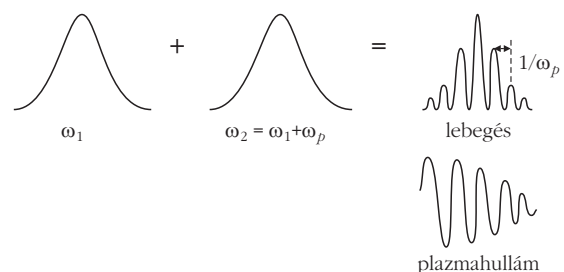
### „Lebegő hullámú” gyorsító

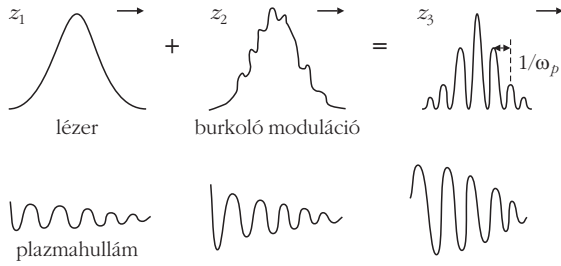
Itt a plazmahullámot két, kicsit eltérő frekvenciájú lézernyaláb keverésével állítják elő (5. ábra):

$$\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2 \text{ és } \mathbf{k} = \mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2.$$

Az eredmény egy  $\Delta\omega^{-1}$ -gyel egymást követő impulzusok sorozata lesz. Rezonancia esetén  $\omega_p = \Delta\omega$ , ekkor a lebegő tér ponderomotoros ereje rezonáns a plazma sajátrezgéseivel, így azok amplitúdója nő. Ha az impulzushossz 100 ps,

5. ábra. A „lebegő hullám” előállítása [1]





6. ábra. Az „önmodulált ébredő tér” keletkezése [1]

akkor az ezer darab 100 fs hosszú mikroimpulzust kelt, így ez a nagyon rezonáns folyamat igen effektív lehet homogén plazmában. A jelenség telítődést mutat, ha az ionok is meg tudnak már mozdulni, és elkenik az elektronhullámokat. Például hidrogénplazmára  $n = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  esetén  $\omega_p^{-1} = 2,4 \text{ ps}$ .

### „Önmodulált ébredő teres” gyorsítás

Az impulzus burkolójának modulációja okozza ezt az önrezonáns plazmahullámkeltést (6. ábra). A lézerpulzus a plazmában

$$n_R = \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}}$$

törésmutatót érez. Ha kis plazmahullámokat gerjeszt, azok longitudinális és transzverzális plazmagradienseket hoznak létre, amelyek megváltoztatják a törésmutatót. A transzverzális gradiensek fókuszálják, illetve diffraktálják a nyalábot, míg a longitudinálisak lassítják vagy gyorsítják ( $v_g = c/n_R$ ). Ha az impulzushossz elég nagy ( $c\tau > \lambda_p$ ), akkor az impulzus periodikus gradienst lát, és ez a burkolóját épp  $\lambda_p$ -vel modulálja. Az ehhez kapcsolódó ponderomotoros erő rezonánsan növeli a plazmahullámot, ami visszacsatolva ismét az impulzus modulációját növeli tovább. Egydimenziós esetben csak longitudinális moduláció van, ami megegyezik az úgynevezett Raman-instabilitással.

Mivel ez egy önrezonáns folyamat, ezért a plazmahullámok olyan nagyok lehetnek, hogy fellép a hullámtörés. Ekkor a hullámban lévő elektronok rezgési sebessége közel van a hullám fázissebességéhez, és a hullám magával ragadja őket. Még a háttérelatronokat is gyorsítja, így nagy áramokat hozhat létre GeV energiáig. A szükséges nagy sűrűség azonban limitálja a fázissebességet, és vele az elérhető energiát.

Az ezekkel és más mechanizmusokkal gyorsított elektronok megfigyelése már sok csoportnak sikerült az elmúlt évtizedben. A kísérletek közös sajátossága, hogy a megfigyelt elektronok energiája exponenciálisan csökken, a meredekségből meg lehet becsülni a forró elektronok hőmérsékletét. A direkt megfigyeléseket általában a targetek mögött elhelyezett mágneses elektron-spektrométerrel végzik. Az egyik kísérletet például egy Ti-zafir lézer 1 J energiájú, 150 fs impulzushosszú lézerével végezték, a céltárgy pedig gázjet volt. Elektronokat figyeltek meg egészen 12 MeV energiáig, a származtatott hőmérséklet 5 MeV volt. A kísérletek egy részében a mi RMKI-s csoportunk is részt vehetett, ahol szilárdtesten keltett előplazmában gyorsítottunk fel elektronokat. A

szilárdtesten kollimáltan keresztülhaladt elektronnyaláb hőmérséklete valamivel alacsonyabb, 3 MeV volt [3].

A nagyobb energiájú elektronokhoz, még hatékonyabb gyorsításhoz azonban még rövidebb impulzusok szükségesek. Az ébredő térrel történő gyorsítást szépen demonstrálta *Victor Malka* és munkatársainak eredménye, akik szintén 1 J lézere energiával, ámde 35 fs-os impulzushosszal dolgoztak. A fókuszált intenzitás  $a_0 = 1,2$  normalizált vektorpotenciálnak felelt meg. Ezzel a néhány száz  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  sűrűségű gáztargetben az elektronokat egészen 200 MeV-ig gyorsították, a 18 MeV termikus komponens mellett a nagy energiákon egy platót is kaptak.

Látható, hogy a gyorsítás igen hatékony lehet, és a kísérleti eredmények az elmélettel összhangban vannak. A kérdés az, hogy lehet-e az energiát a gyorsítókhöz hasonlóan egy meghatározott tartományba koncentrálni, azaz létrehozható-e közel monokromatikus nyaláb. A válasz igen, amit a „buborék”-gyorsítás tesz lehetővé.

### „Buborék”-gyorsítás

A „buborék”-gyorsítás lehetőségét 2002-ben 3-dimenziós, úgynevezett PIC kóddal történt szimulációk vetették fel [4], és két éven belül kísérletileg is megvalósult. A szimulációk során olyan rövid, relativisztikus lézerpulzust feltételeztek, amelynek félértéksszélessége megegyezik a plazmahullám félhullámhosszával vagy rövidebb annál. Az intenzitásnak elég nagyoknak kell lennie ahhoz, hogy létrejöhessen a plazmahullám hullámtörése már az első oszcilláció után. Az ehhez szükséges térerősséget az

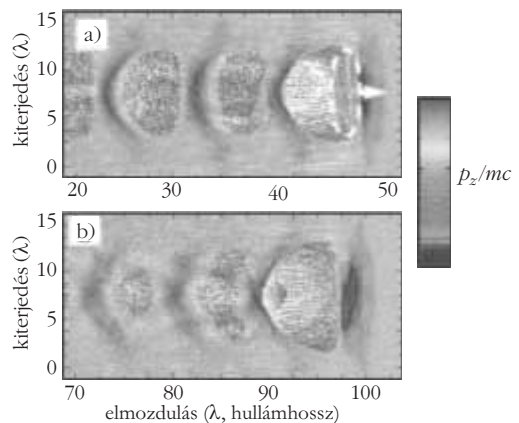
$$\frac{E_{ub}}{E_0} = \sqrt{2(\gamma_p - 1)}$$

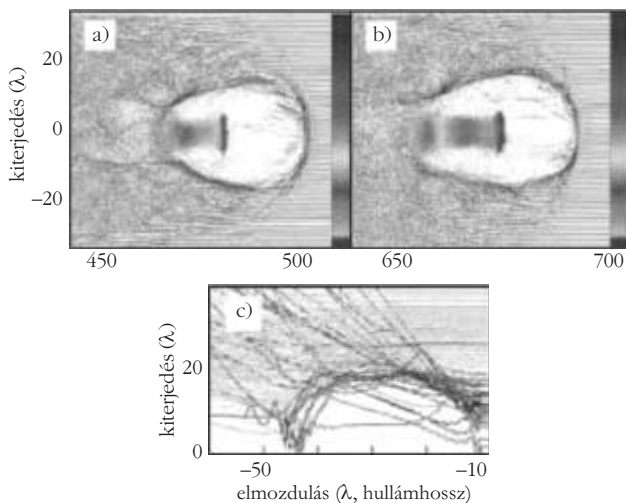
kifejezés adja meg, ahol

$$\gamma_p = \sqrt{1 - \frac{v_g^2}{c^2}} = \frac{\omega_0}{\omega_p}$$

Ebben az esetben a plazmahullám frontja görbült, először a tengely mentén törik, mégpedig korábban, mint a síkhullám. Egy buborék alakul ki, amely csapdába ejti az elektronokat, és így felgyorsítja őket. A 7. ábra mozisze-

7. ábra. A buborék kialakulása,  $a_0 = 1,7$ ,  $\tau = 6,6 \text{ fs}$  [4]



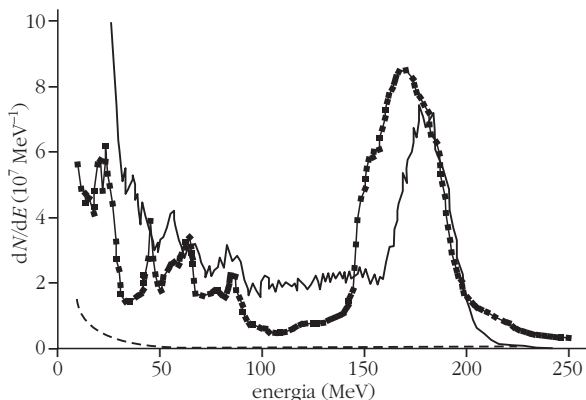


8. ábra. Stabil lézerplazmaüreg 12 J, 33 fs impulzus esetén, a)  $ct/\lambda = 500$  és b)  $ct/\lambda = 700$  időben, valamint a c) elektrontrajektóriák [4]

rően illusztrálja a buborék létrejöttét  $a_0 = 1,7$  intenzitásnál,  $1 \mu\text{m}$  hullámhossz és  $6,6$  fs impulzus esetén. A hullámfront balról jobbra halad, minden egyes numerikus elektront egy pontosca jelöl, az árnyalat pedig az impulzusát. A 7.a ábrán látható, hogy a lézerimpulzus lavinaszerűen nyomja maga előtt a néhány MeV energiájú elektronokat, maga mögött kis sűrűségű régiót hagyva. A front meggömbül, majd a tengely felé török, és ez már a fenti térorösség-limit harmadánál megtörténik. A buborék igen stabil képződmény, több mint  $100 \lambda_p$  hosszát tesz meg, a belül csapdába ejtett elektronokat pedig magával ragadja. A hatékonyság igen nagy, akár a lézerenergia 15%-át is kiteheti a csapdázott elektronok ( $10^9$  db) összenergiája.

A 8. ábra az erősen relativisztikus esetet illusztrálja, ahol  $a_0 = 10$ ,  $\tau = 33$  fs, az impulzus  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  sűrűségű plazmában halad. Látható, hogy a buborék egész  $ct/\lambda = 700$ -ig stabil marad. A buborék maga minden mögöttes struktúrát megszüntet, idővel egyre megnyúltabb lesz. A buborék közepén nagy mennyiségű elektron található erősen összenyomva. A 8.b ábrán ez már  $3,5 \times 10^{10}$  elektront jelent, amelyek kvázi-monokromatikusak, az energia  $300 \pm 30$  MeV, ami a lézer energiájának 15%-át jelenti. A 8.c ábra az elektrontrajektóriákat mutatja. Az üreg közepén láthatók a csapdába esett elektronok, amelyeknek a frontja igen meredek.

9. ábra. A LOA-ban megfigyelt (szélesebb) és a számított kvázi-monokromatikus 170 MeV-es elektronnyaláb [5]



A „buborék”-gyorsítást 2004-ben az angol Rutherford Laboratórium, az amerikai Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), valamint a francia Laboratoire d'Optique Appliquée (LOA) is megvalósította egyidejűleg, cikkeiket a *Nature* című folyóirat ugyanabban a számban közzétették [5]. A francia csoport eredményeit ismertettük röviden.  $170 \pm 20$  MeV energiájú szűk csúcsot sikerült kapniuk. A szűk spektrumú elektronnyaláb  $0,5 \pm 0,2$  nC töltést tartalmazott, ami 100 mJ-t, azaz a lézer energiájának 10%-át jelenti. A kísérleti eredmények kiváló összhangban vannak az elméleti számításokkal (9. ábra). A másik két laboratórium keskenyebb spektrumot kapott, de kisebb energiával.

Ezzel a módszerrel több száz GeV/m gyorsító feszültség is elérhető. A monoenergetikus nyalábot a fókuszálási paraméterek és a gáz sűrűségének változtatásával lehet optimalizálni. Az elektronok energiáját emellett még a kölcsönhatási hossz növelésével lehet növelni. Ehhez az is szükséges, hogy a nagy kölcsönhatási hosszban a lézerfény egy önfokuszált csatornában kollimáltan haladjon. Az LBNL legújabb kísérletében kapilláriskiszülést használtak, amelyben a kölcsönhatási hossz növelésével az 1 GeV energiát is sikerült elérni [6]. Megmutatták azt is, hogy a kapott ultrarelativisztikus elektronnyaláb jól kollimáltan halad, a divergenciája 1 mrad körül volt. Megjegyezzük még azt is, hogy a kollimált elektronnyaláb impulzushossza közelítőleg megegyezik a lézerével, ami jelen esetben 50 fs volt. Az új kísérleti eredmények ismertetése a Szegeden megrendezett IAMP106 konferencia egyik szenzációja volt [6].

## Egyéb részecskék gyorsítása

A lézerplazma-kölcsönhatásokban a fény közvetlenül az elektronokkal hat kölcsön, azokat gyorsítja. A kölcsönhatásokban azonban ionok, elsősorban protonok is hatékonyan gyorsíthatók. A legnagyobb, PW teljesítményű lézerrel végzett kísérletek egyik legizgalmasabb meglepetése az volt, hogy intenzív, gyors protonnyalábot figyeltek meg vékony targetek hátoldalán. A nagy intenzitás és a kollimált nyaláb felvetette a lézerfúzió úgynevezett gyors begyűjtésos módszerében, valamint különböző diagnosztikákban – például, éles árnyképfelvételek készíthetők protonokkal – való alkalmazás lehetőségét. Azóta már több MV/ $\mu\text{m}$ -os gyorsító térrel protonokat figyeltek meg több száz MeV-ig, valamint nehezebb ionokat (C, F, Al és Pb) egészen 7 MeV/nukleonig [7].

A lézer ebben az esetben is először, a szilárdtest lézer felőli oldalán, az elektronokat gyorsítja. A gyors elektronok közel párhuzamos nyalábban keresztülszaladnak a targeten, majd a target hátoldalán kilépve elektromos kettősréteget hoznak létre ( $E > 5 \times 10^{11} \text{ V/m}$ ), amely az ott lévő protonokat, illetve egyéb ionokat kifelé gyorsítja, a céltárgyra merőlegesen. Az első kísérletekben, meglepetésre, minden target hátoldaláról protonok gyorsultak, ezek a rajtuk lévő szennyeződésekől származtak. Azóta sikerült már nagyobb tömegszámú ionokat is gyorsítani. Ehhez különböző módszerekkel (pl. a vákuumbeli kifűtés) meg kell tisztítani a felületet. A monoenergetikus ion-

nyaláb eléréséhez emellett rétegzett, illetve mikrostrukturált targeteket használnak. Ezekkel sikerült nukleonként több MeV energiát elérni. Még nem versenyezhetnek a hagyományos iongyorsítókkal, de már ma is alkalmasak arra, hogy kiinduló nyalábot szolgáltatassanak számukra. Rendkívül izgalmasak a protonterápiás és egyéb orvosi alkalmazások is.

Talán már ebből a rövid összefoglalóból is kiderült, hogy a lézeres részecskegyorsítás fantasztikus új lehetőségeket jelent. Egyelőre még nem érjük el a konvencionális gyorsítók legnagyobb energiáit, de a kapott energiákkal már magfizikai és fotonukleáris reakciókat, aktivációs analízist stb. is lehetett végezni. Egy érdekes alkalmazásként viszonylag kisméretű lézerral pozitronokat sikerült kelteni, a kapott ráta másodpercenként  $10^7$  pozitron volt [8]. A pozitronkeltés a gyors elektronoknak az ionok terében keltett fékezési sugárzásával, illetve a trident folyamattal (virtuális fotonok kicserélése) történt.

## Irodalom

1. J.R. MARQUES – in Atoms, Solids, and Plasmas in Super-Intense Laser Fields (szerk.: D. Batani, C.J. Joachim, S. Martellucci, A.N. Chester) Kluwer Academic/Plenum Publ. NY. 339–350, 2001.
2. T. TAJIMA, J. DAWSON – Phys. Rev. Lett. 69(1979) 267
3. M. KALUZA, I.B. FÖLDES, E. RÁCZ, M.I.K. SANTALA, G.D. TSAKIRIS, K.-J. WITTE – IEEE Trans. Plasma Sci. 33(2005) 480
4. A. PUKHOV, J. MEYER-TER-VEHN – Appl. Phys. B 74(2002) 355
5. S.P.D. MANGLES ET AL. – Nature 431(2004) 535, C.G.R. GEDDES ET AL. – Nature 431(2004) 538 és J. FAURE ET AL. – Nature 431(2004) 541
6. Cs. TÓTH ET AL. – IAMP 2006, Book of Abstracts, Szeged és W.P. LEEMANS ET AL. Nature Physics 2(2006) 696
7. P. MCKENNA – Phys. Rev. E 70(2004) 036405
8. G. GAHN ET AL. – Appl. Phys. Lett. 77(2000) 2662

# 25 ÉVES A RUGALMAS ELEKTRONSZÓRÁS-SPEKTROMETRIA

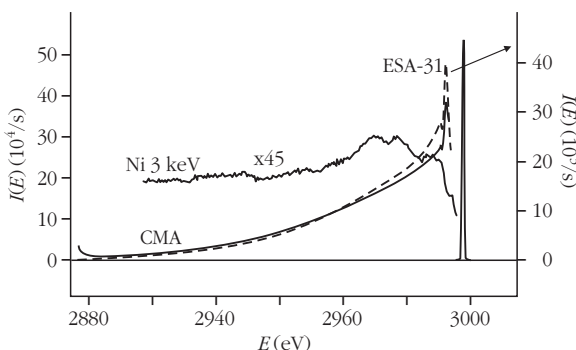
Gergely György

Professor emeritus instituti, MTA MFA

Szilárdtestek felületét elektronokkal bombázva az elektronok nagy része behatol az anyagba, kisebb hányaduk több-kevesebb energiavesztéssel visszaszóródik, folytonos spektrumot alkot. Az energiavesztés nélküli szórást rugalmas szórásnak nevezzük. Ezzel foglalkozik a rugalmas elektronszórás-spektroszkópia, melyet 1981-ben az MTA MFKI-ban fejlesztettünk ki, alkalmazásával 1997 óta az MTA MFA-ban folytatjuk a kutatásokat. Nemzetközileg elfogadott jele EPES (Elastic Peak Electron Spectroscopy) [1]. Definícióját és jelét az ISO is felvette 18115/7.26 számmal. Az RBS mellett ez a második hazai felületvizsgálati eljárás, melyet az ISO felvett listájára.

A *Fizikai Szemlé*ben 1988-ban ismertettem az eljárást [2], mely indulása óta folyamatosan továbbfejlődött. A hivatkozásokból kitűnik, hogy 16 ország 33 kutatóhelye alkalmazta és fejlesztette tovább. 2002-ben tanulmányban [3] foglaltam össze a nemzetközi kutatások addigi eredményeit, de azóta is lényeges előrehaladás történt mind az MFA-ban, mind külföldön. Jelen megemlékezésem keretét messze túllépné ezek ismertetése, ezért inkább [3] munkámra utalok a részletek tekintetében.

1. ábra. Ni teljes visszaszórási spektruma. Az ESA 31 (ATOMKI) és K. Goto CMA-eredményeinek összehasonlítása. Az ábra tartalmazza az Ni veszteségi spektrumát is a rugalmas csúcs mellett.



Valamely szilárdtest felületét elektronokkal bombázva megjelenik az elektronok energiatfüggő spektruma: a szekunder elektronokat ( $E < 50$  eV) a visszaszórt elektronok folytonos spektruma követi, erre rakódnak az Auger- és veszteségi csúcsok. Az 1. ábra mutatja a Ni teljes spektrumát K. Goto féle CMA-val (Cylindrical Mirror Analyser, hengeres tükör analízátor) összehasonlítva, továbbá a rugalmas csúcs közelében a veszteségi spektrumot.

Tekintsük át az elektrontranszport-folyamatokat: ezek eredménye a teljes visszaszórási spektrum. A behatoló elektron rugalmas és rugalmatlan (veszteséges) szórást szenved. Két szórást, ütközés között  $\lambda_e$  a rugalmas,  $\lambda_i$  a rugalmatlan közepes szabad úthossz (IMFP),  $\lambda_e < \lambda_i$ . Általában több rugalmas szórást követően az elektron energiát veszít. E szórási folyamatokat az atom elektronjai és a szilárdtest határozzák meg. Közleményem csak a rugalmasan szórt elektronokra korlátozódik. A rugalmas szórást az elektronok irányváltozásával jár, a spektrométerbe történő visszaszórást látjuk a rugalmas csúcsban. Mellőzve a részleteket, szólnom kell még két fontos folyamatról. Lényegesen kisebb veszteséget okoz az elektron atommag által okozott Rutherford-szórása, visszalökés (recoil) hatás. Alapvetően fontos az elektronok behatolásánál és kilépésénél bekövetkező felületi veszteség. A transzportfolyamatok határozzák meg a rugalmas csúcs intenzitását és irányeloszlását.

A spektrumban  $E = E_p$ -nél a legnagyobb csúcs, a rugalmas csúcs jelenik meg [1, 2]. Az elektronok rugalmas szórása a legerősebb elektron-atom kölcsönhatás. Ennek energiája azonban csak közelítőleg  $E_p$ , pontos helyzetét az elektronok Rutherford-típusú szóródása határozza meg. Az eltolódás

$$\Delta E_{rec} = E \frac{m}{M} \sin\Theta,$$

ahol  $m$  az elektron,  $M$  az atom tömege,  $\Theta$  a szórási szög. Ez 2 keV-en C (grafit) esetében 300 meV, de a H eseté-

ben már 3,8 eV polietilén felületén, a rugalmas csúcs felhasad. MFA–ATOMKI közös eredmény volt a H közvetlen kimutatása az elektronok spektrumában [4]. Itt említtem, hogy a felületvizsgálatoknál gyakran alkalmazott CMA hengeres tükör analizátornál az  $E$  energiájú csúcs helyzete számítható. Meglepő, hogy 2 keV-en már 2 eV relativisztikus eltolódást szenved a rugalmas csúcs, ami 5 keV-en 11 eV.

Hazánkban és külföldön az EPES-vizsgálatokat többféle spektrométerrel végezték (RFA fékezőrácson, CMA hengeres tükör, HSA félgömb, DESA-Staib stb.). A nagyszámú kísérleti eredményt összefoglaltam tanulmányomban [3]. A mért rugalmas csúcs intenzitását az anyagtól ( $Z$  rendszám) és energiától függő elektrontranszport-folyamatok, a gerjesztés és detektálás szöge mellett a spektrométer detektálási szögterülete és válaszfüggvénye határozzák meg.

A rugalmas csúcs mért szélességét több tényező határozza meg: a spektrométer energiafelbontása ( $E$ -függő) mellett az elektronágyú által okozott félértékszélesség, mivel nem áll rendelkezésünkre elektron-monokromátor (kivéve a Szegedi Egyetemet). A rugalmas csúcs fizikai kiszélesedését okozza részben a visszalökési hatás, részben kis energiájú ( $< 0,5$  eV) veszteségek, például fononok [3].

A következőkben tekintjük át az EPES fejlődésének főbb állomásait:

- az elektronok rugalmatlan szabad úthosszának (IMFP) kísérleti meghatározása EPES alkalmazásával, az LTA Fizikai Kémiai Intézetével közös eredményünk [5, 6];
- az IMFP meghatározása referenciamintával a rugalmas csúcsok intenzitás arányából, Monte Carlo-számítással [6];
- az elektronok visszalökési hatása [4, 7];
- az elektron veszteségi spektrumok (REELS) kvantifikálása a rugalmas csúccsal [8];
- az elektronsugár refrakciója [3];
- az EPES alkalmazása  $Ar^+$  ionmarásos mélységi elemzésnél [9];
- a felületi veszteségi paraméter (SEP) kísérleti meghatározása [10];
- rugalmas szórás differenciális hatáskeresztmetszetei NIST SRD 64;
- a SEP kísérleti meghatározása minta/referencia rugalmas csúcsok intenzitásából [11] standard elemekre (Si, Cu, Ni, Ag, Au);
- a SEP kísérleti meghatározása REELS abszolút (%) méréssel [12];
- vékony szigetelő rétegek EPES-vizsgálatai [13];

Jelenleg az EPES kvantifikálásával foglalkozunk, a cél a rugalmas csúcs meghatározása abszolút egységekben. Kvantitatív adatokat tartalmaz K. Goto CMA spektrométerrel mért, interneten megtalálható adatbázisa. Saját spektrométereink (ESA 31, DESA) kvantifikálása új feladat. Legújabb eredményeinkről a JVC-11 konferencián (2006, Prága) számoltunk be, ezeket egy későbbi közleményben fogjuk ismertetni.

Az EPES széleskörű alkalmazást nyert az elektrontranszport-folyamatoknál alkalmazott fizikai, anyagi paraméterek kísérleti meghatározásánál. Ilyen paraméterek:

- az elektronok rugalmas szórás hatáskeresztmetszete: (Nat. Inst. Standards Technology, USA), NIST 64 SRD adatbázis;
- az elektronok rugalmatlan szabad úthossza (IMFP), NIST SRD 71 [5, 6];
- az elektronok rugalmatlan szórás hatáskeresztmetszete, fajlagos energiavesztesége/cm [8];
- a felületi gerjesztési paraméter SEP (ISO 18115/7.80) [11, 12].

Az EPES-t széles körben alkalmazta a kvantitatív felület- és vékonyréteg-elemzés.

Az EPES volt tárgya számos disszertációnak (MTA cand, DSc, PhD, habil): hazai 5, francia 9, német 4, lengyel  $> 2$ , dán  $> 1$ . Tudomásunk van japán, orosz, ukrán, kínai, tajvani munkákról is.

2000 óta két évenként nemzetközi műhelyeket rendeztek (IMFP, ESS), 1982 óta az ECASIA, EVC, ECOSS, JVC stb. konferenciákon nagyszámú EPES-eredményről számoltak be. Az EPES-eljárást szerény hazai lehetőségek mellett fejlesztettük ki, nemzetközi hatása jelentős lett. Az EPES-sel kapcsolatos adatbázisokat nagyszámú kutató használja. Az NIST az EPES-módszert javasolta [6] az IMFP kísérleti meghatározására.

Hazánkban az EPES-kutatásokkal az MFKI–MFA-ban és az ATOMKI-ban foglalkoznak. A köszönetnyilvánításban felsorolt kollégák mellett lényeges szerepet játszottak: *C. Powell* (NIST), *K. Goto* (Nagoya), *Nakbodikin* és munkatársai (Kiev), *W. Werner* (TU Wien), *Ding* (Hefei, Kína), *Kwei* (Tajvan), *Gaukler* (Tübingen), *Salvat* (Barcelona), *S. Tanuma* (Japán), *J. Zemek* (Prága). A bevezetőmben említett 33 kutatóhely mellett számos egyéb kutatóhely közleménye jelent meg az EPES jelöléssel.

Köszönetet mondok azoknak, akikkel több közös közleményem jelent meg, így *Menyhárd Miklósnak*, *Sulyok Attilának*, *Gurbán Sándornak*, *Orosz Tamásnak* (MFA), *Tóth Józsefnek*, *Varga Dezsőnek*, *Tőkési Károlynak*, *Csernyi Istvánnak*, *Kövér Lászlónak* (ATOMKI) stb. Köszönet illeti az LTA Fizikai Kémiai Intézetét (*A. Jablonskit* és munkatársait), a Clermont-Ferrand-i Blaise Pascal Egyetemet (*B. Gruzat* és munkatársait), a Lyoni Claude Bernard Egyetemet (*P. Michelt*, *C. Jardint* és munkatársait), Odense Egyetemet (*S. Tougaard*), akik jelentős szerepet játszottak az EPES-kutatásokban. Külön köszönetet mondok *Tóth Józsefnek* (ATOMKI), akitől átvettem ábrámat.

## Irodalom

1. G. GERGELY – Surf. Interface Anal. (SIA) 3 (1981) 201, Vacuum 33 (1983) 89
2. GERGELY GY. – Fizikai Szemle 36 (1986) 325
3. G. GERGELY – Progr. Surf. Sci. 71 (2002) 31
4. G.T. OROSZ et al. – Surf. Sci. 566–568 (2004) 544
5. A. JABLONSKI et al. – SIA 6 (1984) 291
6. C.J. POWELL et al. – J. Phys. Chem. Ref. Data 28 (1999) 19
7. D. VARGA et al. – SIA 31 (2001) 1019, Vacuum 61 (2001) 107
8. S. TOUGAARD et al. – Phys. Rev. B 43 (1991) 1651
9. M. MENYHARD et al. – J. Electron Spectrosc. 68 (1994) 653
10. S. TANUMA et al. – SIA 30 (2000) 212
11. G. GERGELY 1098 – SIA 36 (2004) 1098
12. T. NAGATOMI et al. – Appl. Phys. Lett. 87 (2005) 224107
13. S. GURBAN et al. – SIA 38 (2006) 624
14. K. GOTO – <http://www.sasj.jp/compro>



## EGYSZERŰ KÍSÉRLETEK MÁGNESEKKEL

Juhász András  
ELTE, Anyagfizikai Tanszék

A technika fejlődése a fizikai jelenségek demonstrációjában folyamatosan új lehetőségeket nyit. Így van ez a mágneses kísérletek esetén is, ahol a különösen erős, porkohászati módszerekkel előállított permanens mágnesek tesznek megvalósíthatóvá nagyon egyszerű és látványos kísérleteket. A új típusú mágneseket három nagy csoportba sorolhatjuk:

- *Ferritmágnesek* – közismert nevükön kerámiámágnesek. A ferritmágnesek kiindulási anyaga 80% vasoxid és 20% stroncium- vagy báriumkarbonát. Az anyagokat finom porrá őrlik össze, kiégetik, ennek eredménye a stroncium- vagy báriumferrit oxidkerámia. Ezt ismét megőrlik, ezután a kristályszemcsék mint elemi mágnesek tekinthetők. A mágneses porból erős mágneses térben történő nedves préseléssel állítják elő a kívánt alakú terméket, az irányított mágneses szemcséket magas hőmérsékletű szintereléssel rögzítik egymáshoz. A ferritmágnesek olcsók, erősek, korróziós hatásoknak jól ellenállnak.

- *Szamárium-kobalt mágnesek*. A ferritmágneseknél erősebb, a korróziós hatásoknak ellenálló, de drága mágnesek, ezért az iskolai kísérletezésben inkább a két másik típusú mágneset ajánljuk.

- *Neodym szupermágnesek*. Ezeknek az 1980-ban felfedezett mágneseknek a neve is jelzi, hogy a legerősebb permanens mágnesek. Anyaguk neodímiumot, vasat és bórt tartalmaz. Az előállítás során az alapanyagokból először előtözetet készítenek, majd ezt finom porrá őrlik. A porból erős külső mágneses térben történő préseléssel készítik a terméket. A neodymmágnesek a samárium-kobalt mágneseknél erősebbek és olcsóbban előállíthatók, egészen 250 °C-os környezeti hőmérsékletig használhatók, de törékenyek, és korrodálnak. A törékenységre jellemző, hogy attól is elpattanhatnak, ha két mágnes egymáshoz csapódik az ellentétes pólusaik közötti vonzás hatására. A környezeti korrózió ellen úgy védik a mágneset, hogy nikkelbevonattal látják el. A neodym szupermágnesek egyszerűen, olcsón beszerezhetők

(pl. <http://www.euromagnet.hu>) és jól használhatók iskolai kísérletezésre.

A következőkben a fenti mágnesekkel elvégezhető néhány egyszerű demonstrációs kísérletet ismertetek.

### Neodymmágnes „erősségének” bemutatása

A neodymmágnesek rendkívüli erősségét egyszerű, de látványos kísérletekkel szemléltethetjük:

- Két mágneskorong a mutatóujjunkon keresztül olyan erővel vonzza egymást, hogy a súrlódás nem engedi leesni őket (*1.a ábra*).

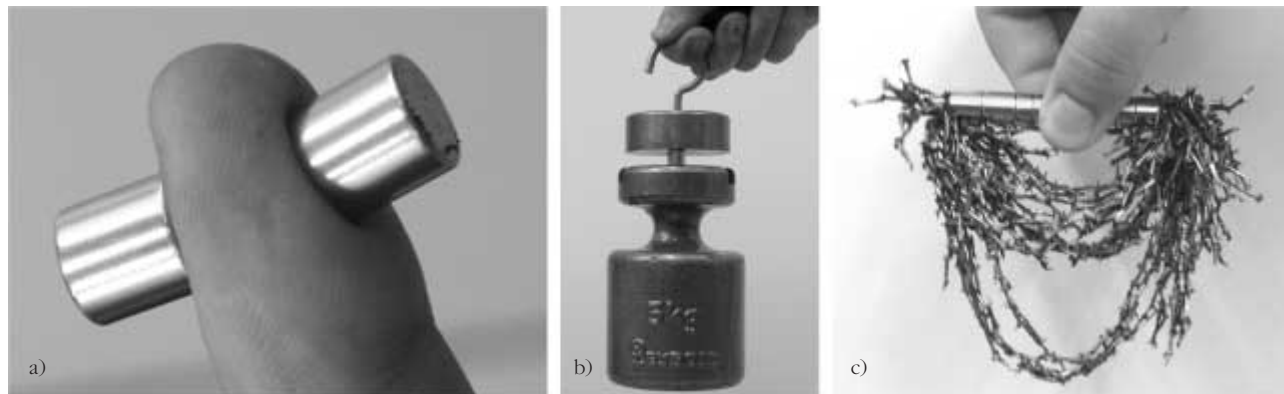
- A 8 mm átmérőjű, 1 cm magas mágneshenger közbeiktatásával 5 kg tömegű vastömböt tudunk tartani (*1.b ábra*).

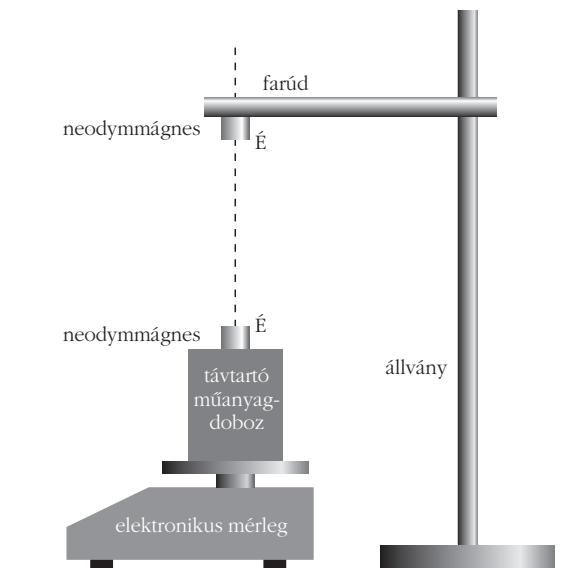
- A több mágneshengerből összetapasztott mágnesrúd olyan erős, hogy apró vasszögek sokaságát képes magához rántani. A mágneses megosztás miatt a szögek láncokba rendeződnek, amely láncok látványosan szemléltetik a mágneses erővonalakat (*1.c ábra*).

### Mágnesek kölcsönhatásának vizsgálata egyszerű mérőkísérlettel

300 g méréshatárú, századgramm érzékenyséű elektronikus mérlegre helyezünk körülbelül 10 cm magas könnyű műanyagdobozt (a doboz arra szolgál, hogy az erős mágnes ne kerüljön az elektronikus mérleg közvetlen közelébe), erre szigetelőszalaggal vagy pillanatrágasztóval rögzítsünk egy mágneshengert (*2. ábra*). Nullázzuk ebben a helyzetben a mérleget. Egy másik mágneset ragasszunk farúdra úgy, hogy felső lapjának polaritása ugyanolyan legyen, mint a mérlegre tett mágnesé. A mágneset tartó fogjuk állványba (vasállvány nem alkalmas!) és a rajta lévő mágneset állítsuk a mérlegen lévő mágnes fölé. A hasonló pólusaival szemben álló két mágnes közt fellépő taszítóerőt a mérleg közvetlenül

1. ábra. A neodymmágnesek rendkívüli erősségének demonstrálása



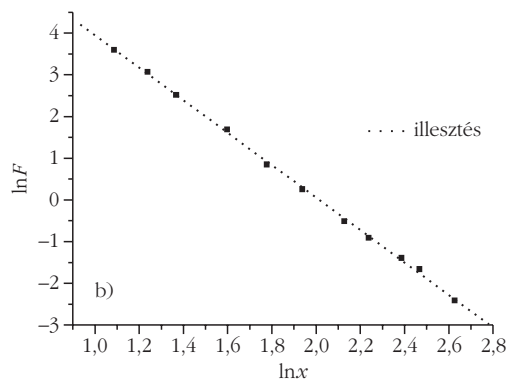
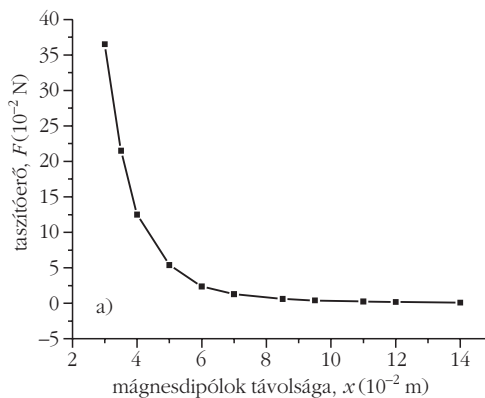
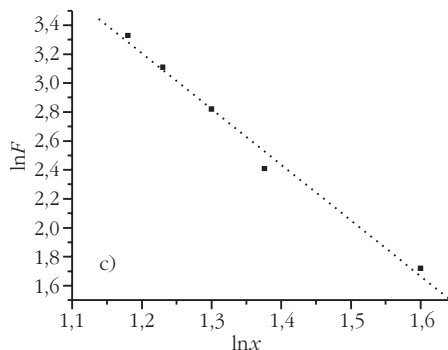
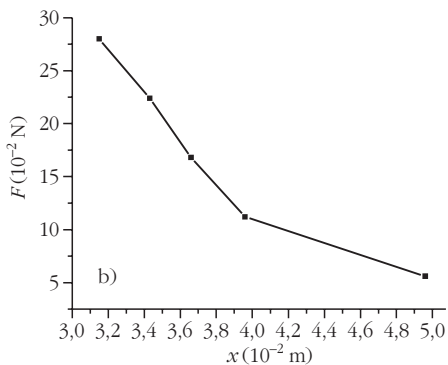


2. ábra. A taszítóerő távolságfüggésének mérése érzékeny mérleggel, a távolság változtatásával

méri. Változtassuk a két mágnes távolságát, és mérjük le a különböző távolságokban ható erőket (a mágnesek távolságának változtatásakor ügyeljünk, hogy a két mágneshenger tengelye egybeessen).

A mérési eredményeket az 3.a ábra grafikonja mutatja. A grafikonról leolvasható, hogy azonos pólusaikkal egymás felé fordított két neodymmágnes közti erő rohamosan nő a két mágnes közelítésével. A dipólusok közti kölcsönhatást (elektrosztatikai analógia alapján) hatványfüggvény alakjában keressük. A mért erő- és távolságadatok logaritmusát ábrázolva (3.b ábra) a pontok negatív

4. ábra. Taszítóerő távolságfüggésének mérése a lebegő mágnesekkel, a taszítandó tömegek változtatásával a), a mérés eredménye b) és a hatványjelleg igazolása c).



3. ábra. A taszítóerő távolságfüggése a), valamint a hatványjelleg alakjának igazolása b)

dőlésű egyenesre illeszkednek. Az illesztett egyenes meredeksége, azaz az erő távolságfüggésének hatványkitevője  $-3,89 \approx -4$ .

### Lebegő mágnesek

A neodym mágneshengerek átmérőjénél alig nagyobb belméretű üvegcső egyik végét zárjuk le dugóval, majd a csövet függőlegesen tartva engedjük bele két, azonos pólusával egymás felé fordított mágneset. (Az üvegcső mérete engedje könnyedén mozogni a mágneset a csőben, de ne engedje, hogy a mágnesek tengelye kibillenjen a függőlegesből.)

A szembefordított mágnesek közti ható taszítóerő nem engedi „leesni” a felső hengert, és az néhány cm magasságban lebeg az alsó fölött.

Helyezzünk a csőbe további mágneshengereket, ügyelve arra, hogy a szomszédos hengerek rendre taszítsák egymást. Az egymás fölött lebegő mágnesek sorát a 4. ábra fotója mutatja. Megfigyelhető, sőt a fotón le is mérhető, hogy a mágnesek közti távolság változik: lentől fölfelé haladva egyre nő. Ezt az egyszerű kísérletet felhasználhatjuk a mágneses erőhatás távolságfüggésének meghatározására. Közelítésként tekintünk csak az első szomszédok közti kölcsönhatást, és tegyük fel, hogy valamennyi mágneshenger – súlyát és mágneses sajátságait tekintve – hasonló. (Az általunk elvégzett és a fotón is bemutatott kísérletben használt mágneshengerek tömege 5,6 g.) Így a legalsó mágnes taszítóereje  $b_1$  távolságban a fölötté lévő öt mágneshenger súlyát tartja. (A  $b_1$  távolság a legalsó és

a fölötté lévő mágneshenger középpontjának távolsága.) A második mágnes felett négy mágnes lebeg, azaz a második mágnesről a harmadikra kifejtett tasztítóerő –  $h_2$  távolság mellett – a négy henger súlyával egyenlő, és így tovább. A fotón végzett mérések alapján a mágneses kölcsönhatás távolságfüggését a 4. ábra grafikonjai mutatják. A lebegő mágnessor közvetlen mért értékeit feltüntető b) grafikon alig mutat eltérést a fentebb leírt igényesebb mérés eredményétől. (Ez empirikusan igazolja, hogy a lebegő mágnesek leírására az elsőszomszéd-kölcsönhatás elfogadható közelítés.) A c) grafikon a logaritmált mérési adatokra illesztett egyenest mutatja. Meredeksége, azaz a kölcsönhatás távolságfüggvényének kitevője  $-3,84 \approx -4$ .

### Lejtőn guruló kerámiamágnes mint iránytű

Egy síkfelületű rajztábla egyik oldalát feltámasztva készítsünk enyhe lejtőt, majd egy kerámiamágnes-korongot helyezünk a lejtő tetejére és hagyjuk legurulni. A mágnes rendszerint nem egyenesen gurul, hanem az esésvonaltól oldalirányban elgömbülő pályán (5. ábra). Jelöljük meg a korong egyik oldallapját pici szigetelőszalaggal, és ismételjük meg a kísérletet kétszer, először a korong megjelölt lapja a lejtő egyik, azután a másik oldala felé álljon. A két, megismételt, kísérlet során a korong pályája ellentétes irányban gömbül.

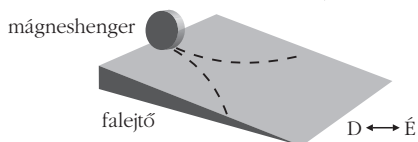
*Magyarázat:* a korong mágneses dipólus, amelynek pólusai (a gyártási eljárásból adódóan) a tengely irányában állnak. A guruló mágnesre az iránytűhöz hasonlóan hat a Föld mágneses tere. A dipólusra ható forgatónyomaték hatására a mágneskorong elfordul. Ha a korongot átfordítva a mágneses pólusokat megcseréljük, az eltérülés iránya is ellentétesé válik. Az effektus adott mágnes esetén a lejtő irányításától is függ, a legerősebb forgatóhatást É–D tájolású lejtő esetén kapjuk, míg K–Ny esésirányú lejtőn nincs effektus.

A kísérlet alkalmas arra, hogy a diákok számára kísérleti feladatként kiadjuk, kitűzve például az É–D irány meghatározását, vagy akár a mágnespogácsa pólusainak beazonosítását.

A Föld viszonylag gyenge mágneses tere csak a guruló mágnes képes elforgatni. A jelenség a tapadási súrlódási erővel magyarázható. Ez ugyanis a ható erők irányával ellentétes irányban hat. A sík felületen, palástján álló mágneskorong befordulását az É–D irányba a henger és a talaj érintkezési vonalán ható tapadási súrlódás megakadályozza. Gördüléskor a tapadási súrlódás a mozgás irányával ellentétes irányban hat, így nem akadályozza a gyenge forgatóhatást.

*Megjegyzés:* a kísérlet bemutatására a mágneses táblán használt úgynevezett applikációs kerámiamágneskorongok a legalkalmasabbak.

5. ábra. A Föld mágneses terének kimutatása lejtőn guruló mágnessel



### Örvényáramok fékező hatása a mozgó mágnesre

#### *Mágnesrúd fékezett esése alumíniumcsőben*

2–3 neodymmágnes-hengert összetapasztva „készítsünk” erős mágnesrudat. A mágnesrudat ejtsük be a mágnesek átmérőjénél kicsit nagyobb belméretű alumíniumcsőbe (mi 8 mm átmérőjű mágnesrúddal és 10 mm-es üregátmérőjű, 1,5 m hosszú alumíniumcsővel kísérleteztünk.)

A csőbe ejtett mágnes meglepően hosszú, néhány másodpercnyi idő alatt esik keresztül a csövön. Ismételjük meg a kísérletet a mágneshez hasonló méretű farudacskával is. A farúd a mágnesnél sokkal rövidebb idő alatt átesik a csövön. A különbség még szembetűnőbb, ha két hasonló csőbe egyszerre ejtjük bele a farudat és a mágnes.

*Magyarázat:* A csőben eső mágnes a fém csőfalban örvényáramokat indukál. Ezek mágneses tere Lentz törvénye szerint kölcsönhat a mágnessel, és fékezi az esését. A csőbe ejtett fahenger esetén ilyen fékező hatás nincs, a rúd mozgása gyakorlatilag szabadesés.

#### *Alumínium alapon guruló mágneskorong fékeződése*

Gurítsunk erős neodymmágnes vízszintes asztalpon, a mágneskorong egyenes irányban szabadon gördül, sebességéből csak lassan veszít. Ismételjük meg a kísérletet 3–4 mm vastag, vízszintes alumíniumfelületen. A fémen guruló mágnes mozgása gyorsan lefékeződik. A jelenség a Lentz-törvénnyel magyarázható. A guruló mágnes mágneses tér veszi körül, ez a mágneses tér a korong alatti fém anyagára is kiterjed. Ahogy a mágnes új területre gördül, az alátétül szolgáló fémben helyről helyre változik a mágneses tér. Ez a fémben feszültséget indukál és köráramokat kelt. A guruló mágnes előtt a mágneses tér erősödik, mögötte gyengül. A köráramok mágneses tere mindkét változást akadályozza, azaz a mágnes előtt visszatartó, a mágnes mögött visszahúzó erőt okoz, a kettő együtt fékezi a mágnes haladó mozgását.

A köráramok kialakulásához szükség van az alátétfémmé vastagságára, a kísérlet vékony fémlapra nem sikerül.

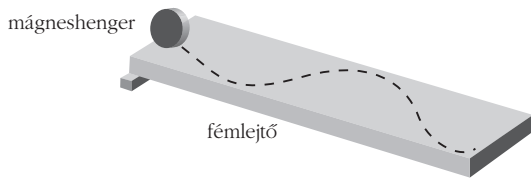
#### *Neodymmágnes-korong gördülése lejtő alumíniumfelületen*

Vizsgáljuk meg mi történik, ha az előzőekben leírtak közül két kísérletet kombinálunk. Készítsünk enyhe lejtőt 4–5 cm széles, legalább 3–4 mm vastag, sík felületű alumíniumból (a célnak jól megfelel színesfémboltokban beszerezhető alumínium zártszelvény). A 4–5 fokos meredekségű lejtőn gurítsuk le az erős neodymmágnes-korongot.

Először irányítsuk úgy mágnesünket, hogy az a lejtő közepén, esésirányban guruljon. Megfelelő dőlésszög és pontos indítás esetén a mágnes irányváltoztatás és látható fékeződés nélkül gurul le a lejtőn.

A jelenség az előző két kísérlet tapasztalataival látszólag ellentétes. Felvetődik a kérdés, hogy az alumínium alap fékező hatása, illetve a guruló mágnes a lejtő esésirányából kitérítő „iránytűhatás” most miért nem tapasztalható?

Magyarázzuk először azt, hogy miért nem változik a földmágnesség hatására a gördülés pályája. A Föld természetesen most is hat a mágnesre, de az irányváltoztatás ellen azonnal fellép az örvényáramok erősebb hatása, és ez nem engedi a mágnes elfordulását.



6. ábra. Az aszimmetrikus örvényáramok kimutatása

Miért nem fékezik az örvényáramok a mágnes mozgását? Természetesen fékezik, de ezt a hatást a gravitációs gyorsulás lejtő menti összetevője ellensúlyozza. Ez egyszerűen ellenőrizhető a lejtő meredekségének változtatásával.

Ismételjük meg a kísérletet az optimális hajlású lejtővel úgy, hogy a mágnest ferdén, a lejtő esési irányától kicsit eltérve indítjuk. A mágnes először ferdén a lejtő széle felé gurul, de mielőtt odaérne és leesne a lejtőről elfordul, és a lejtő közepe felé veszi az irányt. Átgurul a túlsó oldalra, ahonnan ismét visszafordul stb. A mágnes hullámvonalú pályán gurul le a lejtőn (6. ábra).

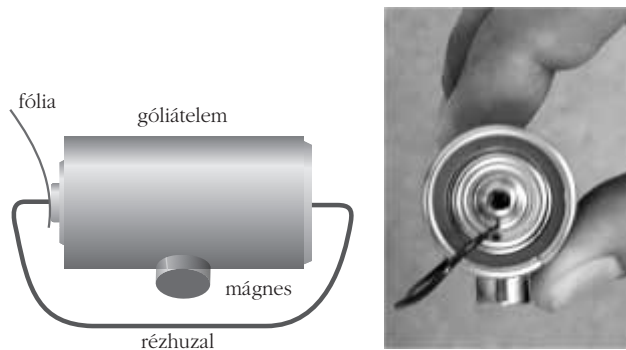
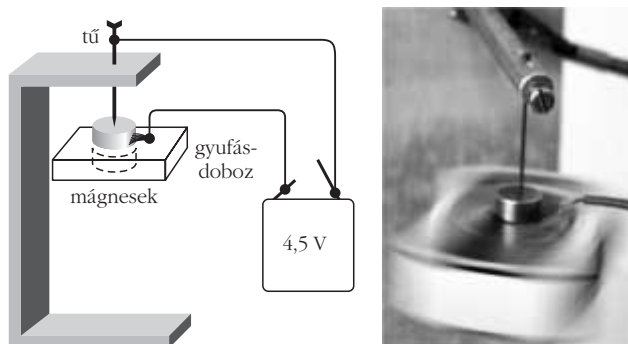
A látványos jelenség magyarázatát ismét az örvényáramok mágneses hatása adja. A fém széléhez közelítve az örvényáramok kialakulása (és ezért fékező hatása is) aszimmetrikussá válik. Ez a hatás akadályozza meg, hogy a mágnescorong leguruljon a lejtő szélén, és ez fordítja vissza a korongot.

### Oersted kísérlete másképpen

Az áramjárta vezető és a mágnes kölcsönhatása góliát-elem, neodymmágnes és körülbelül 15 cm hosszú, 1–0,5 mm átmérőjű rézdróttal egyszerű szabadkézi kísérletként (akár tanuló-kísérletként is) bemutatható.

A rézhuzalt hajlítjuk meg a 7.a ábrán látható D alakú kengyellé úgy, hogy a huzal két behajlított végének távolsága néhány milliméterrel kisebb legyen, mint a góliát-elem hossza. A hengeres elem palástját borító lemezborításra tapasszunk fel egy neodymmágnest, majd a meghajlított rézdrótot kis rugalmas deformációval húzzuk rá a telep két pólusára úgy, hogy a telep negatív pólusa és a drót vége közé csúsztassunk be egy darabka szigetelő írszövetű fóliát. A drótkengyel megszorul a telepen, de ez nem akadályozza a szabad elfordulását. Tartsuk vízszintesen az elemet úgy, hogy a palástra tapasztott mágneshenger alulra kerüljön, és a még szigetelt kengyelt a saját súlya a mágnes alá fordítsa. Húzzuk ki a telep és a drót végét elszigetelő fóliát – a kengyel kilendül a függőleges síkból (7.b ábra).

8. ábra. Egyszerű motor



7. ábra. Oersted-kísérlet

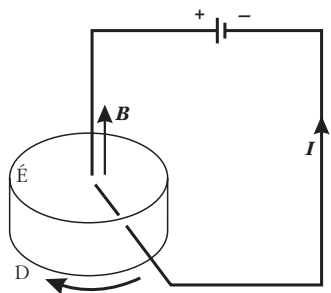
A kengyel látványos felemelkedését a drótban folyó erős (rövidzárási) áram és a mágnes terének kölcsönhatása okozza. Fordítsuk meg a mágnes polaritását. A kengyel elfordulásának iránya ellentétesé válik.

### Egyszerű elektromotor

Az erős neodymmágnes még egy lefelé tartott acéltű hegyén is megtartja saját súlyát. A motor forgórésze maga a mágneshenger, a tű, amelyen függeszkedik, a csapágy. Csatlakoztassuk a tűt egy friss laposelem egyik pólusához, míg a másik pólusra kapcsolt vezetékét érintsük finoman a mágneshenger palástjához. (A finom érintkezést vékony szálaból sodrott rézhuzallal biztosíthatjuk, ha a vékony rézszálakat „seprűszerűen” kibontjuk.) Jó érintkezés esetén a mágnespogácsa gyors forgásba jön a tű hegyén. Ha a mágnest megfordítjuk vagy a telep polaritását változtatjuk, a forgás iránya is változik. Látványosabbá, jobban megfigyelhetővé tehetjük a forgást, ha a forgó mágnes alá egy üres gyufásdobozt rögzítünk, ami együtt forog a mágnessel. A gyufásdoboz a legegyszerűbb motor

9. ábra. Még egyszerűbb motor





10. ábra. A motor működésének elve

szerűbben egy másik mágnessel rögzíthető. A második mágnezt beletesszük a dobozba, és a papírfalon keresztül rátapasztjuk a forgórészként szolgáló mágnezt. A kísérleti összeállítást a 8. ábra (rajz és a fotó) mutatja.

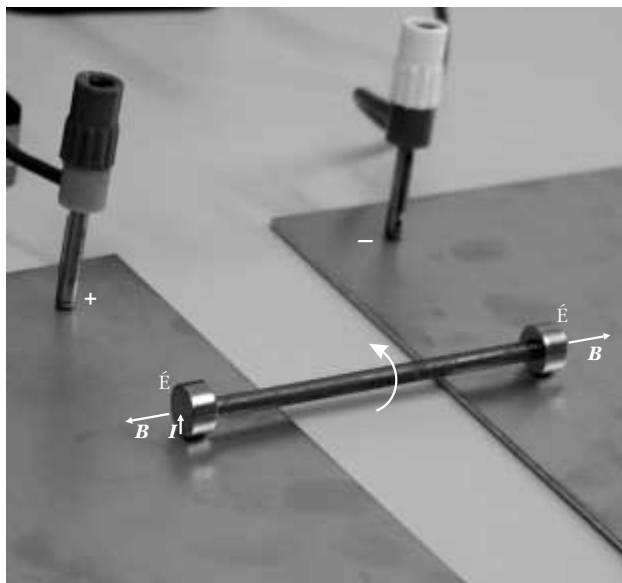
Talán még látványosabb a 9. ábrán látható kísérleti összeállítás. A mágnezt egy acél facsavar fejére tapasztjuk, majd a mágnessé vált csavart hegyével egy friss góliátelem egyik pólusára függesztjük. A mágnehenger szélét és az elem másik pólusát vezetékkel összekötjük. Megfelelő érintkezés esetén a mágnes, a rátapadt csavarral együtt gyors forgásba jön.

A motor működése az áramra mágneses térben ható erővel egyszerűen értelmezhető. Ezt segíti a 10. ábra vázlatos rajza. A konvencionális áramirány a telep pozitív pólusától a vezetékeken át a negatív pólusba mutat. Mivel a mágnehenger vezet, az áram sugárirányú, a tű tengelytől a palást érintkezési pontjába folyik. A jobbkézsabály értelmében az áramra ható erő a tengelyirányú mágneses indukcióvektorra és az áram irányára egyaránt merőleges. Ennek az erőnek a forgatónyomatéka forgatja a mágnezt.

### Mágneskereken guruló, „önjáró” tengely

Néhány cm hosszú, 3–4 mm vastag acélrúd két végére tapasszunk egy-egy neodymmágnes-hengert. Ügyeljünk rá, hogy a két mágnes ugyanazon pólusával forduljon a tengely felé (így a mágnesek taszítják ugyan egymást, de nagyobb távolságuk miatt ez a taszítás jóval kisebb, mint a mágnesek és a vas közti vonzás). Ha a mágnehengert koncentrikusan tapasztottuk az összekötőrúdra, a tengely a mágneskereken könnyedén gördülhet. Helyezzük a

12. ábra. A motor fordítottja, a generátor



11. ábra. Az „önjáró” tengely és működésének elve

kerekeket egymástól szigetelt két vízszintes és párhuzamos fémsínrre, vagy két rézborítású nyomtatott áramköri panelre (11. ábra). A két fémfelületet egy pillanatkapcsoló beiktatásával kapcsoljuk zsebtelep két pólusára.

A kapcsoló zárásakor a tengely a mágneskereken gurulni kezd. A telep polaritásának megcserélésével a gurulás iránya is megfordul.

A jelenség magyarázatát ismét az áramra mágneses térben ható erő adja. A telep áramköre a sínekkel érintkező, fémesen vezető mágneskereken és az acéltengelyen keresztül záródik. Az áramra mágneses térben ható erő nyomatéka mindkét mágneskeréken azonos, ezért a tengely elgördül.

### Egyszerű generátor

Kipróbáltan működő, de érzékeny mérőműszert és gondos összeállítást kívánó kísérlet a következő: Függőlegesen befogott, változtatható fordulatszámú fűrógépbe rögzítsünk 2–3 mm vastag acélrudacskát, és függesztünk erre neodymmágnes-hengert. A fűrógéppel a mágnes változtatható fordulatszámmal forgatható. Érzékeny mV-mérő egyik bemenetét csatlakoztassuk a fűrógépbe fogott acélrúdhhoz, a másik végét vékony, hajlékony vezetékhez. Ezt érintsük finoman a forgatott henger széléhez. A műszer feszültséget jelez, a feszültség a fordulatszám növelésekor növekszik (12. ábra).

A jelenség a mozgási indukcióval magyarázható. A koronggal együtt forgatott szabad elektronokra a mágneses tér erőhatást gyakorol. A mágneses erő hatására bekövetkező töltésátrendeződés miatt elektromos feszültség mérhető a forgatott henger palástja és tengelye közt.

### Irodalom

- M. GORE – The Physics Teacher 43 (2005) 248
- H.J. SCHLICHTING, C. UCKE – Physik in unserer Zeit 35 (2004) 272–273
- W. DINDORF – The Physics Teacher 43 (2005) 51
- S. STEWART – The Physics Teacher 44 (2006) 245
- HRASKÓ P. – Fizikai Szemle 52/8 (2002) 232–238
- NORIIHIRO SUGIMOTO, HIDEO KAWADA – The Physics Teacher 44 313 (2006)

A huszadik század végén a természeti jelenségek megismerésében a kaotikus rendszerek vizsgálata újabb előrelépést jelentett. A kaotikus rendszerekkel nem csak a kutatók, hanem mindnyájan találkozunk hétköznapjaink során, például, ha tejszínt keverünk a kávénkba [1], de a művészetben is megjelent, például *Tom Stoppard Arkádia* című darabjában.<sup>1</sup> Ez megerősített abban, hogy a középiskolás diákoknál érdemes megvizsgálni a káoszelmélet fogadtatását.

Ez a dolgozat a káosztudománynak a középiskolai fizika tananyagba való beillesztésének kérdéseivel foglalkozik. Vizsgálatunk tárgyát a középiskolás tanulók káosszal kapcsolatos előképe, és a témának a mechanika tananyag keretében, valamint szakkörön való taníthatósága képezte. Tananyagot fejlesztettünk ki a kaotikus mechanikai folyamatokról, és ezt kipróbáltuk két csoportban egy budapesti két tannyelvű szakközépiskola harminc 13. osztályos diákjával. A nyolc- kilenc órás tanítási modul előtt és után kérdőíveket töltöttünk ki a tanulókkal annak felmérésére, hogy milyen előképpel rendelkeznek, és hogyan változik meg ez a közös munka során. (A tananyag vázlatát, a szűkre szabott keretek miatt csak nagyon röviden, a mellékletben ismertetjük.)

A döntő fogalmak, amelyeket körül kívántunk járni és a tanulói ismeretek szempontjából mélyebben megértetni: *előrejelezhetőség, káosz, bonyolult, valamint kaotikus mozgás, keveredés, reverzibilitás, determináltság*. Ezen felül még egy óra állt rendelkezésünkre a kérdőívek kiértékelésére és beszélgetésre a témáról.

Kaotikus folyamatokat szinte minden természeti jelenséggel kapcsolatban tapasztalhatunk. Nemcsak olyan fizikai folyamatokban, mint a viharos tengerben áramló folyadék rétegek keveredése [3], hanem az állati populációkban – például egy ragadozó és lehetséges zsákmánya létszámának változása [4, 5] –, az óceáni plankton térbeli és időbeli változásában [3, 5], oszcilláló kémiai reakciókban [6], a szív működés ingadozásaiban [2]. Az elmélet alkalmazása megkezdődött a társadalomtudományokban is, ám bár inkább csak allegorikus szinten.

A mechanikában nagyon sok egyszerű példa található kaotikusan viselkedő rendszerekre [2]:

- mágneses inga
- felfüggesztési pontjában vízszintesen rezgetett inga
- kettős inga
- két lejtő között pattogó labda stb.

## A módszer

*Kísérleteken* (similabda, azaz nyúlós inga, jójó, mágneses inga,<sup>2</sup> kettős inga, rezgetett inga<sup>3</sup>) és *számítógépes szimulációkon* keresztül – egy tanártovábbképző tanfolyam anyaga alapján készült *Kaotikus mozgások* szimulációk

Illés Gyula *Bartók* című versének első sora: „Hangzavart”? – Azt!

program segítségével [7] – megismerkedtünk a káosz három legfontosabb jellemzőjével [2]:

- a szabálytalan mozgás,
- az előrejelezhetetlenség, azaz a kezdeti feltételekre való érzékenység, valamint
- a rend, a pontos geometriai szerkezet: fraktálszerkezet megjelenése a fázistérben.

Ez a lépésről lépésre történő felfedező folyamat a csoport számos diákjából a tanítási órákon ritkán tapasztalható nagy lelkesedést váltott ki. A fraktálok világa elvarázsolta őket. Ebben nagy szerepe volt a Mandelbrot- és Julia-halmazok tengeri csikóin és örvényein, sziget- és öbölvilágán [8] túl annak a jóleső érzésnek is, hogy a természetben oly gyakran előforduló formákról – felhők, fák, hegyek – is tudunk szólni a tudomány nyelvén.

*Közös beszélgetéseken* feldolgoztuk az ismert mozgásokat, együtt továbbgondoltuk ezeket. Az óra ingájának szabályos periodikus mozgása rögtön szabálytalanná válik, ha mágnes pólusai közé helyezzük; ugyanúgy szabálytalan mozgással találjuk szembe magunkat, ha két ingát egymáshoz kötünk, vagy ha egy inga felfüggesztési pontját szabályosan rezgetjük. A Föld keringése a Nap körül periodikus, de a Plútó pályája már kaotikus [9]. Egy pontszerű test mozgását le tudjuk írni pontosan, de a madártollak vagy a falevelek libegő hullása meghaladja lehetőségeinket. Így közösen láttuk be, hogy gyakran találkozunk a mechanikában – de nem csak ott – kaotikus jelenségekkel. Ezzel párhuzamosan az is kikristályosodott, hogy egyszerű törvények is vezethetnek bonyolult viselkedésre.

## A kiválasztott fogalmak

A középiskolában a káosz kapcsán leginkább az *előrejelezhetőség*, megjósolhatóság kérdését érdemes tárgyalni [10]. A napfogyatkozást már az egyiptomiak percre pontosan tudták előrejelezni, az időjárás előrejelzése napjainkban is gondot jelent. De nemcsak az olyan bonyolult jelenség, mint az időjárás, hanem egy mágneses inga mozgásának előrejelzése is problémát jelenthet.

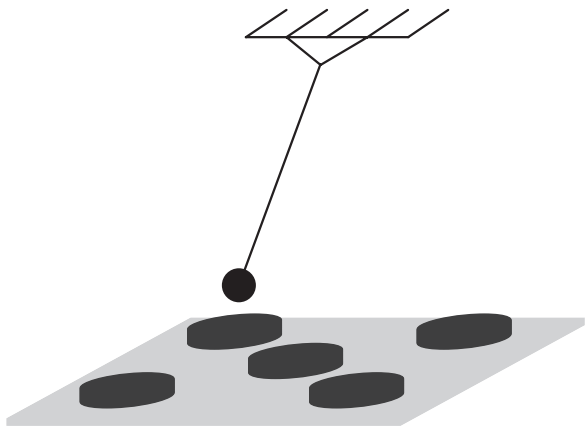
Mágneses ingával<sup>4</sup> végeztünk kísérletet. Megpróbáltuk követni az inga pályáját egymás után két alkalommal úgy, hogy igyekeztünk azonos kezdőpontból, azonos kitéréssel indítani az ingát. Rövid idő után eltérés mutatkozott, majd a felismerhetetlenségig különbözővé

<sup>1</sup> A Katona József Színházban 1998-ban volt *Tom Stoppard Arkádia* című darabjának a bemutatója.

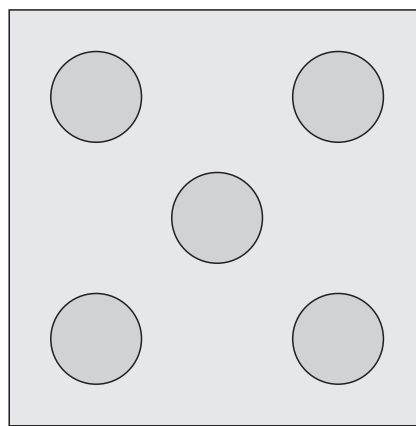
<sup>2</sup> A mágneses inga egyik változata megrendelhető interneten is: ROMP (Random Oscillating Magnetic Pendulum), például a <http://www.getdigital.de/index/0x> honlapon.

<sup>3</sup> A kettős ingát és a rezgetett ingát *Köllő Zoltán* fizikatanár készítette.

<sup>4</sup> Saját készítésű mágneses ingát, valamint a fenn említett ROMP típusút használtuk a kísérletekben.



1. ábra. Mágneses inga



2. ábra. Mágneses inga pályájának lerajzolásához

vált a két pálya. Ugyanezt vizsgálva a kettős inga és a gerjesztett inga esetében is, hasonlót tapasztaltunk. A diákok egy része azzal magyarázta a megfigyelt jelenséget, hogy nem tudtuk pontosan ugyanabból a kezdőpontból indítani az ingákat a két esetben. Ez még mindig nem indokolta a kevés lépés utáni ilyen nagyfokú eltérést, ezért kísérleti tapasztalatainkat számítógépes szimulációval is ellenőriztük.

Számítógépen vizsgáltuk a gerjesztett inga pályáját. A programot kétszer egymás után lefuttattuk, két, egymástól sokadik tizedesben eltérő kezdőfeltétellel. Kinyomtattuk a pályákat és összehasonlítottuk. A szimuláció is hamar divergáló pályákat adott, noha itt pontosan tudtuk, hogy mennyire kicsi a különbség a két kezdőfeltétel között. Bebizonyosodott, hogy hiába ismerjük az egyenleteket, a gerjesztett inga mozgása nem előrejelezhető, mivel a rendszer nemlineáris és nagyon felnagyítja a kezdeti kis hibát.

A kezdeti feltételekre való érzékenység kapcsán szó esett a pillangó-effektus kifejezésről, amely *Gleick*nek a káoszról írt népszerűsítő könyve [11] nyomán tett szert világhírré, ugyanakkor megbeszéltük azt is, hogy az elnevezésben milyen meglepetés veszélye rejlik [2].

Az utolsó órai beszélgetésünkön parázs vita keletkezett: ha ismerjük az egyenleteket, amelyek leírják a mozgást, hogyhogy nem jelezhető előre a rendszer viselkedése. Nagyon stabil determinisztikus világképpel szembeszültem. Megbeszéltük, hogy a rendszert leíró egyenletekben található nemlineáris tag az, ami annyira felnagyítja a kezdeti kis hibákat, eltéréseket. Míg lineáris egyenletek esetében a hiba csak lineárisan nő, itt exponenciálisan. Ebből adódik a kezdeti feltételekre való érzékenység. Akkor jött a következő kérdés: miért beszélünk káoszról – ami a hétköznapi szóhasználatban összevisszaság, a rend hiánya – ha ismerjük az egyenleteket. Erre csak egy lehetséges válasz volt: a jelenséget determinisztikus káosznak nevezzük. Pontosan a determinisztikus jelző az, ami tudunkra adja, hogy többről van szó, mint összevisszaságról. Elfogadták a magyarázatot, ennek ellenére az egyik csoportban felkérték abbéli véleményük továbbítására, hogy nem volt túl bölcs – és főleg nem a megértést segítő – dolog a káosz nevet adni ennek a jelenségcsoportnak, és ha van rá mód, ez változtassák meg.

A kérdőív egyik – visszatérő – kérdése az alábbi kísérletünkhöz kötődik.

**Mágneses inga:** egy mágneses testből készített fonálinga, az asztalra kis mágneses korongokat helyezünk el, melyek taszítják az inga végén levő testet.

Milyen mozgást fog végezni az *1. ábrán* látható mágneses inga, ha középről nagyon kis kitéréssel indítjuk (a mágnesek taszítják az ingatestet)? Írd le a mozgást, illetve jelöld a *2. ábrán*!

A kérdésre adott válaszokat táblázatban foglalom össze:

|                        | szabályos mozgás | szabálytalan, össze-vissza, (kaotikus) mozgás | megjegyzés   |
|------------------------|------------------|---|--|
| a tanítási modul előtt | 20               | 10  | össze-vissza mozgás  |
| a tanítási modul után  | 3                | 27  | 14 – kaotikus mozgás<br>10 – össze-vissza<br>3 – érzékeny a kezdeti feltételekre |

A tanítási modul, és ezen belül a kísérletek elvégzése után a diákok számára elfogadottá vált, hogy a kevés összetevőből álló rendszerek mozgása is lehet bonyolult (pl. a mágneses inga bolyongása.)

A *káosz* fogalmára rákérdeztünk:

Mit értesz azon, hogy káosz? Fejtsd ki röviden!

.....

A káoszt a témával való ismerkedés előtt az összes gyerek a hétköznapi szóhasználat szerint definiálta, azaz rendezetlenségnek, rendetlenségnek, összevisszaságnak stb. Nagyon kevesen, a harminc tanuló közül hárman, az összevisszasággal együtt az előrejelezhetetlenséget is megnevezték. A záró kérdőív esetén a válaszadók közül már csak öt tanuló azonosította a káosz fogalmát kizárólagosan a rendezetlenséggel, összevisszasággal. A többiek káoszfogalma elmozdult, árnyalódott: 24 válasz tartalmazta az előrejelezhetetlenséget, jósolhatatlanságot, ebből 7 pontos definíció volt, és négyen voltak, akiknél az összevisszaság és az előrejelezhetetlenség együtt volt jelen.

Ugyancsak a kaotikusságot járta körül egy másik kérdésünk is:

| óra sorszáma | téma  | tartalom, fogalmak  |
|--------------|---|---|
| 1.           | Kérdőív kitöltése tanítás előtt                       |   |
| 2.           | Fraktálok   | Természetes fraktálok, matematikai fraktálok (Cantor-halmaz, Sierpinski háromszög)  |
| 3.           | A káosz fogalma                                       | Periodikus – kaotikus mozgás<br>Linearitás – nemlinearitás<br>Előrejelezhetőség – érzékenység a kezdeti feltételekre<br>Determinisztikus káosz                              |
| 4.           | Hasznos-e a káosz?                                    | Mikor hasznos a káosz? – Keveredés<br>Irreverzibilitás<br>Instabilitás<br>Káoszkontroll   |
| 6.           | Számológépes iterációk                                | Számológépes iterációk – Játsszunk káoszt! ( $x^2$ , $\cos x$ , $2x^2 - 1$ , $kx^2 - 1$ ), bifurkációs diagram  |
| 7.           | Példák kaotikus mozgásokra – Kísérletek 1             | Mechanikai példák kaotikus mozgásokra: kísérletek (gerjesztett rezgés, gerjesztett inga), csillagászati példák (meteorit) – előrejelezhetőségi idő                          |
| 8.           | Példák kaotikus mozgásokra – Kísérletek 2             | Mechanikai példák kaotikus mozgásokra – kísérletek: mágneses inga<br>Keveredés<br>Fraktál vonzási tartomány<br>Átmeneti (tranzien) káosz                                    |
| 9.           | Példák kaotikus mozgásokra – Számítógépes szimulációk | Számítógépes szimulációk:<br>– valódi térbeli pálya<br>– kitérés<br>– fázistérbeli mozgás<br>– paraméterek beállítása<br>– jóslhatóság (érzékenység a kezdeti feltételekre) |
| 10.          | További példák. Összefoglalás, ismétlés               | Stabilitás-instabilitás<br>Példák bemutatása rövidfilmen: kaotikus áramkör, vízikerek   |
| 11.          | Kérdőív kitöltése tanítás után                        |   |
| 12.          | Beszélgetés   |   |

A következő rendszerek közül melyiket nevezné kaotikusnak (*több választ is bekarikázhat*):

- egy nagyon rendetlen szoba
- egy rosszul szervezett futóverseny
- festékek keveredése
- időjárás

Összefoglalom táblázatban a kérdésre adott válaszokat.

|                        | a  | b  | c  | d  |
|------------------------|----|----|----|----|
| a tanítási modul előtt | 15 | 16 | 10 | 10 |
| a tanítási modul után  | 6  | 8  | 27 | 18 |

Ezekből a válaszokból egyértelműen látszik az elmozdulás a káosz hétköznapi eredeti fogalmától a tudományos felé, de ugyanakkor az is kiderül, hogy többeknél együtt él ez a két fogalom.

A *keveredést* majdnem mindenki, huszonheten jelölik meg a determinisztikus káossal való ismerkedést követően mint kaotikus folyamatot, nagyon helyesen. Sok figyelmet fordítottunk a folyadékok keveredésére – amint látszik, nem hiába –, hiszen itt lehetett megragadni a rend, a pontos geometriai szerkezet megjelenését. A fraktálmintázat a kaotikus folyamatok esetében mindig megjelenik egy absztrakt térben, a fázistérben, így rejtve marad a közvetlen megfigyelés előtt. A keveredés a kivétel: a fázistér egybeesik a valós térrel, így megfigyelhető a

hétköznapiakban is: a kávéba öntött tej vagy tejszín, a tejbegrízbe öntött málnaszörp, az áramló folyadékok felszínén sodródó szennyeződések vagy festékfoltok bonyolult, szálas szerkezetű alakzattá folynak sőt és megjelenik a fraktálmintázat.

Hasonlóan látványos mintázatokat szül két vagy három különböző színű gyurmaud hajtogatása és nyújtogatása. Még a középiskolás tanulóknak is nagy öröme szolgál a szép fraktálszerkezetek saját kezű kialakítása. Az is kiderült számunkra, hogy nagymamáink nem hiába hajtják össze és nyújtják a tészta (pék leképezés), hiszen ők már rég tudják azt, amit az utóbbi időben a tudomány is megfogalmazott, hogy a legjobb keveredést ez az algoritmus, a nyújtás-összehajtás adja. A keveredés a leghatékonyabb akkor, ha kaotikus a folyamat: így a káosz egyik hasznosításáról is szót ejtettünk.

Otthoni játéknak vagy további szakköri tevékenységnek ajánlottuk a „márványozás”-nak nevezett technikát is. A lányok nagyon lelkesedtek, amikor kiderült, hogy papírlapon és gyertyán kívül nagyon szép kendőket is lehet így festeni 2–3 színes festék keverésével.<sup>5</sup> Itt ismét alkalmunk volt visszakanyarodni a természetben előforduló mintázatokhoz, hiszen nem hiába keresztelték el márványozásnak ezt a technikát, a természetben található márvány mintázatait idézi.

<sup>5</sup> Hobbyboltokban több kiadásban is találhatóak segédkönyvek, például *Hannelore Otto: Márványozás*, CSER Kiadó, Budapest, 2004.



A kezdeti kérdőívet több iskolában, több osztályban is kitöltöttük (több mint háromszáz tanulóval). Bármelyik osztályban is voltam, mindig tudtam, mikor értek a tanulók a „tejbegríz-keverés” kérdéshez. Ez a kérdés a *reverzibilitás* fogalmát feszegette és mindig mosolyt fakasztott a diákokban:

Lassan, néhány mozdulattal elkeverjük a málnaszörpöt a tejbegrízben.

1. Ha lassan ugyanilyen mozdulatokkal visszafelé keverjük, visszakerül-e a málnaszörp az eredeti helyére:

- igen
- nem

2. Ez a mozgás előrejelezhető-e?

.....  
A harminc tanuló válaszainak összesítését a következő táblázatba foglaltuk:

|                                   | igen | nem | megjegyzés  |
|-----------------------------------|------|-----|---|
| Visszakerül-e az eredeti helyére? | 0    | 30  |   |
| Előrejelezhető-e a mozgás?        | 17   | 13  | Az egyik nem választ adó kifejti: a körülmények teljesen pontos ismeretében előrejelezhető lenne. |

A válaszok összesítéséből kiderül, hogy minden diák számára egyértelmű, hogy a folyamat irreverzibilis, még ha magát a kifejezést nem is ismeri esetleg.

A záró kérdőívben visszatértünk erre a témára:

Lassan, néhány mozdulattal elkeverjük a málnaszörpöt a tejbegrízben. Ha lassan, ugyanilyen mozdulatokkal visszafelé keverjük, tudjuk, hogy a málnaszörp nem kerül vissza az eredeti helyére.

Ennek ismeretében mit gondolsz, van-e köze a káosz-nak ahhoz, hogy a valóságban a folyamatok mindig csak egy kitüntetett irányban zajlanak (irreverzibilitás)?

A válaszok a nyitott kérdésre változatosak voltak, a magyarázatok nagyon szórta, összesítve 23-an gondolták úgy, hogy van köze a káosznak az irreverzibilitáshoz. Kiemelnék egy választ, amely megértésről tanúskodik: *Elméletileg, ha ugyanazt a mozgást végezzük visszafelé, ugyanazon az úton, akkor visszafordítható a folyamat. De ez a gyakorlatban nem lehetséges.*

A determinizmus fogalmának alakulását a következő kérdéssel terveztük megragadni:

A fizikai jelenségek világa szerinted melyikhez van közelebb:

- olyan világ, ahol a kiindulási állapot pontosan meghatározza, mi fog történni később, vagy
- olyan világ, ahol az óhatatlanul jelen lévő kis bizonytalanságok felnőnek, s ezért szerepe van a véletlennek.

A válaszokat ismét táblázatban foglalom össze:

|                        | determinisztikus világkép | véletlenek szerepének, a kis eltérésekre való érzékenység elfogadása | előbbi kettő egy- időben |
|------------------------|---------------------------|--|--------------------------|
| a tanítási modul előtt | 25                        | 5  | 0                        |
| a tanítási modul után  | 15                        | 12   | 3                        |

A fenti számok önmagukért beszélnek. Egyrészt látható a kis eltérésekre való érzékenység, a véletlenek szerepének az elfogadottságában a növekedés, másrészt megjelenik a két világgép együttélése három válaszadó esetén.

## Összefoglalás

Tapasztalataink azt mutatják, hogy akár szakközépiskolás diákok részére is lebilincselő a káosz. A káosz képi világa és formai lehetőségei mágnesként vonzza a diákok tekintetét, felébreszti kreativitásukat. Ezek a hétköznapi, mindenki számára érthető, megfogható folyamatok segítenek a természettudományos gondolkodás elmélyítésében.

Hasznos lenne, hogy a középiskolás diákok halljanak a kaotikus jelenségekről. A modern fizika olyan fejezetéből kaphatnának ízelítőt, amely könnyen megközelíthető, mert a természettudományok nagyon sok területén megtalálható a fizikától a biológián át a környezettudományokig, s mindez makroszkopikus skálán. Az elmúlt évek hazai tapasztalatai azt mutatják, hogy középiskolás diákok publikálásra érett eredményeket érhetnek el a káosz kísérleti vizsgálata témakörében [12–14].

Már nemcsak a természettudományok művelői foglalkoznak azzal, hogy ezeket a fogalmakat be kellene vezetni a középiskolai oktatásba, hanem az *Új Pedagógiai Szemle* is. Megerősíti bennünk ezt *Csorba F. László* felvétele is az *Új tudomány: A káosz* [15] cikkében. Három szempontot említ, ami szerinte indokolná, hogy a tanítási órákon is legyen szó a káoszról. Szempontjai egybecsengenek az általunk megfogalmazottak és az általunk tapasztaltak egy részével:

- az esztétikai-érzelmi kötődés lehetősége
- alkalom reflektálásra néhány – alapvető – filozófiai alapelvre: determináció, jóslhatóság (előrejelezhetőség), történetiség
- a számítógép kreatív és tervezhető bekapcsolása a hagyományos tantárgyak oktatásába.

*Marx György Az iskola új feladata* [16] című előadása így foglalta össze már 1995-ben a káosz „időszerűségét”: „A 20. század bevezetett a kvantumelméletbe és a statisztikus fizikába, komplementer modellek használatára nevelt és csupán valószínűségi anticipációt engedett meg. De most a századvégen felfogjuk világunk nemlineáris jellegét. Ha az Ohm-törvény hirtelen érvényessé válna félvezetőkre is, elnémulna minden rádió, megállna minden számítógép és elektronikus eszköz; lineáris optikában a fényszálak is elveszítenék nagy információmennyiséget továbbító képességüket. A fizikában is káosz lett a divat, akárcsak a (szintén nemlineáris) piacon és a politikában. Kiugróan nagy értékek és intenzitások, éles és gyors változások esetén a kezdeti feltétel parányi különbségei jelentős eltéréseket eredményezhetnek a végkifejletben.”

Bár tudjuk, hogy nagyon nehéz ezeket a jelenségeket középiskolai szinten oktatni, mert a tudományos igényű matematikai apparátus nem használható, ugyanakkor mégis nagyon fontosnak tűnik, mert a természet leírásának túlságos leegyszerűsítése elveheti a tanulók hitét a

természettudományok erejében. Ezért hasznosnak tartjuk a kitekintéssel való próbálkozást és a tanári közösség együttműködését ezen a területen.

#### Irodalom

1. TÉL T.: *Káosz egy csésze kávéban* – Természet Világa 127 (1996) 386
2. TÉL T., GRUIZ M.: *Kaotikus Dinamika* – Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 2002.
3. NEUFELD Z.: *Káosz és keveredés a légkörben és óceánban* – Természet Világa 134 (2003) március
4. DOMOKOS G.: *Püthagorász, Rényi és a lemmingek, avagy a káosz irracionálitása 1–2* – Természet Világa 133 (2002) szeptember, október
5. SCHEURING I.: *Káosz az élőközösségekben. Nemlineáris jelenségek kompetitív rendszerekben és táplálékláncokban* – Természet Világa 133 (2002) augusztus
6. GÁSPÁR V.: *Játsszunk Káosz! Káosz: determinisztikus rendszerek véletlenszerű viselkedése* – Természet Világa 133 (2002) július
7. HÓBOR M., GRUIZ M., GÁLFI L., TÉL T.: *Kaotikus mozgások* – szimulációs program, ELTE TTK Elméleti Fizika Tanszék 2001.
8. KECSKÉS L.: *Egy öhnyi végtelen* – Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 2002.
9. F. DIACU, PH. HOLMES: *Égi találkozások. A káosz és a stabilitás eredete* – Akkord Kiadó, Budapest, 2003.
10. F. HERRMANN, L. MINGIRULLI, P. MOREWIETZ: *A káosz tanítása iskolákban* – Fizikai Szemle 38 (1988) 301 (eredeti szöveg F. HERRMANN, L. MINGIRULLI, P. MOREWIETZ: *Teaching Chaos in Schools* in Marx György ed.: *Teaching Non-linear Phenomena – Chaos in Education*, National Centre for Educational Technology, 1987.)
11. J. GLEICK: *Káosz, egy új tudomány születése* – Göncöl Kiadó, Budapest, 1999.
12. SÓTÉR A.: *Lorenz modelljének kísérleti vizsgálata és a kaotikus vízierkek* – Természet Világa melléklete, Diák pályázat, Természet Világa 135 (2004) május
13. BÉKÉSSY L.I., BUSTYA Á.: *A fizikai kettős inga vizsgálata. Kaotikussá vált mechanikai síkmozgás egy példája* – Fizikai Szemle 55/5 (2005) 185
14. BÍRÓ I.: *Mágneses ingák kísérleti tanulmányozása. Kaotikussá váló mechanikai síkmozgás egy példája* – Fizikai Szemle 56/1 (2006) 13
15. CSORBA F.L.: *Új tudomány: A káosz* – Új Pedagógiai Szemle 2000/9
16. MARX GY.: *Az iskola új feladata* – Gyorsuló idő 4 – Fizikai Szemle 45/9 (1995) 289

## AZ ORSZÁGOS SZILÁRD LEÓ FIZIKAVERSENY FELADATAIRÓL

Ujvári Sándor

Lánczos Kornél Gimnázium, Székesfehérvár

Szilárd Leó születésének centenáriumi évében, 1998-ban Marx György professzor országos fizikaversenyt kezdeményezett. Az Országos Szilárd Leó Fizikaverseny az eredeti kiírás szerint az atommagfizika, a nukleáris energetika, a környezet- és sugárvédelem fejezeteiből meríti feladatait. Az utóbbi két évben a verseny kibővült a modern fizika többi részével. Az idei versenyről szóló cikket a *Fizikai Szemle* augusztusi számában olvashatták.

A tematikus verseny új dolog, ezért a feladatokat kitűző bizottság a kezdetektől figyelte a feladatmegoldások eredményességét. Az, hogy minden feladatot meg tudott valaki oldani, és sok, nehéznek tűnő feladatot a diákok jó ötletekkel, komoly tudással nagy százalékban oldottak meg, igazolta a feladatkitűzés gyakorlatát.

A verseny eredményességét vizsgáltam meg részletesebben, nem csak a jó megoldások százalékában kifejezett arányát figyelve. A kétfordulós verseny első fordulójában minden évben több száz tanuló vett részt. Ezekhez a – különböző iskolákban megírt – dolgozatokhoz azonban nem fértem hozzá, így az elemzésemet csak a verseny második fordulójának (döntőjének) feladataira kellett korlátoznom. Ez – természetszerűleg – a vizsgált dolgozatok maximális számát is meghatározta, hiszen a versenybizottság – a verseny szabályainak megfelelően – maximum 20 fő I. kategóriás (11–12. osztályos), és 10 fő „Junior” (8–10. osztályos) diákot hív be a döntőbe minden évben.

A döntő archivált elméleti feladatainak megoldásait elemeztem a feladatok típusai és az eredményesség szempontjából a versenysorozat kezdetétől 2005-ig (két év, 1998 és 2003 kimaradt, mert a dolgozatok nem voltak elérhetőek).

### Az elemzés szempontjai

A verseny eddig kitűzött feladatait három szempont szerint csoportosítottam:

- *típus*: a feladat témája,
- *jelleg*: elméleti (szöveges megoldást igényel) vagy kiszámolandó, esetleg elméleti és kiszámolandó együtt,
- *komplexitás*: a komplexitás nem kizárólag a feladat megoldásának nehézségével kapcsolatos. Egyszerűnek neveztem azokat a feladatokat, amelyek a fizika egy fejezetének ismeretével megoldhatóak, közepesnek, ahol ehhez még egy fejezetet kellett ismerni, komplexnek az olyan feladatot minősítettem, ahol három, vagy annál több témához tartozó ismeret kombinálására volt szükség a megoldáshoz.

Meghatároztam a kitűzött feladatok nehézségét is, melyet a pedagógiai szakirodalomból vett módon definiáltam: a helyes megoldások száma osztva az összes megoldók számával. A nehézségi érték skálája így 1 (nagyon könnyű, mindenki megoldotta) és 0 (nagyon nehéz, senki nem oldotta meg) között helyezkedik el. Részletesebben megvizsgáltam a legkönnyebbnek és a legnehezebbnek bizonyult döntő feladatsorát, és ebből próbáltam következtetni arra, mi könnyű és mi nehéz a megoldók szempontjából.

### A feladatsorok

A versenybizottság összesen 87 feladatot adott fel 2005-ig a döntők során. Az eddig kitűzött feladatok a következő témákhoz sorolhatók: könnyű atommagok, nehéz atommagok, izotópok, radioaktivitás, bomlási sorok, radioaktív órák, detektorok, orvosi fizika, sugárvédelem, mag-

| 1. táblázat                                    |               |                |
|--|---------------|----------------|
| Az elemzett dolgozatok évek és létszám szerint |               |                |
| Év   | 9–10. osztály | 11–12. osztály |
| 1998   | –             | –              |
| 1999   | –             | 19             |
| 2000   | 7             | 19             |
| 2001   | 5             | 13             |
| 2002   | 10            | 20             |
| 2003   | –             | –              |
| 2004   | 8             | 18             |
| 2005   | 10            | 20             |
| összesen                                       | 40            | 109            |

| 2. táblázat  |               |                |
|--|---------------|----------------|
| A versenyek összesített eredménye százalékban (zárójelben: a szórás) |               |                |
| Év   | 9–10. osztály | 11–12. osztály |
| 1999   | Nincs adat    | 58,0 (7,8)     |
| 2000   | 57,7 (7,9)    | 48,0 (7,1)     |
| 2001   | 58,8 (9,6)    | 77,7 (4,7)     |
| 2002   | 62,4 (8,5)    | 58,4 (6,7)     |
| 2004   | 40,7 (12,2)   | 44,5 (8,7)     |
| 2005   | 42,6 (6,2)    | 56,6 (6,9)     |

hasadás, reaktorok, asztrofizika, radon, fúzió, „milyen lenne a világ”,<sup>1</sup> környezetvédelem, fizikatörténet, részecskefizika, szórás kísérletek, Cserenkov-sugárzás, kvantummechanika, Compton-effektus. A legnagyobb arányban (kb. 20%) a nukleáris energetikával, reaktorokkal, maghasadással foglalkozó feladatok fordultak elő az elemzett nyolc év során.

A vizsgált dolgozatok számát és a megoldók korosztály szerinti megoszlását az 1. táblázat tartalmazza.

A megoldás eredményességét tekintve (2. táblázat) a 2004-es évben elért 44,5% és a 2001-es versenyen teljesített 77,7% képezik a skála két szélső értékét, az összes többi eredmény nagyjából 50% és 60% közé esik:

Ez azt jelzi, hogy a kitűzött feladatok jól megfeleltek a célnak, a verseny döntője nem túl könnyű és nem túl nehéz, a feladatok megoldhatóak, de nem mindenki tudja őket megoldani.

## A feladatok vizsgálata „nehézség” szerint

Mivel a feladatokat egytől ötig pontozta a versenybizottság, ezért a nehézség kiszámításához szükséges „helyes megoldás” fogalmát definiálni kell. Megoldottnak tekintem azokat a feladatokat, amelyeket a javítók négy vagy öt pontra értékelték. Az öt pontot nem kell indokolni, a négy pont pedig azt jelenti, hogy a versenyző megértette a feladatot, jól meg is oldotta, csak hibát követett el.

A feladatsorok közül először a legkönnyebbet és a legnehezebbet vizsgáltam. 2001-ben érték el a legjobb átlagot a versenyzők. Az archívumban nem minden dolgozat volt meg, így a kilenc-tizedik osztályosok öt, a tizenegy-tizenkettedik osztályosok tizenhárom dolgozatának eredményét foglaltam táblázatba. (Az Országos Szilárd Leó Fizika-verseny évkönyve szerint 2001-ben a megoldók száma valószínűleg tíz fiatalabb és húsz idősebb diák volt.)

A felsőbb évesek grafikonján (1. ábra) látható is, amit a 2. táblázatban már kiszámoltam: a 2001-es eredmény-

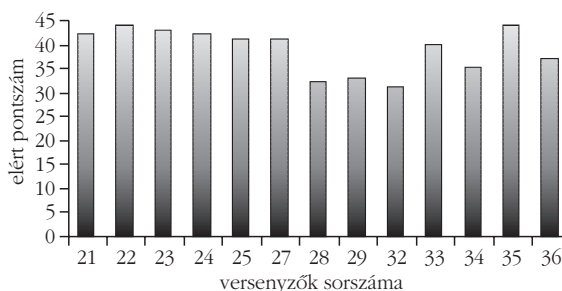
nek igen kicsi a szórása. Ez a feladatsor nem teljesítette megfelelően azt, hogy a versenyzőket szétválogassa. A 31 pontos legalacsonyabb érték és az elért legtöbb, 44 pont között nagyon kicsi a különbség. A fiatalabbaknál ez a skála 21 ponttól 39 pontig terjed (2. ábra).

A nagyon jó eredményt a feladatsor könnyűsége magyarázza. Ebben az évben a tíz kitűzött feladatból nyolc szöveges (nyílt végű) feladat és két, számolással megoldandó feladat volt. A feladatok közül komplexitás szempontjából hat egyszerű volt, a többi közepesen összetett. Az átlagos itemszám (az item a feladat „elemi részecskéje”, egy ismeretegységet jelent) 3,3. A két csoport megoldásainak szerkezete alapvetően különbözött: A juniorok közül alig volt teljes megoldás, a pontjaikat a feladatokra kapott részpontszámokból szedték össze. Az összesen 50 lehetőségből csak 6 teljes megoldást adtak, míg a nagyoknak 150 feladatból ez 59-szer sikerült.

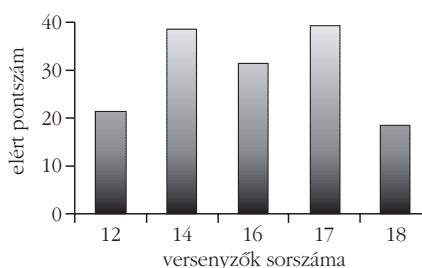
A „könnyű” 2001. évi feladatsor típusait a 3. táblázat foglalja össze. A 2001. évi megoldások gyakorisági eloszlását a 3. ábrán látható grafikon mutatja. Ideális esetben normális eloszlást várnánk.

A legnehezebbnek a 2004-es feladatsor bizonyult, a feladatok típusai, adatai a 4. táblázatban láthatók.

1. ábra. 2001-ben a 11–12. osztályosok által elért pontszám



2. ábra. 2001-ben a 9–10. osztályosok által elért pontszám



<sup>1</sup> A „milyen lenne a világ” típusú kérdések valamilyen természeti állandó, törvény megváltozásának lehetséges következményeire vonatkoznak. Például: milyen lenne a világ, ha a neutron tömege egy százalékkal kisebb lenne?

## A 2001. évi feladatok típus szerint besorolva

| sorszám | típus                          | jelleg   | komplexitás*                 | itemek száma |
|---------|--------------------------------|----------|------------------------------|--------------|
| 1       | fizikátörténet                 | szöveges | egyszerű                     | 3 item       |
| 2       | radioaktív bomlás              | számolás | egyszerű                     | 2 item       |
| 3       | asztrofizika                   | szöveges | egyszerű                     | 3 item       |
| 4       | „milyen lenne”, radioaktivitás | szöveges | egyszerű                     | 4 item       |
| 5       | biológia, radioaktivitás       | szöveges | közepes: biológia, kémia     | 3 item       |
| 6       | környezetvédelem               | szöveges | közepes: kémia, meteorológia | 3 item       |
| 7       | orvosi                         | szöveges | egyszerű                     | 2 item       |
| 8       | radioaktív órák                | szöveges | egyszerű                     | 3 item       |
| 9       | radon                          | szöveges | nyílt végű                   | 5 item       |
| 10      | radioaktív bomlás              | számolás | közepes: hőtan               | 5 item       |

## A 2004. évi feladatok típus szerint besorolva

| sorszám     | típus                            | jelleg             | komplexitás*                                  | itemek száma |
|-------------|----------------------------------|--------------------|---|--------------|
| 1           | neutronok                        | számolás           | közepes: egyenáram                            | 5 item       |
| 2           | részecskefizika                  | szöveges, számolás | közepes: ütközés, relativitás                 | 6 item       |
| 3           | maghasadás, neutronlassítás      | számolás           | közepes: ütközés, sorozatok                   | 4 item       |
| 4           | Rutherford-szórás                | szöveges, számolás | közepes: ütközések                            | 6 item       |
| 5           | Cserenkov-sugárzás               | számolás           | közepes: optika                               | 4 item       |
| 6           | fotoeffektus                     | számolás           | egyszerű                                      | 3 item       |
| 7           | környezetvédelem, hidrogén       | szöveges           | egyszerű                                      | 4 item       |
| 8           | „milyen lenne”, kvantummechanika | szöveges           | egyszerű                                      | 4 item       |
| 9           | nehéz atommag                    | számolás           | közepes: ütközés                              | 3 item       |
| 10          | könnyű atommag                   | szöveges           | egyszerű                                      | 4 item       |
| 9 (junior)  | kvantummechanika                 | számolás           | közepes: lendületmegmaradás                   | 3 item       |
| 10 (junior) | csillagászat                     | szöveges           | közepes: kvantummechanika, lendületmegmaradás | 5 item       |

\* A komplexitásnál a típusban megadott téma mellett a megoldáshoz még szükséges fejezetek vannak megadva.

Ebben az évben bővítette a versenybizottság a tematikát a modern fizika magfizikán kívüli többi fejezetével. A feladatok eredményessége 21%-tól a 79%-ig változik. Az eredmények szórása 17,5. A feladatok többsége közepesen komplex, a megoldás módja szerint kiszámítandó, vagy kiszámítandó is, az átlagos itemszám 4,3 volt.

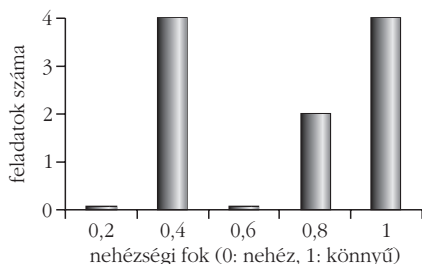
A 4. ábrán látható grafikon szemlélteti, miért 2004-ben volt a legkisebb a helyes megoldások aránya. Ez az eloszlás teljesen a nehéz feladatok felé tolódott el.

## Az összes feladat elemzése

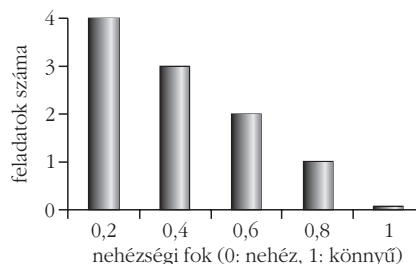
A legkönnyebb és a legnehezebb év mellett az összes feladatot besoroltam nehézsége szerint. Tekintsük nehéznek azokat, amelyeknek nehézségi értéke 0,3 és 0 között, van és vizsgáljuk meg ezen feladatok jellemzőit!

Az 5. táblázatból azonnal látható, hogy a nehéz feladatok legfontosabb közös tulajdonsága a feladatok komplex volta.

3. ábra. A 2001. évi feladatok nehézség-gyakoriságának eloszlása



4. ábra. A 2004. évi feladatok nehézség-gyakoriságának eloszlása



## Nehéz feladatok típus és jelleg szerint

| sorszám   | típus               | jelleg             | komplexitás*                                      | itemek száma |
|-----------|---------------------|--------------------|---|--------------|
| 1999 / 6. | reaktorok           | szöveges           | közepes   | 3 item       |
| 9.        | fúzió               | szöveges, számolás | komplex: lendületmegm., elektromágneses kölcsönh. | 5 item       |
| 10.       | radioaktív órák     | szöveges, számolás | komplex: bomlás, hibaszámítás, aktivitás          | 8 item       |
| 2000 / 1. | „milyen lenne”      | szöveges számolás  | közepes   | 3 item       |
| 2.        | reaktorok           | szöveges           | közepes: reaktorok, hővezetés                     | 3 item       |
| 6.        | asztrofizika, fúzió | számolás           | közepes   | 3 item       |
| 7.        | fúzió               | szöveges, számolás | közepes   | 3 item       |
| 8.        | radioaktív bomlás   | szöveges           | egyszerű  | 2 item       |
| 2002 / 4. | nehéz atomok        | szöveges           | közepes: reaktorok, asztrofizika                  | 4 item       |
| 6.        | radioaktív órák     | szöveges           | közepes: földrajz, hidrodinamika                  | 7 item       |
| 10.       | reaktorok           | szöveges           | közepes: ütközések, mozgási energia               | 5 item       |
| 2004 / 2. | részecskefizika     | szöveges, számolás | közepes: ütközés, relativitás                     | 6 item       |
| 4.        | Rutherford-szórás   | szöveges, számolás | közepes: ütközések                                | 6 item       |
| 7.        | Compton-effektus    | számolás           | közepes: lendület, energiamegmaradás              | 6 item       |
| 8.        | Rutherford-szórás   | számolás           | közepes: relativitás                              | 3 item       |
| 10.       | könnyű atommag      | szöveges           | közepes: fénynyomás, gravitáció                   | 4 item       |
| 2005 / 5. | kvantummechanika    | számolás           | egyszerű  | 3 item       |
| 8.        | Rutherford-szórás   | számolás           | közepes: relativitás                              | 3 item       |

## Könnyű feladatok típus és jelleg szerint

| sorszám   | típus                        | jelleg             | komplexitás*             | itemek száma |
|-----------|------------------------------|--------------------|--------------------------|--------------|
| 1999 / 2. | sugárvédelem                 | számolás, szöveges | egyszerű                 | 3 item       |
| 3.        | sugárvédelem                 | szöveges           | egyszerű                 | 4 item       |
| 2001 / 1. | fizikatörténet               | szöveges           | egyszerű                 | 3 item       |
| 2.        | radioaktív bomlás            | számolás           | egyszerű                 | 2 item       |
| 3.        | asztrofizika                 | szöveges           | egyszerű                 | 3 item       |
| 4.        | milyen lenne, radioaktivitás | szöveges           | egyszerű                 | 4 item       |
| 5.        | biológia, radioaktivitás     | szöveges           | közepes: biológia, kémia | 3 item       |
| 8.        | radioaktív óra               | szöveges           | egyszerű                 | 3 item       |
| 2004 / 1. | neutronok                    | számolás           | közepes: egyenáram       | 5 item       |

\* A komplexitásnál a típusban megadott téma mellett a megoldáshoz még szükséges fejezetek vannak megadva.

Ez azt jelenti, hogy akkor okozott gondot a versenyzőknek a feladat, ha egyszerre több fizikai fejezetre volt szükség a megoldáshoz. Az összes feladat között 34 egyszerű feladat fordul elő, ami 38%-os arányt jelent, míg a nehézként meghatározott feladatok között csak három, az összes nehéz feladat 17%-a. Ezenkívül a nehéz feladatoknak magasabb az átlagos itemszáma, 3,49 (a könnyű feladatoké csupán 2,4).

A 0,7-nél nagyobb nehézségi értékeket kapott feladatokat nevezük könnyűnek, ezeket a 6. táblázat tartalmazza. A legkönnyebb feladatok túlnyomó többsége egyszerű és szöveges (nyílt végű), összesen három kiszámolandó feladat volt közöttük.

## A két legnehezebb feladat

Nézzünk két-két példát a legnehezebbnek és a legkönnyebbnek bizonyult feladatok közül. A nyolc év során összesen két 0-s nehézségi fokozatú feladat fordult elő (ezekre senki nem adott 4 és 5 pontos megoldást).

## A 2002. év második feladata

A japán Tokai-Mura kémiai gyárban uránoxidot tisztítanak atomreaktor-fűtőelemek céljára. A kémiaileg megtisztított uránoxidot egy tartályban vizes oldatból kémiaileg kiválasztják, s az csapadék formájában a tartály aljára ülepedik. A kémiai átalakulás során fejlődött hő elvezetésére a

tartályt vízburok veszi körül. A vízköpenyben hűtővíz áramlik: kintről csövön jön be hidegen, a fölmelegedett hűtővíz csövön kifolyik. 1999 őszén az történt, hogy a szokásos 3% dúsítású urán oxidja helyett (magas hőmérsékletű reaktorok részére) 18%-ra dúsított urán oxidját tisztították, de – a szabályokat megszegve – ugyanakkora anyagmennyiségekkel dolgoztak. Így esett, hogy a leülepedett urán-oxid elérte a kritikus mennyiséget, benne hasadási láncreakció indult meg. A spontán létrejött reaktor önmagát szabályozta és 17 órán keresztül állandósulva működött. Mivel a kémiai üzemben láncreakcióra nem számítottak, a helyiségben sugármérők és szabályozó-beavatkozó automatika nem volt. A váratlanul kialakult magas neutron-szint miatt nem is lehetett belépni a helyiségbe. 17 óra után külső beavatkozással sikerült a láncreakciót leállítani.

a) Milyen folyamatok kaphattak szerepet a hasadási láncreakció önszabályozásában?

b) Milyen külső beavatkozás volt képes a zárt tartályban folyó láncreakciót leállítani?

#### A 2004. év tizedik feladata

Vajda János írta *Az üstökös* című versében:

„Az égen fényes üstökös; uszálya

Az ég felétől le a földre ér.

Mondják, ez ama »nagy«, melynek pályája

Egyenes, vissza hát soha se tér.”

Haladhat-e egyenes pályán egy test a Naprendszerben anélkül, hogy a Napba zuhanna? Indokolja meg a választ! (A bolygók hatását hanyagoljuk el!)

#### A két legkönnyebb feladat

A legkönnyebbek a 2001. év 3. (nehézség 1, azaz 4 pontot mindenki elért) és 8. (nehézség 0,92, azaz 1 diák volt, aki nem ért legalább 4 pontot) feladata bizonytalt.

#### A 2001. év harmadik feladata

Egyes csillagokban észlelték a californium ( $Z = 98$ ) transzurán elemet is, de a Földön ez az elem nem található. Hogyan lehet ez?

#### A 2001. év nyolcadik feladata

Hevesy György először az uránérc U/Pb arányából határozta meg a földkéreg életkorát. Hogyan? Később azonban, a ritkaföldfém szamárium 15%-át kitevő  $^{147}\text{Sm} \rightarrow ^{143}\text{Nd}$  100 milliárd éves felezési idejű  $\alpha$ -bomlásának felfedezése után a két ritkaföldfém-izotóp arányát használta, és ezt használják mindmáig a kéreg kormeghatározására. Vajon miért?

(Az összes feladat és megoldás megtalálható a <http://www.eszi.hu/Szilard/Orszagos/OrszTJ.htm> honlapon.)

#### Irodalom

CSAPÓ B. (szerk.): *Az iskolai tudás* – Osiris, Budapest, 2002.

NAHALKA I., POÓR I., RADNÓTI K., WAGNER É.: *A fizikatanítás pedagógiája* – Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 2002.

VENCZEL J., KOPCSA J., CSAJÁGI S., SÜKÖSD Cs. (szerk.): *Országos Szilárd Leó Fizikaverseny 1998–2005* – Szilárd Leó Tehetséggondozó Alapítvány, Paks, 2005.

<http://www.eszi.hu/Szilard/Orszagos/OrszTJ.htm>

## A 2006/2007. TANÉVI ORSZÁGOS SZILÁRD LEÓ FIZIKAVERSENY MEGHIRDETÉSE

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, a Szilárd Leó Tehetséggondozó Alapítvány és a paksi Energetikai Szakközépiskola és Kollégium a 2006/2007. tanévre meghirdeti az Országos Szilárd Leó fizikaversenyt az általános és a középiskolák tanulói számára.

A versenyre I. kategóriában a középiskolák 11–12. osztályos tanulói, míg II. kategóriában az általános és a középiskolák 7–10. osztályos tanulói nevezhetnek. A versenyre a hazai és határon túli iskolák nevezését egyaránt várjuk.

*Az iskolák a versenyre 2006. december 15-ig jelentkezhetnek* a [www.szilardverseny.hu](http://www.szilardverseny.hu) honlapon vagy levélben az Eötvös Loránd Fizikai Társulat titkárságán a versenyzők kategóriánkénti létszámának megadásával. (1027 Budapest, Fő u. 68., tel./fax: 1-201-8682).

A verseny kétfordulós. *Az első forduló időpontja 2007. február 26. 14–17 óráig.* A feladatlapokat a javítókulccsal együtt a Versenybizottság az Eötvös Loránd Fizikai Társulaton keresztül küldi meg a benevező iskoláknak a jelentkezések számának megfelelően. Az 1. forduló írásbeli dolgozatainak megírására a versenyre jelentkező iskolákban kerül sor, melynek időtartama 3 óra. A versenyzők minden szokásos segédeszközt (füzetek, köny-

vek és zsebszámológépek) használhatnak. Az első forduló dolgozatait a szaktanárok javítják és legkésőbb 2007. március 3-án postázzák a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Nukleáris Technikai Intézete (1521 Budapest, Műegyetem rkp. 9.) címére. A versenybizottság a beküldött dolgozatokat ellenőrzi, majd az első forduló eredményéről az értesítést legkésőbb 2007. március 30-ig postázza a döntőbe jutott tanulók iskoláinak.

A versenybizottság a II. fordulóra az I. kategóriából maximum 20 tanulót, míg a II. kategóriából maximum 10 tanulót hív be.

*A 2. forduló 2007. április 27. és 30. között kerül megrendezésre az Energetikai Szakközépiskola és Kollégiumban, Pakson.* A 2. fordulóban a tanulók elméleti, mérési és számítógépes feladatokat oldanak meg. A versenyzők és kísérőtanárok szállásköltségét a szervezők fedezik.

#### A verseny ismeretanyaga

A verseny a középiskolás tananyag modern fizikai – első-sorban magfizikai-sugárvédelmi – fejezeteinek alkalmazás szintű tudását és környezetvédelmi alapismereteket kér számon. A kijelölt témakörök a következők:

A mikrorészecskék leírásának alapjai, az anyag kettős természete.

A hőmérsékleti sugárzás törvényei, fotonok, fényelektromos jelenség, Compton-jelenség.

A De Broglie-összefüggés, elektronok interferenciája.

A Heisenberg-féle határozatlansági összefüggés.

A hidrogénatom hullámmodellje.

A kvantumszámok szemléletes jelentése: 's', 'p', és 'd' állapotok.

Az elemek periódusos rendszerének atomszerkezeti magyarázata.

Az atommag és szerkezete: proton, neutron. Rendszám és tömegszám. Magerők és kötési energia. Radioaktivitás: felezési idő, gamma-, béta- és alfabomlás.

Maghasadás, neutron-láncreakció. Atombomba. Atomreaktor, atomerőmű. Az atomenergia felhasználásának lehetőségei, szükségessége és kockázata. Sugárvédelmi alapismeretek. Magfúzió, a Nap energiatermelése.

Hevesy György (radioaktív nyomjelzés), Szilárd Leó, Wigner Jenő (atomreaktor) munkássága.

A részecskegyorsítók működési elvei.

Környezetvédelmi alapismeretek: például CO<sub>2</sub> és az üvegházhatás, ózonlyuk, radonprobléma, radioaktív hulladék elhelyezése.

A felkészülésre javasolt segédanyagok

Az Országos Szilárd Leó Fizikaverseny feladatai és megoldásai 1998–2004

Marx György: Atommagközelben

Marx György: Életrevaló atomok

Marx György: Atomközéleben

Radnóti Katalin, szerk.: Így oldunk meg atomfizikai feladatokat

Radnóti Katalin, szerk.: Modern Fizika CD

Az eredmények közzétételének módja

Az egyes fordulók feladatai és eredményei megtekinthetők a [www.szilardverseny.hu](http://www.szilardverseny.hu) honlapon.

Díjazás

Az országos döntőbe jutott tanulók könyvjutalomban részesülnek. A kategóriák 1–3. helyezetteit a Szilárd Leó Tehetséggondozó Alapítvány egyszeri ösztöndíjban részesíti.

A szervezők elérhetősége

A versenybizottság vezetője: *Sükösd Csaba* tanszékvezető egyetemi docens, BME Nukleáris Technika Tanszék. 1521 Budapest, Műegyetem rkp. 9., tel.: 1-463-2523, fax: 1-463-1954, e-mail: [sukosd@reak.bme.hu](mailto:sukosd@reak.bme.hu).

A verseny felelőse *Csajági Sándor*, az Energetikai Szakközépiskola és Kollégium tanára, 7030 Paks, Dózsa György u. 95., tel.: 75/519-326, fax: 75/414-282, e-mail: [csajagi@eszi.hu](mailto:csajagi@eszi.hu).

*Eötvös Loránd Fizikai Társulat  
Energetikai Szakközépiskola és Kollégium  
Szilárd Leó Tehetséggondozó Alapítvány*

## KÖNYVESPOLC

# Staar Gyula: FIZIKUSOK AZ ARANYKORBÓL

– beszélgetések

Vince Kiadó, Budapest, 2006. 425 old.

*Staar Gyula*, a *Természet Világa* főszerkesztője – képzettségét tekintve matematika-fizika szakos középiskolai tanár – új kötettel jelentkezett, most a 20. századi fizikusok közül mutat be 15 kiváló személyiséget. Két nem magyar van köztük, a Nobel-díjas *P.A.M. Dirac* és *C. Rubbia*. A magyarok között vannak, akik itthon éltek, és itthon végezték-végzik tudományos alkotó vagy nevelő munkájukat. *Simonyi Károly*, *Kovács István*, *Vermes Miklós*, *Kunfalvi Rezső* és *Gyarmati István* sajnos, már nincsenek köztünk. *Nagy Károly* és *Kroó Norbert* képviselik az itthon élőket. *Bay Zoltán* és *Balázs Nándor* külföldön élt-alkotott, már elhunyt személyiségek, *Gábos Zoltán*, *Csonka Pál* és *Toró Tibor* pedig gyakran hazalátogató, külhonban élő kollégák. Mint a Szerző írja: „az első és utolsó fizikusinterjú között csak

nem harminc év telt el. Eddigi tudományos újságírói tevékenységem csaknem teljes időszaka”.

Az a harminc esztendő természetesen nemcsak a Szerző életének jelentős korszaka, hanem a modern magyar történelemnek is fontos periódusa. A kötet egy különleges színfoltját adja annak bemutatása, hogy ebben a lényeges időszakban a beszélgető partnerek országunk életében – és nemcsak a tudományos életben – milyen szerepet játszottak. *Staar Gyula* legutóbb már megmutatta a *Matematikusok és teremtett világuk* című, 2002-ben megjelent interjúkötetben, hogy érdekesen képes láttatni egy széles tudománykör belső világát. Ez a mesterfogás most is látszik. Miközben a szakmai élet magyar és külföldi kiválóságait bemutatja, olyan kérdésekre is rávilágít, melyek nemcsak a fizikus élet szempontjából fontosak. Ez teszi

különösen érdekessé a Staar-köteteket. Ezekben sikerül megmutatnia, hogy nemcsak az imádott szakma a fontos, nemcsak ez tükröződik a portrékból, hanem a hús-vér egyéniségek is, akik az életükről és persze szakmájuk szerepéről vallanak. Bizonyára több, mint ez a tizenöt fizikusportré van Staar Gyula tarsolyában. A válogatást az vezethette, hogy a megszólaltatott személyiségeknek van speciális mondanivalójuk, üzenetük a 21. század magyar olvasóihoz, még a szűkebb szakmán kívüliekhez is.

A fizikus-kötetben szereplő első „nagy öreg” P.A.M. Dirac, akivel a szerző 1977-ben beszélgetett egy szokatlan témáról, a gravitációs állandó nagyságának időbeli változásáról. Ez a szokatlan hipotézis Dirac máig aktuális útke-reső gondolata. A második interjú az akkor 90 éves *Tisza László*t mutatja be. (Tisza László ma is él és alkot teljes szellemi erővel.) Kutatásai nemcsak a szuperfolyékonyság, hanem a fizika alapjainak (filozófiai) elemzésére is irányulnak. A harmadik interjú Bay Zoltánt mutatja be *Fénnyel szőtt halbatatlanság* címen és a holdradarozásra koncentráll. Ezt követi Kovács István, az „Intézet” (a KFKI) alapító egyéniségének interjúja, ami a mai magyar fizika egyik fellegetvárának alapításával kapcsolatos emlékeket idézi fel. Simonyi Károly 1986-os beszélgetése a következő tétel, most Simonyi Károly a fiatalokáról is beszél, ami mintha az eddigi Staar-kötetektől eddig kimaradt volna. Azután „az örökéző Vermes Miklós” személyiségét, életútját ismerhetjük meg. Az interjú a pedagóguspálya sajátos dicshimnusz. Utána egy másik tanáregyéniség, Kunfalvi Rezső elevenedik meg. Megtudjuk, hogy Vermes és Kunfalvi milyen úton haladtak, hogyan vitték el a fizikai diákolimpia felé a fiatalokat, hogyan nevelték növendékeiket.

A Gábos Zoltánt, kolozsvári kollégánkat, bemutató írásból nemcsak a személyiséget, megtett útját, hanem a kolozsvári egyetem különös történetét is megismerhetjük. A következő interjúban Toró Tibor sem csak a fizikus szerepében tűnik fel, hanem a romániai magyarság tevékeny képviselőjeként is.

Carlo Rubbia a következő beszélgetőpartner. Az interjú egy érdekes beállítottságú – a szó nemes értelmében – „megszállott” bemutatásával tűnik ki a többi közül. A néhai Gyarmati Istvánnal készült interjú az irreverzibilis termodinamika nemegyensúlyi viszonyokra való általánosításának kidolgozóját mint a magyar kultúra átalakulásának egyik úttörőjét is bemutatja. Balázs Nándor a vele folytatott beszélgetésben kitér nagy mértékűre, *Einsteinre*, *Schrödingerre* és a tudományos munka személyes műhelytitkaira is. Csonka Pál mutatkozik be a következő interjúban. Az '56-ot követő események, az emigráció, a tanulás, a fizikusi pálya a tárgya a beszélgetésnek. *Ember az erőterekben* cím vezeti be a beszélgetést Nagy Károllyal. Bemutatja az indulás, a pályaválasztás, a tudományos munka körülményeit, a korszerű kutatásba való bekapcsolódás erőfeszítéseit, a vezető pozíció kanyargós útjait, az ELTE rektoraként végzett munka epizódjait, a fizikusi és tanári pálya élményeit, gondjait. Az utolsó beszélgetés a *Tudományunk nagykövete: Kroó Norbert* címet viseli, és a tudóskarrier mellett az MTA fontos tisztségviselője életútját és főbb szerepeit mutatja be.

Valamennyi interjú sajátos szerzői vallomás vezeti be dőlt betűs szedéssel. Ezúton árulja el a Szerző, milyen különös kapcsolata volt az interjúalanyokkal. Az interjúk, mint mondtuk, olykor több évtizeddel ezelőtt készültek. S mint a Szerző e sorok írójának egyszer említette, az interjúk magnófelvételei olykor sokkal hosszabbak, többet tartalmaznak, mint ami éppen belefér egy célszerű konkrét interjúba. Ezért időnként más részletek is felelevenedhetnek, a szunnyadásból feléledve szerephez juthatnak.

Gratulálunk a Szerzőnek a tizenöt fizikus pályaképehez és megformált üzenetükhöz a 21. századi olvasó számára. Köszönet illeti a kötet kiadásán munkálkodó kiadói gárdát is.

*Abonyi Iván*

## PÁLYÁZATOK

### ÁLLÁSÁJÁNLAT

A Magyar Tudományos Akadémia Rézecske- és Magfizikai Kutató Intézete pályázatot hirdet tudományos kutatói állás betöltésére.

**Követelmény:** Fizikusi, elektromérnöki vagy gépész-mérnöki egyetemi diploma.

**Feladat:** Részvétel lézerfizikai, hullám- és kvantumoptikai, extra mély hőmérsékletű atomokkal végzett kísérletekben beosztott kutatóként.

**Javadalmazás:** A közalkalmazotti bérezés szabályai szerint. Kezdő kutató esetén PhD-fokozat megszerzését az intézet támogatja. A pályázat elbírálása folyamatos a nyertes kiválasztásáig.

A pályázatnak tartalmaznia kell:

- az egyetemi diploma másolatát,
- az egyetemi leckeönyv másolatát,
- rövid tudományos önéletrajzot,
- eddigi szakmai pályafutása során elért, említésre méltó eredményeit és
- esetleges ajánlóleveleit.

Írásbeli pályázatokat a következő címre lehet benyújtani:

*Dr. Sörlei Zsuzsa*

tudományos főmunkatárs

MTA KFKI Rézecske- és Magfizikai Kutató Intézet,  
(Konkoly Thege út 29/33) 1525 Budapest, Pf. 49.

e-mail: sorlei@rmki.kfki.hu



## HÍREK A NAGYVILÁGBÓL

## Alvin M. Weinberg, 1915–2006

2006. október 19-én 91 éves korában Oak Ridge-i otthonában elhunyt *Alvin M. Weinberg*, az atomenergetika kiemelkedő tudósa, az atomreaktorok és atomerőművek világhírű szakértője.

Weinberg Chicagóban született és tanulmányait is ebben a városban végezte. A chicagói egyetemen szerzett doktori fokozatot 1939-ben a matematikai biológia témaköréből. 1941-ben csatlakozott *Wigner* asszisztenseként ahhoz a *Wigner Jenő* vezette kutatócsoporthoz, amelyik egyebek között létrehozta a világ első atomreaktorát. *Wigner* mellett szoros kapcsolatba került az atommagfizika több kiemelkedő kutatójával, így *Enrico Fermi*vel és *Szilárd Leó*val is.

A háború után 1945-ben Oak Ridge-be költözött és az akkor még Clinton Laboratóriumnak nevezett létesítményben kezdett dolgozni. Kiemelkedő képességei miatt gyorsan haladt előre a ranglétrán. 1946-ban a Laboratórium Fizikai Osztályának igazgatója lett, 1948-ban pedig a Oak Ridge Nemzeti Laboratórium (ORNL) kutatási igazgatójává nevezték ki. 1955-ben lett az ORNL igazgatója, és ezt a pozíciót 18 éven át töltötte be.

1958-ban jelent meg *Wigner Jenő*vel közösen írt monumentális műve, *A neutronos láncreaktorok fizikai elmélete*, amely a szakterület egyik alapvető művévé vált.

1959-ben választották meg az Amerikai Nukleáris Társaság elnökének, 1960-tól pedig az elnök tudományos tanácsadó testületének tagja lett. Tagja volt az Egyesült Államok Nemzeti Tudományos Akadémiájának, a Nemzeti Mérnök Akadémiának, az Amerikai Művészeti és Tudományos Akadémiának, az Amerikai Filozófiai Társaságnak, valamint külföldi tagja a Holland Királyi Tudományos Akadémiának. Pályafutása alatt egyik vezető szöszlője volt az atomenergia alkalmazásának. Rendkívüli módon foglalkoztatta a reaktorbiztonság kérdése, ami miatt szem-

bekerült az atomenergia alkalmazásának egyes akkori haszonélvezőivel. Ez vezetett ahhoz, hogy 1972-ben távoznia kellett az Oak Ridge Nemzeti Laboratórium éléről. Ez azonban nem befolyásolta elkötelezettségét.

1974-ben az USA Energiakutatási és Fejlesztési Iroda igazgatójává nevezték ki, megalapította az Oak Ridge Társ egyetemek (Oak Ridge Associated Universities, ORAU) Energiaelemző Intézetét, és annak igazgatója lett 1975-ben.

Tudományos pályafutása alatt végig szoros kapcsolatot tartott *Wigner Jenő*vel, *Teller Edé*vel, *Szilárd Leó*val és *Neumann Jánossal*. Erről több cikkben is beszámolt, amelyek magyar nyelven is elérhetőek.

Megemlékezésékképpen érdemes szó szerint idézni lát-noki szavait: „Manapság az atomenergia a világ sok részén rossz napokat él át. Mi, a nukleáris közösség, gyakran a környezetvédő aktivistákat és a kormányzat hivatalnokait vagyunk hajlamosak vádolni az események ilyen fordulatáért. Én azt gondolom, mi is vétkesek vagyunk. Reaktoraink közül néhány tervezési hibáktól terhelt, gondoljunk például a csernobili reaktor pozitív üregetényezőjére, a Three Mile Island-i reaktor kétértelmű vízszintjelzőjére. Szeretném *John Wheeler* szavait e helyzetre alkalmazni: »Az atomenergia újjászületéséhez a nukleáris közösség szigorú és aprólékos figyelmére van szükség a minőségi és biztonsági követelmények tekintetében, és arra az intellektuális felelősségérzetre, amely az atommérnöki szakma megalapítóját, *Wigner Jenő*t jellemezte.«.

Alvin M. Weinberg írásai a *Fizikai Szemlé*ben

*Az új nukleáris korszak* – 40 (1990) 65

*A magyar maffia Chicagóban* – 40 (1990) 93

*Atomenergia – magyar találmány?* 42 (1992) 413

*Wigner Jenő, az első nukleáris mérnök* – 45 (1995) 191, 52 (2002) 313

*A német uránprogram* – 50 (2000) 354 (*Hans Bethé*vel)

## Antiprotonok a daganatos betegségek sugárterápiájában

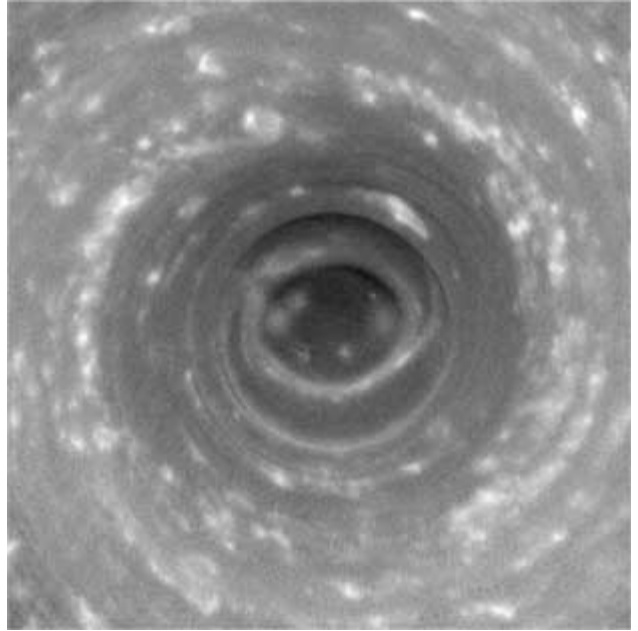
A genfi melletti CERN-ben úttörő kísérleteket végeznek, amelyek eredményei fontos alkalmazásra találhatnak a daganatos betegségek sugárterápiájában. Az ACE (Anti-proton Cell Experiment) kísérleteket 2003-ban kezdték el, és azt vizsgálták, hogyan viselkednek a sejtek anti-proton-besugárzás hatására. Az első eredmények szerint az antiprotonok a protonoknál négyszer hatékonyabban az élő sejtek megsemmisítésében. A jelenleg használatos sugárterápiában a daganatos sejteket protonokkal pusztítják el a beteg szervezetében. Antiprotonokkal való besugárzás esetén tehát negyedannyi bombázó részecskére van szükség, ami jelentősen csökkenti az egész-

séges sejtek elpusztításának veszélyét. Az eddigi kísérletekben a besugárzott sejtek 2 cm mélyen voltak a testszöveteket helyettesítő anyagban, de a kutatók a további kísérletekben a mélységet 15 cm-re növelik. A darmstadti GSI (Gesellschaft für Schwerionenforschung) intézetben további tesztek terveznek, amelyekben az antiprotonok hatását más bombázó részecskék, például szénionok hatásával vetik össze, valamint részletesen megvizsgálják az antiproton-besugárzás hatékonyságát a rákos daganatok terápiájában. A kísérletekben dán, svájci, holland, szerb-montenegrói és kanadai kutatók vesznek részt. (www.cern.ch)

## Hurrikán a Szaturnuszon?

A Földön észlelt legpusztítóbb hurrikánok, a Katrina és az Andrew, semmiségnek tűnnek a Szaturnusz déli pólusán novemberben megfigyelt vihar erejéhez és méretéhez képest. A Cassini űrszonda videoképeket küldött egy 8000 km átmérőjű (a Föld átmérőjének kétharmada!) forgó monstrumról, amelyben 500 km/óra a forgószelel sebessége. (A Katrina és az Andrew esetén ez nem haladta meg a 250 km/órát.) A jelenséget tanulmányozó tudósok szerint azonban a földi hurrikánokkal való hasonlóság inkább csak vizuális, a Szaturnuszon felfedezett vihar nem úgy „működik”, mint egy hurrikán. Például, a vihar egy helyben marad a Szaturnusz déli pólusa fölött, ellentétben a földi hurrikánokkal. A kialakulása is misztikus, hiszen a földi hurrikánok kialakulásában fontos szerepe van az óceán fölött áramló meleg levegőnek, míg a Szaturnusz olyan, mint egy gázgömb, nincsenek rajta óceánok.

A Cassini egyik kamerája azonban azt mutatja, hogy a viharnak a földi trópusi viharokéhoz hasonló „szeme” van. Ilyen jelenséget még egyetlen bolygón sem láttak, például a Jupiteren dúló hatalmas viharnak, a „nagy vörös foltnak” sincs „szeme”.  
(Florida Today)



## Tényleg létezik a sötét anyag

Két óriási galaxishalmaz ütközésének részletes tanulmányozása alapján egyes csillagászok azt állítják, hogy bizonyítékot találtak a sötét anyag létezésére. A kutatók évtizedek óta feltételezték, hogy az Univerzum nagy része a szinte megfigyelhetetlen sötét anyagból és sötét energiából tevődik össze. A legújabb eredmény feltehe-

tően nagy vitát fog kiváltani a fizikusok és kozmológusok körében. Az eredményről *D. Clowe* és társai *A direct empirical proof of the existence of dark matter* című cikkükben, az *Astrophysical Journal* 2006. szeptember 10-i számában számoltak be.

(www.americanscientist.org)

## A világ legjobb rádiótávcsöveit a bezárás fenyegeti

A világ két legismertebb rádióteleszkóp-obszervatóriuma, a 305 méteres antennájú Arecibo teleszkóp Puerto Ricóban, valamint a VLBA (Very Large Baseline Array) rádiótávcső-elrendezés komoly veszélyben van. Az amerikai National Science Foundation (NSF) növekvő költségvetése ellenére úgy látja, hogy nem képes tovább működtetni a két berendezést, miközben új, korszerű távcsövek építését is tervezi. Az NSF felkért egy vezető csillagászból álló bizottságot, hogy tegyenek javaslatot az éves működési költségek 30 millió dollárral való csökkentésére. A bizottság azt javasolta, hogy az NSF 2011-ig szüntesse be az Arecibo obszervatórium és a VLBA működtetését, amennyiben más szervezetek nem vállalnak részt a 8, illetve 10 millió dolláros éves működési költségekből.

Az Arecibo berendezés 1963 óta működik a Cornell Egyetem felügyelete alatt, az NSF pénzügyi támogatásával. 1970-ben és 1997-ben korszerűsítették, a világ legérzékenyebb rádiótávcsöve. Óriási antennája a térben rögzített helyzetű, de a Föld forgása, valamint a tányérantenna felett elhelyezett vevőberendezés mozgása révén az égbolt

40%-át képes megfigyelni. Olyan felfedezések fűződnek hozzá, mint annak megállapítása, hogy a Merkúr forgási sebessége az addig gondolt 88 nap helyett csak 59 nap, vagy az első meggyőző bizonyítékok a neutroncsillagok létezésére. *R.A. Hulse* és *J.H. Taylor* itt figyelték meg az első bináris pulzárt (PSR B1913+16), eredményüket 1993-ban Nobel-díj jutalmazta. Itt sikerült először közvetlenül megfigyelni egy aszteroidát (4769 Castalia).

A VLBA elnevezés egy 10 különálló, 25 méteres antennával rendelkező rádiótávcsőből álló rendszert takar, amely több mint 8000 km hosszan nyúlik el Hawaaitól egészen a karibi Virgin-szigetekig, 1993-ban helyezték üzembe, és a rádiócsillagászati megfigyelések egyik legkiválóbb eszköze. Segítségével olyan különleges objektumokat figyeltek meg, mint gravitációs lencse (CLASS B0128+437 rendszer), egy óriási tömegű (a Nap tömegének 10 milliószorosa) fekete lyuk az NGC 1068 galaxisban.

A rádiócsillagászok szerint a két berendezés bezárása pótolhatatlan veszteséget jelentene a tudomány számára.  
(www.newscientistspace.com)

## Tűz hírek a kínai fúziós kísérletekről

Amikor a kínai Xinhua hírügynökség szeptember 29-én bejelentette, hogy egy vadonatúj reaktorban kínai kutatóknak sikerült termonukleáris reakciót beindítani, a hír bejárta a világot. „A kísérlet során deutérium és trícium atomokat sikerült 100 millió °C-on összepréselni” jelentette a Xinhua. *Jiangang Li*, az Anshi tartomány Hefei városában működő Plazmafizikai Intézet igazgatója a *New Scientist* riportérének kérdéseire válaszolva kijelentette, hogy a híradá-

sok tévesek voltak. Valójában az történt, hogy a kínai kutatóknak először sikerült ionizált hidrogénplazmát injektálni az EAST (Experimental Advanced Superconducting Tokamak) berendezésbe, amely mágneses térrel tartja együtt a plazmát. A forró plazma 3 s-on át 250 000 A áramerősséget produkált. Nem kíséreltek azonban meg sem deutériumot, sem pedig tríciumot injektálni a berendezésbe.

(www.newscientist.com)

## Egyszerűbb leképezés egyetlen pixeles kamerával

A kutatók szerint az egyetlen pixelből álló kamera, amely mikrotükrök rendszerével teljes képet ad, kevesebb energiát fogyaszt, és sokkal kisebb méretű képfájlokat eredményez. A hagyományos digitális kamera a fényt fényérzékelő elemek egy négyzetes elrendezésére, pixelekre fókuszálja. A texasi Rice University kutatói, *Richard Baraniuk* és *Kevin Kelly* által feltalált egyetlen pixeles kamera teljesen más elven működik. Egy 1024×768-as mikrotükrök-elrendezésről a fényt egyetlen fotodiódára képezi le. Azután megváltoztatja a tükrök elrendezését, és a folyamatot megismétli. Mindezt a másodperc tört része alatt. A kamera minden tükröt véletlenszerűen kapcsolgat két állapot között, azaz vagy küldenek fényt a pixelre vagy nem. A jelenlegi változatnál a folyamat másodpercenként 1000-szer ismétlődik, közben a tükrrendszer és a szenzor állapota rögzítésre kerül. A hozzákapcsolt számítógéprend-

szert a rögzített adatokból a teljes képet vissza tudja állítani. A másodpercenkénti ezer felvételt néhány perccig analizálva olyan kép nyerhető, amely minőségét tekintve megfelel egy megapixel-es kamera által felvett képnek. A berendezés előnyeihez tartozik, hogy a felvétel külső feldolgozása csökkenti az energiafogyasztást és tömörebb képfájlokat eredményez. A fő előny azonban az, hogy az egyetlen elemből álló, infravörös, ultrabolya vagy terahertzes tartományban működő szenzorok jóval olcsóbbak, mint a multipixel-es elrendezések, így például az éjjel-látó berendezések is jóval olcsóbbak lesznek. Kelly szerint az egy pixeles kamera jelentősen fel fogja gyorsítani a különböző képfelismerő feladatok elvégzését is. Az új berendezést a feltalálók nagy érdeklődés közepette október 10-én New Yorkban, a *Frontiers in Optics* konferencián ismertették.

(www.newscientist.com)

## Japán csatlakozik a röntgenlézer-építési versenyhez

A szabad elektron röntgenlézerek sokkal nagyobb energiájú, nagyobb intenzitású és rövidebb impulzusú röntgensugárnyalókat képesek létrehozni, mint az általánosan használt szinkrotron-röntgensugárforrások. Ezek a „kemény” röntgensugarak – a hullámhosszuk a 100 nanométer tartományba esik – a fehérjék szerkezetének vizsgálatára is alkalmasak, amit eddig más technikával nem lehetett megvalósítani. A mintegy 100 femtoszekundumos vagy annál rövidebb időtartamú impulzusok stroboszkópszerűen működnek, és képesek „filmet” készíteni

a molekuláris kötések létrejöttének vagy felbomlásának dinamikájáról kémiai reakciókban. Az asztrofizikusok pedig kísérleteket végezhetnek a szinkrotron-sugárforrásoknál tízmilliárdszor nagyobb intenzitású röntgensugarakkal az anyag olyan különleges állapotának a létrehozására, amely az elképzelések szerint eddig csak a születő csillagokban létezett. Az Egyesült Államokban és Európában már készülnek ilyen berendezések, és most Japán is lépéseket tett, hogy részt vegyen a versenyben.

(www.science.org)

## Nem növekszik tovább az ózonlyuk

Vezető amerikai tudósok szerint az Antarktisz feletti ózonlyuk növekedése megállt. A lyuk 2005-ben volt a legnagyobb, azóta nem növekszik tovább. Az ózonlyuk létezését 1986-ban fedezték fel, majd utána a Montreáli Egyezményben 1987-ben betiltották az ózonréteget károsító kloro-fluoro-karbon (CFC) tartalmú vegyületek használatát. A kutatók reményei szerint az ózonlyuk a következő 60 év

folyamán teljesen „be fog gyógyulni”. Az Egyesült Államok Nemzeti Óceán és Atmoszféra Hivatala (NOAA) szerint a javulás a CFC-vegyületek használata betiltásának köszönhető. Mindazonáltal a CFC-vegyületeket helyettesítő vegyi anyagok sem egyértelműen jótékony hatásúak, egyesek szerint nagymértékben hozzájárulnak a globális felmelegedéshez.

(www.nature.com)

## „A tudomány (ismét) színre lép(ett)”

Európa nagy tudományos kutatóintézetei és laboratóriumi, az Európai Űrügynökség, az Európai Déli Observatórium, a CERN, az Európai Molekuláris Biológiai Laboratórium, az Európai Fúziós Fejlesztési Együttműködés, az Európai Szinkrotronsugárzási Laboratórium és a Laue–Langevin Intézet 2007 áprilisában ismét megrendezik a Tudomány és Technológia Hetét.

Ennek fontos része a természettudomány népszerűsítése érdekében megrendezendő *Science on Stage 2* konferencia Grenoble-ban, az Európai Molekuláris Biológiai Laboratóriumban. Az ott bemutatott kísérletek, színdarabok, számítógépes játékok és más érdekes események szerepet játszhatnak majd abban, hogy a természettudományok népszerűsége növekedjék.

A magyar szervezőbizottság három *A fizika színre lép* konferencia után Székesfehérváron, szeptember 30-án, másodszer rendezte meg *A tudomány színre lép* című kísérletbemutatót és ötletvásárt, amelynek fontos célja volt a magyar színeket a *Science on Stage 2* konferencián képviselő kollégák kiválasztása.

Az ország legjobb, természettudományt tanító tanárai közül tizenhatan jöttek el Székesfehérvárra, és mutattak be kísérleteket, új tanítási módszereket. A zsűri tagjai voltak: *Sükösd Csaba* elnök, *Theisz György* és *Ujvári Sándor* tagok. A zsűrinek a bemutatott produkciókon kívül figyelembe kellett vennie a Nemzetközi Szervezőbizottság (*International Steering Committee*) által megadott határfeltételeket is: a delegáció tíz résztvevője közül legfeljebb öt képviselheti a fizikát (hiszen most nem egyedül a fizika, hanem a „tudomány” a főszereplő), és a régebbi résztvevők a csapat egyharmadát tehetik ki.

Kiváló produkciók, bemutatók születtek, amelyek alapján a következő kollégák fogják – az alább felsorolt programjaikkal – Magyarországot képviselni a nemzetközi *Science on Stage* konferencián jövő év tavaszán:

*Czupy Judit* (Sopron, Széchenyi István Gimnázium): Fizika-túra;

*Farkas Zsuzsa* (Szeged, SZTE Juhász Gyula Tanárképző Főiskolai Kar Fizika Tanszék): Jojó mozgása más szemszögből (vagy a jójó forgási stabilitásának vizsgálata) és a love-meter fizikája, avagy a hőtán és a kémia kapcsolata;

*Fodor Erika* (Budapest, ELTE Trefort Ágoston Gyakorló Gimnázium): Mágia? Játék? Felfedezés? Tudomány?

*Jarosievitz Beáta* (Budapest, SEK Nemzetközi Oktatási Központ; Ady Endre Fővárosi Gyakorló Kollégium): Modern fizika – kísérlettel és multimédiával;

*Szentgyörgyi Tímea* (Budapest, SEK Nemzetközi Oktatási Központ): Szépséges kémia;

*Härtlein Károly* (Budapest, BME): Kísérletezzünk;

*Köllő Zoltán* (Budaörs, Illyés Gyula Gimnázium): Kísérletek hulladékból;

*Nyerges Gyula* (Dorog, Zsigmondy Vilmos Gimnázium): Űrkísérletek;

*Roskó Farkas* (Budapest, ELTE): Nagyfeszültségű kísérletek Nikola Tesla nyomán.

Az áprilisi konferenciáig a magyar csapat kialakítja programját, bemutatkozó CD-t készít, és megtervezi a magyar pavilon egységes képét.

Jó munkát, eredményes részvételt kívánunk!

*Theisz György, Ujvári Sándor*

## Átadták az idei Rátz Tanár Úr Életműdíjakat

Október 31-én, az MTA épületének Kupolatermében átadták az idei *Rátz Tanár Úr Életműdíjakat*. Az elismeréseket 2006-ban matematikából *THIRY IMRÉNÉ* (Budapest) és *PINTÉR FERENC* (Nagykanizsa), fizikából *ZSÚDEL LÁSZLÓ* (Miskolc) és *LANG JÁNOSNÉ* (Sopron), biológiából *ÁRENDÁS VERONIKA* (Tata) és *RÉKÁSI JÓZSEF* (Pannonhalma), kémiából pedig *IRLANDA DEZSŐ* (Eger) és *BALÁZS LÓRÁNTNÉ* (Budapest) kapta meg.

Az egymillió forint jutalommal járó elismerést minden évben a középiskolai reálokztatás azon pedagógusai kapják, akik életművükkel, kiemelkedő munkásságukkal elévülhetetlen érdemeket szereztek a hazai természettudományos középiskolai képzés színvonalának emelésében. A díj évről-évre ismertebb, az idén minden korábbiánál több, 123 pályázat érkezett az ország 85 középiskolájából.

A díjat *Rátz Lászlóról* (1863–1930), a Budapesti (Fasori) Evangélikus Gimnázium legendás hírű tanáráról nevezték

el. Személyéhez számtalan tehetség műszaki és tudományos pályára állítása fűződik, éveken át a *Középiskolai Matematikai Lapok* szerkesztője volt, és jelentős részben neki köszönhető a matematikatanítás hazai reformja.

Az alapítók szándéka az évek alatt nem változott. Az *Ericsson Magyarország Kft.*, a *Graphisoft R&D Zrt.* és a *Richter Gedeon Nyrt.* által létrehozott *Alapítvány a Magyar Természettudományos Oktatásért* célja, hogy ösztönözze a hazai képzést, ezen belül támogassa a középiskolák oktatással kapcsolatos személyi feltételeinek kialakítását, és figyelemmel kísérvé az e tevékenységhez köthető változásokat. A díjazottak kiválasztásában a kiváló szaktanári munka mellett a tehetséggutatásban, a hátrányos helyzetű diákok támogatásában, illetve a tan- és szakkönyvszerkesztői, -írói munkában elért siker is szempont volt – mondta az alapítvány kuratóriumának elnöke, *Kroó Norbert* akadémikus, az MTA természettudományi alelnöke.

## A 2006. évi Ericsson-díjasok

Az *Ericsson Magyarország Kft.* Kutatási-fejlesztési Igazgatósága 1999-ben díjat alapított azzal a céllal, hogy hozzájáruljon a magyar természettudományos alapképzés hagyományosan magas színvonalának fenntartásához, illetve emeléséhez. Azok a tanárok részesülhetnek az elismerésben, akiknek tanítványai kiemelkedő teljesítményt értek el valamely jelentős tanulmányi versenyen, vagy akik a legtöbbet tették annak érdekében, hogy tanítványaikkal megismertessék, sőt megszeretessék ezeket a tantárgyakat.

A 2006. évi kitüntetettek november 6-án vehették át a díjakat.

Az *ERICSSON a matematika és fizika tehetségeinek gondozásáért* díjat matematikából

FÁBIÁN ISTVÁNNÉ, a kecskeméti Zrínyi Ilona Általános Iskola tanítója és

FAZAKAS TÜNDE, a budapesti Fazekas Mihály Fővárosi Gyakorló Általános Iskola és Gimnázium tanára kapta.

Az *ERICSSON a matematika és fizika tehetségeinek gondozásáért* díjat fizikából

NAGY TIBOR, a hódmezővásárhelyi Bethlen Gábor Református Gimnázium tanára és

PÁKÓ GYULA, a budapesti ELTE Apáczai Csere János Gyakorló Gimnáziumának tanára kapta.

Az *ERICSSON a matematika és fizika népszerűsítéséért* díjat matematikából

CSORBA FERENC, a győri Krúdy Gyula Gimnázium, Idegenforgalmi Vendéglátóipari Szakközépiskola és Szakiskola tanára,

KÓS GÉZA, a Középszintű Matematika és Fizika Lapok szerkesztőbizottságának tagja, az ELTE TTK adjunktusa,

MINDA MIHÁLY, a váci Boronkay György Műszaki Középszintű Iskola és Gimnázium tanára és

VANCÓS IMRÉNÉ, a gödöllői Premontrei Szent Norbert Gimnázium tanára kapta.

Az *ERICSSON a matematika és fizika népszerűsítéséért* díjat fizikából

JUHÁSZ NÁNDORNÉ, a szegedi Tisza-Parti Általános Iskola tanára,

PÁPAI GYULA, a soproni Vas- és Villamosipari Szakképző Iskola tanára,

HÄRTLEIN KÁROLY, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Fizikai Intézete Demonstrációs Laboratóriumának vezetője és

BERECZ JÁNOS, a hódmezővásárhelyi Bethlen Gábor Református Gimnázium tanára kapta.

## Eötvösnek nincs szerencséje

Az idősebbek biztosan tudják, hogy Budapesten az ELTE Állam- és Jogtudományi Kara mellett volt az *Eötvös Loránd utca*. A rendszerváltás lendülete ezt is elsöpörte, hiába tiltakoztak ELFT-tagok, egyetemi tanárok, akadémikusok. A Fizikai Szemle régebbi olvasói láthatták is a Szemle egy akkori számának hátoldalán az áthúzott utcanévtáblát és alatta a büszke régi-új nevet: *Papnövelde utca*.

Most újabb „trónfosztásról” számolhatok be. Szombathelyen a Berzsenyi Dániel Főiskolát is elérte az intézet-szervezés országos hullámverése. Ennek egy tarajos hullámhegye elsöpörte a Fizika Tanszék nevét és a Mechanika laboratóriumot. A *Matematikai és Információtudományi Intézetbe* integrált tanszék mechanika laboratóriumáról lekerült a 22 éve ott díszelgő *Eötvös Loránd terem* felirat, mert oktatói szobákat alakítottak ki ott. El kellett hozni a bejárat mellől Eötvös 1/2-szekundumos ejtőingájának jól működő, hű mását, funkció nélküli az ajtó melletti falat díszítő Eötvös-kép. Ha elkészül volt hallgatónk, *Barbák Csaba* szobrászművész ide szánt Eötvös-szobra, értetlenül néz majd szembe a matematikus oktatói szobával.

*Kovács László*, BDF Szombathely

## Előadások az Öveges József Gyakorló Középszintű Iskolában

Az Öveges József Gyakorló Középszintű Iskola és Szakiskola (1118 Budapest, Beregszász út 10.) – együttműködve a Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közalapítvánnyal – előadás-sorozatot indít, melyben a nano- és lézertechnológia, a kolloidkémia, a molekuláris biológia, az immunológia, a mikroelektronika, az intelligens szenzorok és alkalmazási területeik legújabb tudományos eredményeit ismertetik a Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közalapítvány vezető kutatói, intézetigazgatói.

Az előadássorozat első előadását *Hajtó János*, a Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közalapítvány főigazgatója tartotta meg november 17-én. A további előadások tervezett témái és előadói:

*Hajtó János* (a Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közalapítvány főigazgatója): A mikroelektronikától a nanoelektronikáig

*Kaptay György* (a Bay Zoltán Közalapítvány Nanotechnológiai Laboratóriumának igazgatója): Nanotechnológiák és ipari alkalmazások

*Szebeni János* (a Bay Zoltán Közalapítvány Nanotechnológiai Laboratóriuma Nanomedicina Osztályának vezetője): Az immunológia legújabb eredményei és orvosi alkalmazásai

*Kálmán Miklós* (a Bay Zoltán Közalapítvány Biotechnológiai Intézetének igazgatója): A molekuláris biológia alkalmazási lehetőségei

*Búza Gábor* (a Bay Zoltán Közalapítvány Anyagtudományi Intézetének igazgatóhelyettese): Lézer technológiák és ipari alkalmazásai

*Lakatosné Varsányi Magda* (Bay Zoltán Közalapítvány, Anyagtudományi Intézet): A kolloidkémia legújabb eredményei és ipari alkalmazásai

*Havancsák Károly* (Bay Zoltán Közalapítvány, Nanotechnológiai Laboratórium): Nanometrológia – a nanoméret standardjai

*Cserfalvi Tamás* (Bay Zoltán Közalapítvány, Anyagtudományi Intézet): Intelligens szenzorok és környezetvédelmi alkalmazásai

*Gordos Géza* (Bay Zoltán Közalapítvány, Ipari Kommunikációs Technológiai Intézet): Mikroprocesszorok és elektronika a mindennapi életünkben

További információ: *Gál Pálné* iskolatitkár, Óveges József Gyakorló Középiskola és Szakiskola, tel.: 246-1578, e-mail: ovesges@ovesges.hu

## A TÁRSULATI ÉLET HÍREI

### Felhívás jelölésre: Mikola Sándor Díj

Az oktatómunka területén elért kiemelkedő eredmények elismeréseként az Eötvös Loránd Fizikai Társulat *Mikola Sándor Díjban* részesíti azt az általános vagy középiskolai tanár tagját, aki a kísérletezésen alapuló iskolai fizikatanításban a korszerű módszerek alkalmazásában, vagy az ilyen tanítást elősegítő tevékenységben kiváló ered-

ményt ért el. A *Mikola Sándor Díj*ből évente legfeljebb kettő osztható ki.

A jelöléseket – megfelelő indoklással – 2006. december 31-ig kérjük az ELFT címére elküldeni!

*Mester András*  
Középiskolai Oktatási Szakcsoport

## MINDENTUDÁS AZ ISKOLÁBAN

### KOZMIKUS INFRAHANG-DIAGNOSZTIKA

Napjainkban már nem csodálkozunk azon, hogy hang segítségével is „láthatunk”. Sok család fényképgyűjteményében megtaláljuk a születés előtt készült magzati felvételeket, sőt, manapság már a videogyűjteményben is ott van a magzati video, amely a születendő gyermek jó minőségű mozgóképét mutatja. A felvételek titka az ultrahang. De nem kell az emberkéz alkotta eszközöket előhozunk, hogy ezt a módszert megtaláljuk: a denevér úgyszintén az ultrahangok segítségével képezi le a környező világot. A denevér számára a látás megfelelője az ultrahangok és speciális füle segítségével jön létre. Aki látott már denevért repülés közben manőverezni és rovarokra vadászni, annak egyértelmű, hogy a repülő emlős az ultrahang radarja segítségével kellő precizitással látja a környező világot (1. ábra).

Egy bizonyos szintig az embereknek is ad térbeli információt a hallás: a hangforrás irányát viszonylag könnyen felismerjük. Képpalkotáshoz viszont a visszaverődött hullámok (akár fény, akár hang) megfelelő felismerésére is szükség van. A „képpalkotásban” az emberi hallás frekvenciatartománya is határt szab: a felbontóképességet a képpalkotó rezgés hullámhossza határozza meg. A levegőben mért hangsebesség mellett az 1000 Hz-es hanghoz tartozó hullámhossz 34 cm, 100 Hz-nél pedig 3,4 m. Nem

véletlen, hogy a házimozik hangrendszere csak egy mélysugárzót tartalmaz: a mély hangok hullámhossza a szoba méretével azonos nagyságrendű, így térbeli információt nem hordozhat. Rögtön érthető, hogy a denevérek szonárja a 20 és 100 kHz közötti tartományban működik. A magas frekvencia szükséges ahhoz, hogy a hullámhossz a pár milliméter–egy centiméter tartományba essen, és a felbontóképesség elegendő legyen ahhoz, hogy a szúnyog a denevér szájában landoljon. Gyorsan rájöhettünk, hogy a magzati ultrahangkészülék nem zavarná a denevérek navigációját: ott még nagyobb frekvenciára van szükség. A testszövetekben a hangsebesség is nagyobb (1500 m/s), így a kellő pontosságú leképezéshez több MHz-es frekvenciára van szükség. (Érdemes megjegyeznünk hogy a frekvenciától függetlenül ezt is ultrahangnak nevezzük!) Túl magas frekvenciát sem szabad alkalmazni, mivel a hullámhossz csökkenésével a hanghullámok egyre hamarabb elnyelődnek, így nem látunk elég mélyre az emberi testben.

A megfigyelendő objektum méretének növekedésével egyre mélyebb hangokat használhatunk. A folyók vagy tengerek mélységét jelző, vagy a tengeralttjárók navigációját segítő szonár már a hallható frekvenciatartományban működik. Filmekben sokszor hallhatjuk a



1. ábra. Éjjeli lepkére vadászó denevér

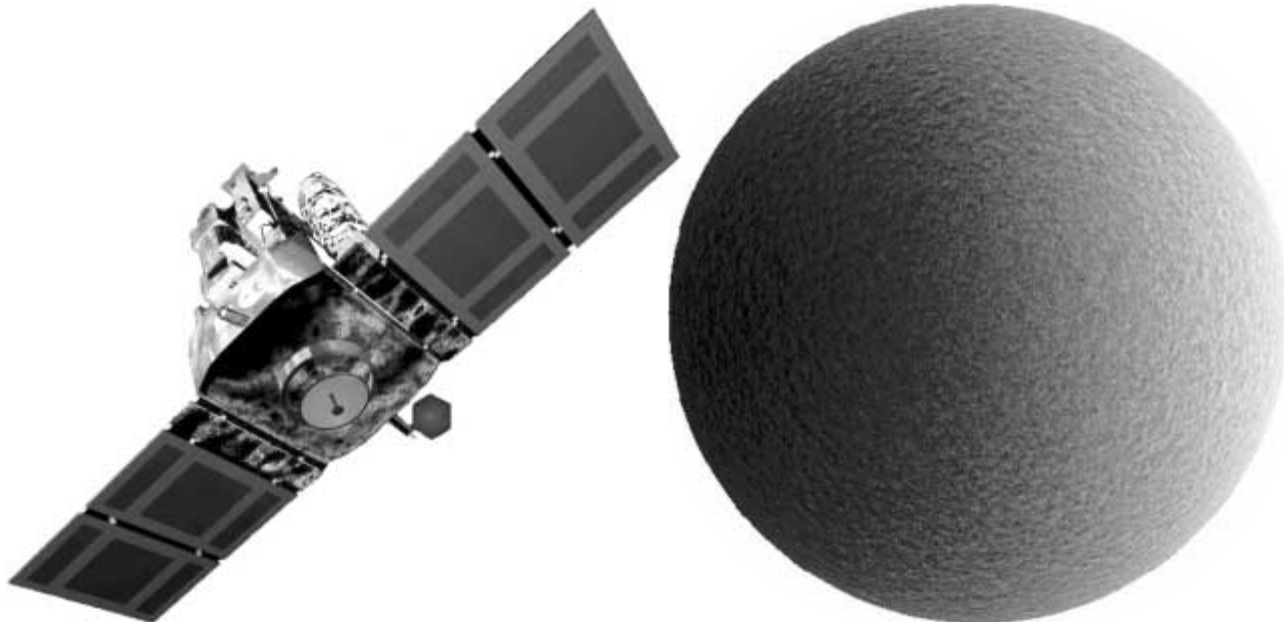
jellegzetes „ping” hangot, ami egy változó frekvenciájú zúgás. Persze az állatvilág itt is megelőzte az embert. A bálnák és a delfinek szonárt is használnak a tájékozódáshoz és „halászathoz”. Felvetődik a kérdés, hogy az infrahangok használhatók-e valamilyen diagnosztikára. (Infrahangnak nevezünk minden hangot, amelynek a frekvenciája 20 Hz alatti, így akár a nanoHz-es tartományt is!) Itt még nagyobb méretek felé kell mennünk. A legkézenfekvőbb válasz a Föld belsejének megismerése a földrengéshullámok segítségével. Ez esetben a rezgések a hallható és a közeli infrahangtartományba esnek. Ha még mélyebb hangokat akarunk találni, akkor távolabb kell mennünk.

A Földet elhagyva vajon használhatunk-e hanghullámokat diagnosztikai célra? Az égitestek közötti (bolygóközi vagy csillagközi) anyag annyira ritka, hogy gyakorlatilag vákuumnak tekinthető, így abban hanghullámok nem terjedhetnek. Az aktív radarról egyébként is le kellene mondani a nagy távolságok miatt, időben és energiában is messze lennének az alkalmazhatóságtól. Persze a hang továbbításának egyéb lehetőségei is vannak: elég csak a rádióra vagy mobiltelefonra gondolnunk, ahol a hangjelben rejlő információt rádióhullámok továbbítják. Ha vezeték hálózaton telefonálunk, jó esély van rá, hogy, legalább részben, optikai kábelben haladó fény segítségével jut hozzánk a hang. Így elegendő lenne egy olyan mechanizmust találni a Világegyetem valamely égitestjében, amely képes a hanghullámok segítségével modulálni az elektromágneses hullámokat. Természetesen ez csak úgy jöhet létre, ha maga a hangot közvetítő anyag elektromágneses hullámokat bocsát ki. A legegyszerűbb példa ilyen közegre a gyertya lángja, amivel egy egyszerű kísérletet is elvégezhetünk: Tegyük egy, esetleg több gyertyát egy hangsugárzó elé (mélysugárzókkal biztos az eredmény): elegendő hangerő mellett (persze környezetünk nyugalomára ügyelve) a gyertya lángja az erősebb hangok hatására megremeg. Mivel a hang hullámhossza nagyobb, mint a gyertyaláng mérete, magáról az áthaladó hullámról nem kapunk teljes információt. A zene ritmusáról, esetleg a mélyebb hangok frekvenciájáról viszont jól láthatóan meggyőződhetünk.

A csillagok fénye azok fotoszférájából érkezik hozzánk. Ez az a tartomány, amely fölött a csillag anyaga már átlátszóvá válik, alatta viszont túlságosan sűrű ahhoz, hogy a fotonok kibocsátásuk után ne ütközzenek azonnal egy újabb részecskével. A fotonok útja a fotoszféráig nagyon kalandos: százezer évekig véletlenszerűen bolyonganak az elindult fotonok és azok elnyelés, újrakibocsátás útján létrejött utódai az energiát termelő magtól kiindulva a csillag belsejében. Gyakorlatilag a fotoszféra alatti teljes gömböt bejárják, míg a fotoszféra hőmérsékletének megfelelő energiaeoszlással végül kiszabadulnak a csillagból. A fotoszféra egy átmeneti tartomány, nagyon vékony a csillag sugarához képest. Ha a csillag belsejében hanghullámok mozognának, akkor ez a réteg hasonlóan viselkedne, mint a hangszóró elé tett gyertya, és a fény ingadozásából legalább a rezgések periódusára következtetni tudnánk.

A természet kegyes volt a csillagászokhoz: ténylegesen léteznek olyan csillagok, amelyekben hanghullámok terjednek. Persze a csillagok fényváltozását lényegesen korábban felismerték, mint annak ezt a hanghullámokhoz kapcsolódó magyarázatát. Egy változócsillag első dokumentált felfedezése *Fabricius* nevéhez fűződik, aki 1596-ban ismerte fel a Mira Ceti fényváltozását. A csillagbelső fizikájának felfedése egyértelműen a 20. század tudománya, de még bőven maradt tennivaló a 21. századra is. A csillagok hanghullámjai nagyon hangosak: a rezgések amplitúdója akkora, hogy a fotoszféra hőmérséklete több száz foknyit ingadozhat egy rezgés alatt. Ez a hőmérséklet-különbség pedig már elegendő ahhoz, hogy az onnan távozó fény energiaeoszlása (amely nagyon jó közelítéssel a feketetest-sugárzásnak megfelelő) jelentősen megváltozzon, ami végső soron a fényintenzitás és kisebb mértékben a szín váltakozásában jelenik meg. A hanghullámok nagy amplitúdója a közönséges hangoknál nem jellemző jelenséget is okoz: a sűrűség intenzív változása miatt a csillag sugara is ingadozik. A csillag méretének változása csak kisebb mértékben jelenik meg a fénygörbében (a teljes kibocsátott energia a sugár négyzetével, míg a hőmérséklet negyedik hatványával arányos), azonban a fotoszféra mozgásából adódó, a megfigyelő irányába mutató sebességkomponens a színképvonalak Doppler-eltolódásából meghatározható. A csillagok esetében belátható, hogy lehetőség van az infrahang-diagnosztikára. Ráadásul a csillagok egy csoportja maga szolgáltatja a hangforrást is. A fotonok terjedésének és az anyag mozgásának kölcsönhatása adja a hangok energiaforrását. A gáz fényáteresztő képessége egyes helyeken éppen az áthaladó hullámok hatására változik. Így eltérő mértékben nyeli el az elektromágneses sugárzást, kedvező esetben hanghullámok kialakulását előidézve.

A csillaghangok megfigyelései legkönnyebben és legpontosabban egy fontos paramétert, a csillagrezgések hangmagasságát szolgáltatják. A csillagok periódusa néhány perctől több évig terjed, így frekvenciában kifejezve a hangmagasság nagyjából 10 nHz és 10 mHz közé esik. A csillaghangtartomány az infrahangok egy széles, zenei kifejezéssel 20 oktávnyi tartományába esik. A fülünk érzékenysége 10 oktávnyi terjedelmet fog át, és a legmagasabb csillaghangok és az ember számára hallható legmélyebb hangok között is körülbelül 10 oktávnyi különbség van.



2. ábra. A SOHO űrszonda és a napkorong sebességtérképe az űrszonda MDI (Michelson Doppler Imager) műszerének felvétele alapján (forrás: SOHO: ESA & NASA). A szürke skála a mért sebességeket mutatja  $-2500$  és  $2000$  m/s értékek között, a fekete a Föld irányába mozgó részeket jelzi.

Miként használhatók a csillagok infrahangjai a csillagok megismerésére, azaz diagnosztikájára? Az elsődleges adat, amire következtethetünk, a csillagok mérete. A csillagok hangjai sok szempontból a sípok hangjaihoz hasonlíthatók. Mindkét esetben állóhullámokkal találkozunk, melyek frekvenciája egyszerűen a hangsebesség és a geometriai méret hányadosával arányos. A csillagoknak megfelelő sípok mindkét oldalukon zártak, a legmélyebb hangjuk esetében éppen egy félhullám fér el bennük. A normál zenei „kis F” hang frekvenciája  $349$  Hz, amelyhez majdnem pontosan egyméteres hullámhossz tartozik, tehát egy félméteres, két végén zárt síppal szólaltatható meg. Tekintsünk egy tipikus csillagot, 4 napos periódussal ( $2,89 \mu\text{Hz}$  frekvencia). Ha normál levegővel töltött síppal szeretnénk ilyen hangot létrehozni, akkor méretének  $60000$  km-nek kellene lennie. Szerencsés esetben egy ilyen csillag egyéb megfigyeléséből (pl. parallaxis) meghatározhatjuk a távolságát. A fényessége és a színe alapján adódó hőmérséklet ismeretében kiszámolhatjuk a tényleges sugarát is (a távolság és a fényesség ismeretében adódik a teljes kibocsátott energia, a hőmérséklet viszont a felületesség által kibocsátott energiát határozza meg). A mérések alapján a csillag sugarára körülbelül  $24$  millió km adódhat ( $35$  napátmérő), lényegesen nagyobb, mint ami a „földi” síp alapján becsült érték. A méret  $400$ -szoros eltérését csak a hangsebesség hasonló arányú eltérése okozhatja.

A csillagok persze lényegesen bonyolultabbak a sípoknál. A felszínükről befelé haladva a hidrosztatikai egyensúly fenntartásához a nyomásnak növekednie kell, így a hangsebesség sem lehet állandó. Valójában a csillagok rezgési periódusait csak akkor használhatjuk fel belsejük megismerésére, ha a csillagszerkezet fizikai modelljeit is felhasználjuk. Megfelelő koordináta-transzformációval olyan feladat fogalmazható meg, amelyben a hangsebesség állandó, és egy közelítéssel akár olyan trombitát is tervezhetünk, amelynek lehetséges hangma-

gasságai a csillagrezgések arányait követik. Sokat segít az, ha egy csillag nem egyetlen hangon sípol, hanem egy „akkordot” szólaltat meg. Ezek az akkordok persze szokatlanok lesznek a fülünknek (ha azokat a hallható tartományba csúsztatjuk), éppen azért, mert a hangsebesség helyfüggése miatt nem az orgonasípokban megszokott hangmagasságarányok lépnek fel. Egy csillag zenéjének frekvenciaarányai annál többet árulnak el a csillag belsejéről, minél több hangot találunk.

A csillagok egy jelentős része ráadásul nemcsak a sípokhoz hasonló, egydimenziós rezgésekre képes (a korábbi esetben csak sugárirányú változások voltak), hanem felszín menti hullámok is fellépnek. A távoli csillagok ilyen hullámainak egy része még kimutatható amplitúdójú fényváltozást produkál, így a Földről is megfigyelhetők. Igazából viszont a legközelebbi csillag, a Nap az, ahol közvetlenül is megfigyelhetők a hanghullámok. A színképvonalak eltolódásából a napkorong minden egyes pontjának sebessége meghatározható.

Az így készült 2. ábrán a domináns szerkezet a Nap forgásából származó aszimmetria. A forgás után fennmaradó szerkezet azonban nagyon fontos információt takar: hasonló felvételek időbeli sorozatából megfelelő matematikai módszerekkel hangrezgések tízezrei azonosíthatók. Ezek a körülbelül  $5$  perces rezgések a Nap szerkezetének hírvivői, a magzati ultrahangvizsgálathoz hasonlóan precíz képet adnak központi égitestünk fényben láthatatlan belsejéről. Többek között a Nap belső differenciális forgását tárták fel ezek a mérések, de a Nap tőlünk nem látható oldalán lévő nagyobb napfoltok is kimutathatók az infrahang-diagnosztika segítségével.

Kolláth Zoltán

MTA KTM Csillagászati Kutatóintézete

További olvasnivalók:

<http://www.mindentudas.hu/kollath>

<http://www.konkoly.hu/staff/kollath/stellarmusic>