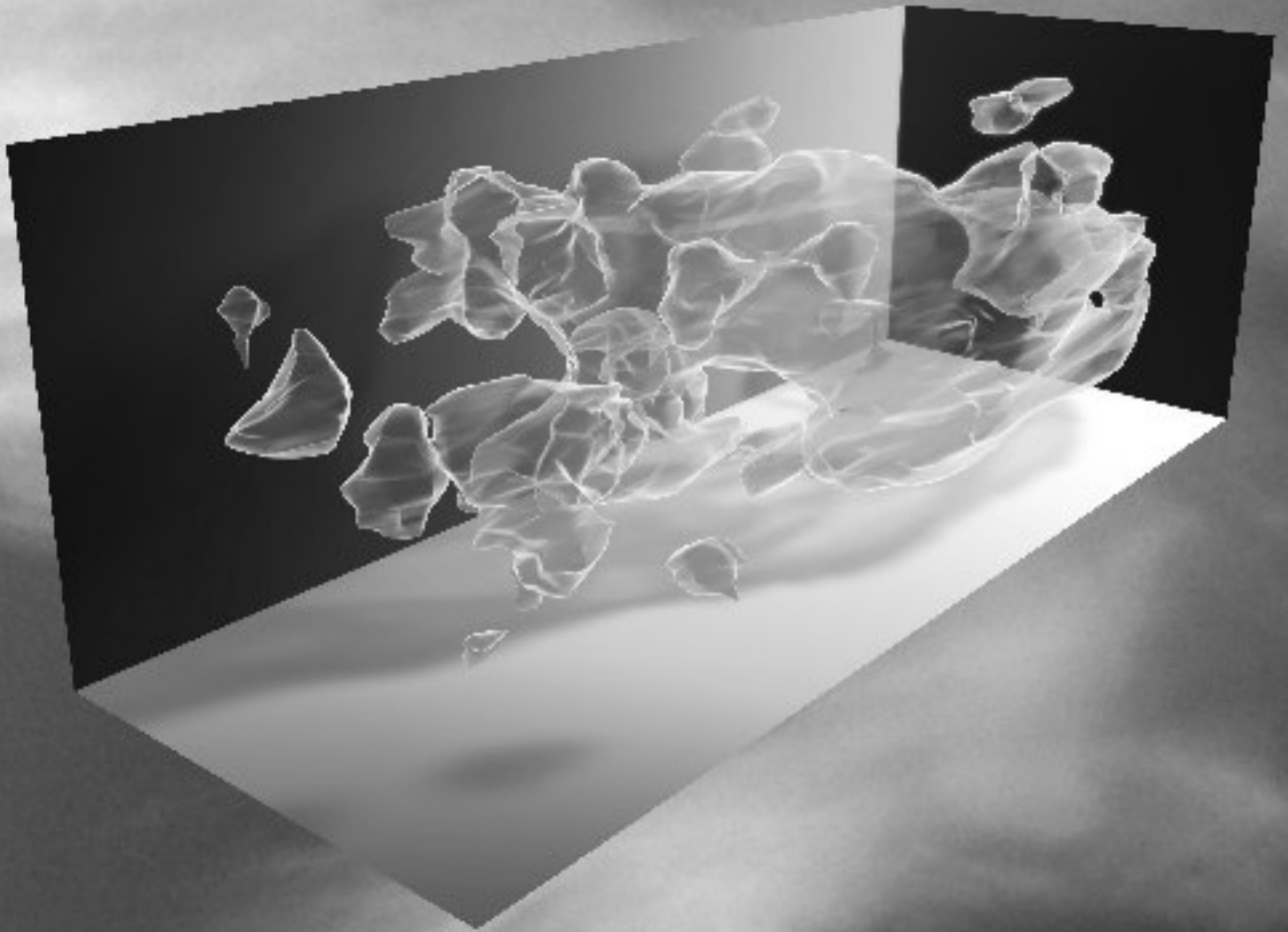


fizikai szemle



2007/12

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,
Czitrowszky 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 Univerzum szerkezetét
megtestesítő sötét anyag első
háromdimenziós képe a COSMOS
(Cosmic Evolution Survey) felmérés
alapján. Az 1,6 négyzetfokot ábrázoló
képet a Hubble-űrtávcsővel,
az Európai Déli Observatórium (ESO)
VLT-távcsővével (Cerro Paranal,
Chile), a japán Subaru-teleszkóppal
(Mauna Kea, Hawaii) és a Kanadai-
Francia-Hawaii-teleszkóppal (Mauna
Kea, Hawaii) végzett mérések alapján
állította össze egy 70 csillagászból álló
nemzetközi kutatócsoport.
A felmérés szerint a főként galaxisok
formájában jelen lévő látható anyag
a sötét anyag legsűrűbb csomósódásai
mentén található.

TARTALOM

<i>Csabai István, Purger Norbert, Dobos László, Szalay Sándor, Budavári Tamás:</i> Az Univerzum szerkezete	385
<i>Tóth L. Viktor:</i> Szél hozott, szél visz el	392
<i>Nagy Mibály:</i> Százötven éve hullott a világhírű kaba-debreceni lebkő	395
<i>Gesztli Tamás:</i> Rezgő tükrök a kvantumvilág határán	401
<i>Ungár Tamás:</i> A deformációs anizotrópia diszlokációs modellje	403
<i>Gesztli Tamás:</i> Tisza László és a szuperfolyékonyság elmélete	408

ATOMOKTÓL A CSILLAGOKIG

<i>Vattay Gábor:</i> Az internet fizikája	411
---	-----

A FIZIKA TANÍTÁSA

<i>Sükösd Csaba:</i> A X. Szilárd Leó Nukleáris Tanulmányi Verseny – beszámoló, II. rész	413
---	-----

Kirsch Éva, Elblinger Ferenc, Tepliczky István:

Élményrészecskék a részecske-élményeinkből	418
--	-----

Az Országos Szilárd Leó Fizikaverseny meghirdetése a 2007/2008. tanévre	424
---	-----

PÁLYÁZATOK	426
-------------------	-----

KÖNYVESPOLC	426
--------------------	-----

HÍREK – ESEMÉNYEK	429
--------------------------	-----

MINDENTUDÁS AZ ISKOLÁBAN

Bolygók mindenütt (<i>Szatmáry Károly</i>)	433
--	-----

I. Csabai, N. Purger, L. Dobos, A. Szalay, T. Budavári: The structure of the Universe

L.V. Tóth: How stars like our Sun might have come about

M. Nagy: 150 years ago: the impact of the famous Kaba-Debrecen meteorite

T. Gesztli: Vibrating mirrors in the border zone adjacent to the quantum world

T. Ungár: A dislocational model of deformation anisotropy

T. Gesztli: L. Tisza and the theory of superfluidity

FROM ATOMS TO STARS

G. Vattay: The physics of internet

TEACHING PHYSICS

Cs. Sükösd: Report on the X. Leo Szilárd Contest in nuclear physics – Part II.

É. Kirsch, F. Elblinger, I. Tepliczky: Hungarian physics teachers' visitor course in CERN, 2007

TENDERS, BOOKS, EVENTS

SCIENCE IN BITS FOR THE SCHOOL

Planets everywhere (*K. Szatmáry*)

I. Csabai, N. Purger, L. Dobos, A. Szalay, T. Budavári: Die Struktur des Universums

L.V. Tóth: Wie mögen Sterne wie unsere Sonne entstanden sein?

M. Nagy: Vor 150 Jahren: der Einschlag des weltberühmten Meteorits von Kaba-Debrecen

T. Gesztli: Schwingende Spiegel im Grenzgebiet zur Quantumwelt

T. Ungár: Ein Dislokationsmodell der anisotropen Deformation

T. Gesztli: L. Tisza und die Theorie der Suprafluidität

VON DEN ATOMEN BIS ZU DEN STERNEN

G. Vattay: Die Physik des Internets

PHYSIKUNTERRICHT

Cs. Sükösd: Bericht über den X. Leo-Szilárd-Wettbewerb in Kernphysik. Teil II.

É. Kirsch, F. Elblinger, I. Tepliczky: Der Fortbildungskurs ungarischer Physiklehrer
am CERN 2007

AUSSCHREIBUNGEN, BÜCHER, EREIGNISSE

WISSENSWERTES FÜR DIE SCHULE

Planeten überall (*K. Szatmáry*)

И. Чабай, Н. Пурзер, Л. Добос, А. Салаи, Т. Будавари: Структура Вселенной

В.Л. Тот: Возможный механизм рождения звезд подобных нашему Солнцу

М. Надь: 150 лет падению знаменитого метеорита у Кабы-Дебрецына

Т. Гестли: Колебания зеркал в режиме близком к квантовому миру

Т. Унгар: Дислокационная модель анизотропии деформаций

Т. Гестли: Л. Тиса и теория сверхтекучести

OT ATOMOV DO ZVEZD

Г. Ваттай: Физика интернета

ОБУЧЕНИЕ ФИЗИКЕ

Ч. Шюкёнд: Отчет о X. студенческом конкурсе им. Л. Силарда по ядерной физике.

Часть вторая

Э. Кири, Ф. Эллинггер, И. Теплички: Визит и курс венгерских учителей физики
в CERN, 2007. г.

ОБЪЯВЛЕНИЯ-КОНКУРСЫ, КНИГИ, ПРОИСХОДЯЩИЕ СОБЫТИЯ

НАУЧНЫЕ ОБЗОРЫ ДЛЯ ШКОЛ

Планеты всюду (*К. Сат.ури*)

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

LVII. évfolyam

12. szám

2007. december

AZ UNIVERZUM SZERKEZETE

Csabai István, Purger Norbert, Dobos László
ELTE TTK, Komplex Rendszerek Fizikája Tanszék

Szalay Sándor, Budavári Tamás
The Johns Hopkins University,
Department of Physics and Astronomy, Baltimore, USA

A kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás az Univerzumnak az általunk jelenleg észlelhető legrégebbi állapotáról ad számot. Az Univerzum akkori képe meglehetősen homogénnek és izotrópnak tűnik, a relatív fluktuációk nagyságrendje csupán 10^{-5} nagyságrendű. Ezzel szemben a mai Világegyetemben hatalmas sűrűségkontrasztot mutató struktúrákat látunk minden skálán: bolygókat, csillagokat, galaxisokat, galaxishalmazokat és szuperhalmazokat. Míg az intergalaktikus térben kevesebb mint 1 hidrogénatom van köbméterenként, addig például egy neutroncsillag tömegét 10^{18} kg/m³-re becsüljük, ami lokálisan 10^{45} mértékű sűrűségkülönbséget jelent. Noha számos részlet még nem világos, és néhány új, rejtélyes szereplő is megjelent a színen, a különböző skálákon végzett, egyre szaporodó észlelési eredményekre támaszkodva mindinkább tisztul a kép, hogy hogyan jöttek létre a struktúrák, hogyan alakult ki az Univerzum komplex szerkezete a kezdetben szinte homogén ősállapotból.

Az Univerzum jelenleg legáltalánosabban elfogadott modelljét a részecskefizikáéhoz hasonlóan „standard modell”-nek nevezik. Mindjárt látni fogjuk, hogy olyan szempontból nagyon találó a hasonló elnevezés, hogy a modell nagyon kiváló egyezéseket mutat az összes észleléssel, viszont számos olyan részlet van benne, melynek elméleti alapjait, finoman szólva, nem teljesen kielégítően értjük még. Az Univerzum fejlődésének történiáját nagyon sokan, nagyon sok helyen elmondták már, de azért, hogy az aktuális új eredmények is helyet kaphassanak benne, valamint rávilágíthassunk a struktúrák kialakulásával kapcsolatos mozzanatokra, tekint-

sük át először nagyon röviden a történetet és az elméleti hátteret, majd az észlelések tükrében vizsgáljunk meg részletesebben bizonyos eseményeket.

Az Univerzum nagyon rövid története

Kezdetben volt az ősrobbanás. Ennek pontos mikéntjét itt nem tárgyaljuk részletesen, számunkra most csupán az a fontos, hogy olyan kvantumfluktuációk játszanak benne szerepet, melyek már ekkor, nagyon kis mértékben ugyan, de inhomogenitást hoznak be a térbeli eloszlásba. A további folyamatok ugyanis nagyrészt ezeket a térbeli fluktuációkat módosítják: ha minden egyzaktul homogén lett volna kezdetben, akkor nem kapnánk meg a jelenleg látható struktúrákat. Az ősrobbanást követő nagyon gyors kitágulással járó inflációs fázis szinte teljesen homogénné és izotróppá teszi az Univerzumot, csupán apró, nagyjából skálafüggetlen Gauss-fluktuációk maradnak meg. Fontos megjegyezni, hogy ezeknek a fluktuációknak a nagysága és eloszlása nagyon érzékenyen befolyásolja, hogy később, például a gravitáció hatására mikor és mekkora anyagcsomók állhatnak össze, lesznek-e csillagok és galaxisok, mekkora lesz azok tipikus tömege. Az infláció az Univerzum 10^{-32} másodperces korára lezajlik, a táguló és hűlő világban kialakulnak a hadronok és leptonok nagyjából a 3. perc végére (1. ábra).

A következő szakaszban a struktúráképződés szempontjából újabb, fontos jelenségek játszódnak le. Az Univerzum ekkor forró, táguló ionizált gáznak tekinthető. A magas hőmérséklet miatt a fotonok dominálják az eseményeket egészen az Univerzum nagyjából 380 ezer éves koráig. A fotonoknak nagyon rövid a szabad úthosszuk, nagyon gyakran ütköznek. A rendszer állapot-

A szerzők köszönetet mondanak az OTKA-T047244, MSRC-2005-038 és MRTN-CT-2004-503929 jelű pályázati témák keretében kapott kutatási támogatásért.

egyenletét és dinamikáját megvizsgálva kiderül, hogy ebben a plazmában olyan rezgések indulnak be, amelyek leginkább akusztikus rezgésekhez hasonlatosak, és ezéért hanghullámoknak nevezik őket. Ezek azért fontosak, mert, mint ahogy látni fogjuk, a hanghullámok sűrűségfluktuációkat okoznak, és ezek nyoma még a jelenlegi galaxiseloszlásban is kimutatható. Miután a plazma annyira lehűlt és kiritkult, hogy kialakulhattak az első atomok, és a fotonok szabadon repülhettek, egyre inkább a gravitáció vette át a struktúra formálásában a vezényszert. A kezdeti kis sűrűségfluktuációk a gravitáció vonzása alatt egyre növekedtek. A jelenlegi, úgynevezett hideg sötét anyag modell (Cold Dark Matter, CDM) szerint a sötét anyag gravitációs völgyeket hozott létre, és az ebbe belezuhanó hidrogéngáz addig sűrűsödött, míg begyűltek az első csillagok, és/vagy az első aktív galaxisok. Erről a „sötét” korszakról jelenlegi műszereinkkel nem tudunk sokat megállapítani a semleges hidrogéngáz elnyelése miatt. A csillagok ultravioleta fénye később ionizálta a semleges hidrogént, valamint a szupernóva-robbanások legyártották a nehezebb elemeket is. A kisebb galaxiskezdemények összekapcsolódtak, és a fokozatos összeolvadások során kialakultak a ma is látható galaxisok.

A modell és paraméterei

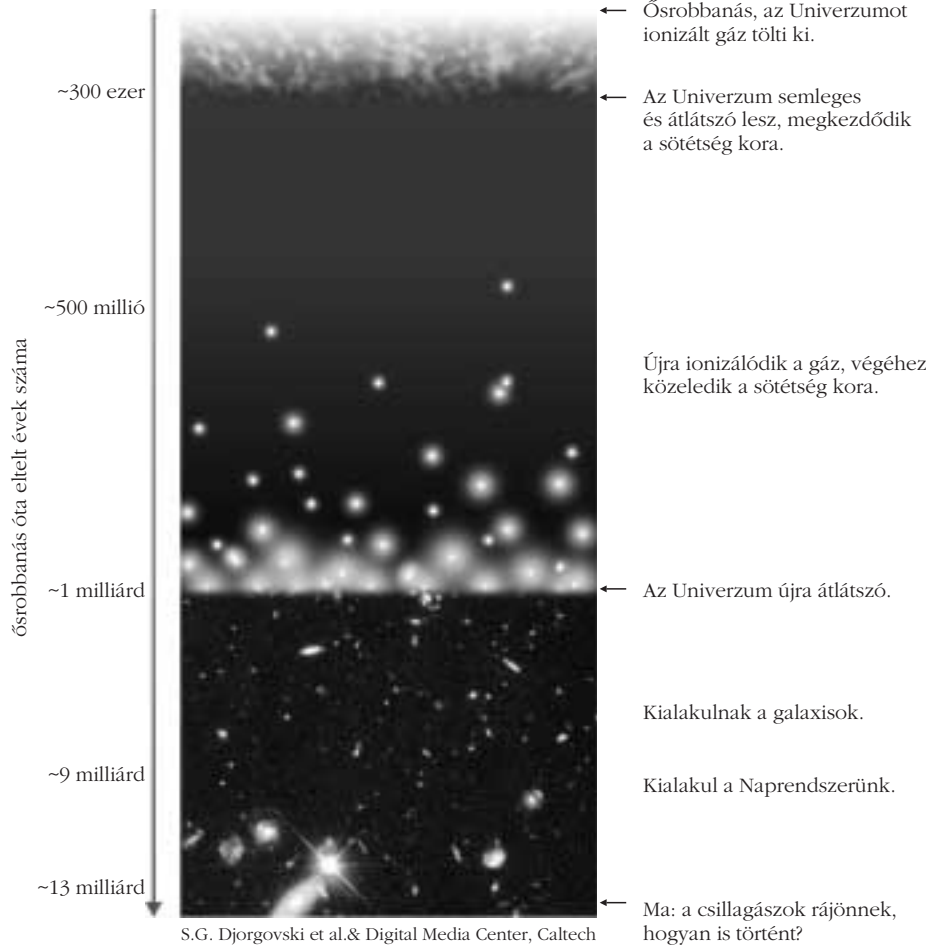
A Világegyetem tágulását legegyszerűbb közelítésben a Friedman-egyenletek írják le:

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 \equiv H^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho + \frac{\Lambda}{3} - \frac{k}{a^2},$$

$$-\frac{\ddot{a}}{a} = \frac{4\pi G}{3}(\rho + 3p).$$

Az első egyenlet a tágulás mikéntjét mutatja, a második pedig az állapotegyenlet. A képletekben a jelöli a skálafaktort, ami a relatív tágulás mértékét fejezi ki, a felülponozás szokott módon az időderiváltat jelöli. Az \dot{a}/a arány, a Hubble-paraméter megmondja, hogy adott távolságon lévő két pont milyen látszólagos sebességgel távolodik egymástól. Ezt a távolodási mérésekkel is ki lehet mutatni, és a Hubble-törvény

Az Univerzum története



S.G. Djorgovski et al. & Digital Media Center, Caltech

1. ábra. Az Univerzum rövid története

értelmében egy tőlünk D távolságra lévő galaxis látászó radiális távolodási sebessége $v = H \cdot D$. Itt jegyezzük meg, hogy sem a távolságot, sem pedig a távolodási sebességet nem lehet közvetlenül mérni, ezek észlelése volt az elmúlt évtizedek egyik nagy kihívása a kísérleti kozmológiában. A jobb oldalon az első tag az anyag hatását írja le, G a gravitációs állandó, ρ pedig az anyagsűrűség, magában foglalva a barionikus anyagot, a fotonokat és a sötét anyagot is. Gyakran a sűrűséget nem közvetlenül, hanem a

$$\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G} = 1,9 \cdot 10^{-29} \text{ b}^2 \text{ g cm}^{-3}$$

kritikus sűrűséggel normálva használjuk:

$$\Omega_m \equiv \frac{\rho}{\rho_c}.$$

A kritikus sűrűséget az jelöli ki, hogy ennél nagyobb sűrűségekre (0 görbület és kozmológiai konstans mellett) az Univerzum végül összeesik, ennél nagyobb értékekre pedig a végtelenségig folyamatosan tágul.

Az első egyenletben még két tagról nem szölgünk: Λ az egyelőre titokzatos sötét energiát, vagy kozmológiai konstans írja le, k pedig az euklideszitől esetlegesen

eltérő tér görbületét. A mérések eddigi tanúsága szerint a tér lapos, tehát ez utóbbi faktor kiesik az egyenletből. Mint ahogyan az anyagsűrűségnél tettük, hasonlóan normált, dimenziótlan változókra térhetünk át a kozmológiai konstans és a görbület esetében is. Így a tágulást kifejező egyenletből az alábbi formát kaphatjuk:

$$1 = \Omega_0 = \Omega_b + \Omega_d + \Omega_r + \Omega_\Lambda + \Omega_b.$$

Ez egyfajta mérlegegyenlet, amely a különböző összetevők arányát írja le. Jelenlegi legjobb tudásunk szerint az Univerzum euklideszi, vagyis Ω_b , valamint a sugárzás (fotonok) járuléka jelenleg csekély, tehát Ω_r is 0. Csupán egy évtizede gyűlnek az egyre biztosabb jelek, hogy a kozmológiai konstans értéke nem nulla, sőt elég jelentős $\Omega_\Lambda = 0,74$, de, sajnos a sötét energiáról ennél több információ nem igen áll rendelkezésünkre. A fennmaradó 0,26-on osztozik a sötét és „világító” anyag. Ebből is jelentős hányad ($\Omega_d = 0,22$) a sötét anyagra esik, amelynek természetéről szintén keveset tudunk, annyi bizonyos, hogy csak gravitációs hatását tapasztaltuk eddig. A teljes mérlegből csekély 4% marad a minket és bolygónkat alkotó, valamint főként a csillagokban és szabad hidrogén- és héliumgáz formájában jelen lévő barionikus anyagra ($\Omega_b = 0,04$).

A második egyenletben p a nyomást jelöli. Attól függően, hogy az Univerzum különböző korszakokban milyen anyagféleség dominálta a világot, a sűrűség és a nyomás között különböző relációk álltak fenn. Ezek a különböző állapotegyenletek persze más és más tágulási történeteket eredményeznek. Nézzük meg a tiszta egykomponensű eseteket.

Kezdetben, amikor a vákuum energiája dominálta az Univerzumot, az állapotegyenletbe a

$$p = -\rho$$

alakot beírva exponenciálisan gyorsuló felfúvódást kapunk:

$$a(t) \sim \exp(Ht).$$

Később a forró plazma állapotban a fotonok játszották a főszerepet. Tiszta fotongázra

$$p = \rho/3,$$

ami az idő négyzetgyökével arányos, jelentősen lassabb tágulást eredményez:

$$a(t) \sim t^{1/2}.$$

Végül jelenlegi, ritka anyag dominálta Univerzumunkban a nyomás zérus,

$$p = 0,$$

amely összefüggés, a gravitáció hatását figyelembe véve, egy más kitevőjű hatvánnyal való tágulást eredményez:

$$a(t) \sim t^{2/3}.$$

Itt jegyezzük meg, hogy a kozmológiai konstans nullától különböző értékének alig egy évtizede történt kísérleti megalapozása óta számosan úgy kalkulálnak,

hogy a gyorsulva táguló Világegyetemben az anyag dominanciája ismét a vákuumnak adhatja át a stafétabotot, mintegy széttépve ezzel a Mindenséget.

A fenti egyenletek persze csak nagy vonalakban adják meg a fejlődést, számos részletet kell még hozzátenni, hogy a kép kisebb skálákon is teljes legyen, és a struktúrák kialakulását részletesen megérthessük. Ilyenek a nukleoszintézis, a csillag- és galaxiskeletkezés szabályai, vagy például a szupernóva-robbanások lökéshullámainak hatása. Noha nagy utat kell még megtenni, de eme jelenségek körök részletei szinte napról napra tisztulnak, és egyre nyilvánvalóbb, hogy a teljes megértéshez sokkal komplexebb képet kell kialakítani.

A szerkezet leírása

Az Univerzum nagy léptékű (galaxisok, galaxisok mérete fölötti) szerkezetét statisztikai módszerekkel írjuk le. Ehhez az anyagsűrűségnek az átlagostól ($\bar{\rho}$) való eltérését, azaz fluktuációit vizsgáljuk:

$$\delta_x = \frac{\rho(\mathbf{x}) - \bar{\rho}}{\bar{\rho}},$$

A fluktuációknak vizsgálhatjuk a korrelációit, például a leggyakrabban használt kétpont-korrelációs függvény segítségével:

$$\xi(r) = \langle \delta_x \delta_{x+r} \rangle.$$

A korrelációs függvény azt méri, hogy a tér két, r távolságban levő pontja beli relatív sűrűség-eltérés mennyire hasonlít egymáshoz. Ha nincsenek korrelációk, akkor ez a függvény lapos, ha pedig, például, valamilyen karakterisztikus méret fordul elő, akkor az annak megfelelő értékeknél csúcsokat kapunk. Matematikailag ezzel ekvivalens, ha a korrelációs függvény Fourier-transzformáltját, a teljesítménysűrűség-spektrumot vesszük:

$$P(k) = \frac{1}{2\pi^2} \int_0^\infty dr \xi(r) \frac{\sin(kr)}{kr}.$$

Noha matematikailag ekvivalensek, technikai okok miatt, valamint azért hogy a mérési hibákat korrekten kezelhessük, a méréstől függően egyik vagy másik statisztika használata célszerűbb.

Mivel a Friedman-egyenletek a kisebb skálák nemlineáris jelenségeit nem írják le, az általánosan elfogadott nézet szerint azokat leginkább a csak gravitációsan kölcsönható sötét anyag evolúciójának kiszámítására használhatjuk fel. A galaxisok „világító” anyagának eloszlása nem követi pontosan ezt az eloszlást, hanem a sötét anyag által kialakított gravitációs völgyek legmélyén gyűlnek csak be. Ez az úgynevezett „biasing” jelenség, amelyet a legegyszerűbb, lineáris esetben egyetlen b faktoriall jellemezhetünk:

$$\left(\frac{\delta \rho}{\rho} \right)_{\text{galaxisok}} = b \left(\frac{\delta \rho}{\rho} \right)_{\text{sötét anyag}}.$$

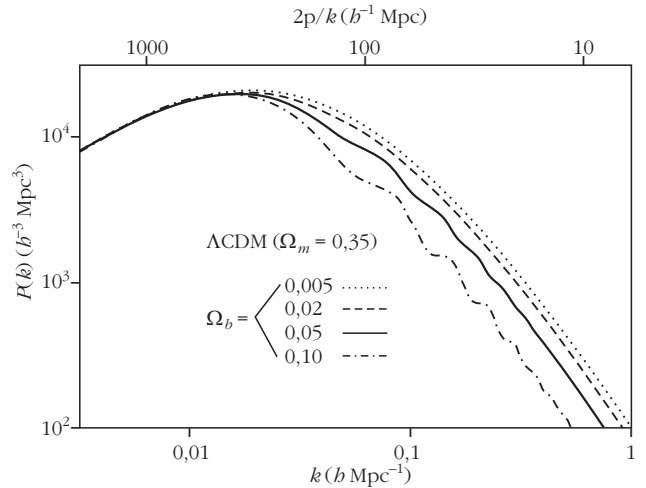
Nézzük meg konkrétan, hogyan néz ki a teljesítménysűrűség-spektrum a hullámszám (illetve a felső skálán a hullámhossz) függvényében (2. ábra).

A hullámszám 1/hosszúság mértékegységű, a hosszúságot megaparsecban (Mpc) mérjük, ahol 1 parsec = 3,26 fényév vagy nagyjából $3 \cdot 10^6$ méter. A mértékegység előtt lévő b faktor a Hubble-állandó dimenziótlan, normált változata ($H = b \cdot [100 \text{ km/s/Mpc}]$), és azért szokott szerepelni a kifejezésekben és ábrákon, mivel pontos értéke, (az eddigi mérések alapján 0,72) sokáig bizonytalan volt, de tőle függően minden méret átskálázódik.

Mit is látunk az ábrán? Az egyes görbék egy olyan sík Univerzum spektrumát ábrázolják, ahol a sötét és barionikus anyag (Ω_m) együttes aránya 0,35, és ebből a görbéken felülről lefelé haladva rendre 0,005, 0,02, 0,05, illetve 0,1 a barionikus anyag mennyisége. Láthatjuk hogy az arány változtatásával más görbéket kapunk. A jelenlegi kozmológiai vizsgálatok éppen erről szólnak: számoljuk ki az Univerzum modelljeit különböző paraméterekkel, és rajzoljuk fel valamilyen mérhető mennyiség vagy statisztika, mint például a fent mutatott sűrűségfluktuáció-spektrum görbéjét. Végezzünk méréseket, és vessük össze, hogy mely modell, milyen paraméterek mellett illeszkedik legjobban az észlelésekhez. Így egyre nagyobb statisztikával, egyre több irányú és pontosabb mérésekkel, egyre jobban rögzíthetjük modellünket és paramétereit. Pár éve ez még csak álom volt, de a jelenlegi nagy skálás mérések a nem olyan régen még szinte csak filozofikus kérdéseket tárgyaló kozmológiát precíziós kísérleti tudományá alakították.

Nagyszabású szimulációk

Ahhoz tehát, hogy feltárjuk a kozmológiai struktúra-képződés részleteit, lehetőleg az ég minél nagyobb területéről, minél több adatot kell begyűjteni. Szerencsénkre a fotonok sebessége véges, így nem csupán az Univerzum jelenét, hanem a múltját is direkt módon tanulmányozhatjuk, hiszen vannak olyan fotonok, amelyek már milliárd évekkel ezelőtt indultak el útjukra, de csak most érnek detektorainkhoz. Ha elég érzékeny műszerrel tekintünk az égre, akkor optikai és ahhoz közeli tartományokban visszatekinthetünk egészen addig a korszakig, amikor az Univerzum csupán pár százmillió éves volt. Itt, mint ahogy az 1. ábrán láthatjuk, elérjük a reionizáció előtti „sötétség korát”, amikor is az összefüggő neutrális hidrogénfelhő nem engedi át a fényt. A hidrogéngázzal az iskolában azt tanuljuk ugyan, hogy színtelen, átlátszó gáz, de jól ismert, hogy az ultraibolya-tartományban lévő fotonokat elnyeli (gerjesztési és ionizációs vonalak). Mivel a fény vöröselölődést szenved miközben felénk tart, ezek az elnyelési vonalak végigvonulnak a teljes látható színekben, és mindent nullával tesznek egyenlővé. Sokkal távolabbra egyébként se látnánk, ez a kor azért is sötét, mert nincs amit láthatnánk. Ugyanis nem túl sokkal a reionizáció előtt gyulladtak



2. ábra. A kozmikus sűrűségfluktuációk teljesítménysűrűség-spektrumának elméleti görbéi

be az első csillagok és esetleg aktív galaxismagok (létrehozván magát a reionizációt is), amelyek egyáltalán fényt bocsátanak ki.

Szerencsénkre azonban van még egy csecsemőkori képünk is az Univerzumból, abból az időből, amikor nagyjából 380 ezer éves volt. Ennek megértéséhez ismét a történelmi bevezetőre és az 1. ábrára utalunk vissza. Amikor a korai Univerzum forró plazmája a tágulás során egyre hűlt, elérkezett az a pillanat, amikor a fotonok szabad úthossza végtelenre nőtt. Az akkori, néhány ezer fokok plazmauniverzum hőmérsékleti sugárzásának fotonjai tehát attól kezdve repülnek felénk, de mivel a tér azóta jelentősen kitágult, ezek a fotonok annyira megnyúltak, hogy átkerültek a mikrohullámú tartományba, és mintegy 2,7 kelvin a karakterisztikus hőmérsékletük. A plazmakorszak szimulációja viszonylag egyszerű, a kezdeti, véletlenszerű kvantumfluktuációkat kell a tágulás során nyomon követni, és hozzákombinálni azokat az akusztikus sűrűsödési hullámokat, amelyeket a forró plazma rezgése keltett. Természetesen, ha más például a barionikus és sötét anyag aránya, akkor hasonlóan ahhoz, mint ahogy a különböző fémekből öntött harangok más és más hangszínen csengenek, az Univerzum „szférájának zenéje”, vagyis a fluktuációspektrum is más és más lesz. Wayne Hunak a Chicagói Egyetemen lévő weboldalán (<http://background.uchicago.edu/~whu/metaanim.html>) például különböző animációkat láthatunk arra vonatkozóan, hogy miként változik a fluktuációk spektruma, ha változtatjuk a barionikus anyag arányát vagy a többi kozmológiai paramétert. A 2. ábra ilyen jellegű görbék közül mutat néhányat.

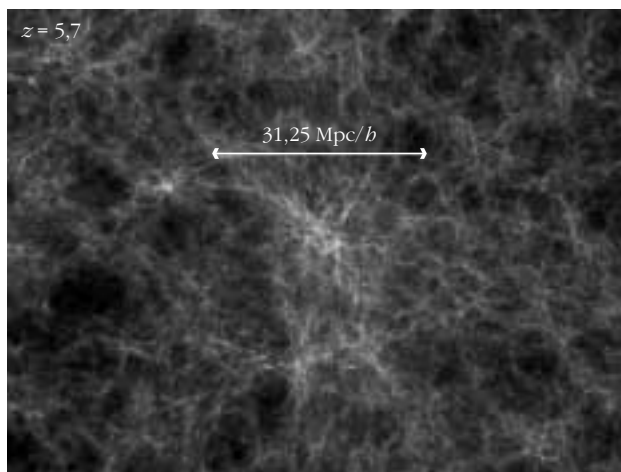
Valamivel komplikáltabb az anyag csomósodásának végigkövetése, melyet a végtelen hatótávolságú gravitáció hatása hoz létre. Egy ilyen N-test szimulációban az anyagnak kis darabjait, „részecskéit” vesszük és számoljuk ki mozgásukat a többi részecske gravitációs terében. Ha nagy skálán nagyjából homogén az anyag eloszlása, akkor egy adott ponttól R távolságra lévő gömbhéjban foglalt anyag összes tömege R^2 -tel arányos. Mivel a gravitációs erő éppen $1/R^2$ -tel cseng le, a közeli és távoli pontoknak a hatá-

sa azonos nagyságrendű, így a mozgásegyenletek kiszámolásakor minden pont minden másik ponttal való kölcsönhatását figyelni kell, azaz N részecske esetében $N \times N$ számítást kell elvégezni minden időlépésben. Ahhoz hogy a szimuláció kellően pontos legyen, a Virgo Consortium néven ismert nemzetközi kutatócsoport Millennium Projektje (<http://www.mpa-garching.mpg.de/galform/virgo/millennium/>) például 10 milliárd „részecske” pályáját követte egy 2 milliárd fényév oldalhosszúságú kockában, több mint 10 milliárd éven át. Nem csoda, hogy a szimuláció még számos numerikus programozási trükk felhasználásával is 30 napig futott 1500 processzoron, és több mint 25 terabájtnyi adatot eredményezett (3. ábra). A szimuláció igazából a sötét anyag viselkedését követte, és a méretfelbontás alsó határa a galaxis-halmazok tartományába esik.

Lehet, hogy csupán azért, mert keveset tudunk róla, a sötét anyag viselkedését egyszerűbbnek gondoljuk, mivel csak gravitációsan hat kölcsön. A sötét anyag szimuláció által így kialakított gravitációs völgyek legmélyebb részein gondoljuk, hogy a hidrogéngáz annyira összesűrűsödhetett, hogy begyulladhattak a csillagok, kialakulhattak a galaxisok. A galaxiskeletkezés pontos mikéntjének megértése még időbe telik, hiszen olyan komplex jelenségek tartóztatják, mint a csillagokban lejároló magfizikai folyamatok, a szupernóva-robbanások lökéshullámaival szétszórt nehéz elemek turbulens keveredése, vagy például a galaxisok aktív magjában lévő fekete lyukakba áramló anyag dinamikája.

Kozmikus távolságok

Mielőtt rátérünk a kozmikus struktúra észlelésének két kísérleti pillérére, hadd szóljunk röviden a harmadikról, amely közvetve ugyan nem a struktúrát vizsgálja, de azal, hogy a kozmikus távolságskálát kalibrálja, a másik két vizsgálat eredményeit is nagyban befolyásolja. Az égi hosszúsági és szélességi koordinátákat ugyanis nagyon könnyen mérhetjük, viszont egy galaxisnak tőlünk vett távolságáról nehéz információhoz jutni. Nincs is igazán más módszer rá, mint egyre nagyobb skálákon használható módszerek összeillesztésével egy úgynevezett távolságlétrát bekalibrálni. A kalibráció első lépcsőfoka a parallaxis. A közeli csillagok ugyanis olyan távolságokon vannak, amelyek gondos vizsgálatokkal összemérhetőek a földpálya átmérőjével. Ha ugyanis ugyanarra a csillagra a Föld Nap körüli pályájának két átellenes pontjáról nézünk rá, akkor egy nagy egyenlő szárú háromszöget feszítünk ki, melynek alapja a földpálya átmérője. A háromszög magassága az alaphoz képest nagyon nagy, s így a vele szembe levő szög nagyon kicsi. Ha távcsövünkkel azért le tudjuk mérni ezt a kicsi szögeltérést, akkor ki tudjuk számítani a csillag távolságát. Sajnos ez csak a legközelebbi csillagokra működik, viszont közöttük vannak érdekes változó csillagok, a cefeidák, amelyek fényének változási periódusa kapcsolatban áll abszolút fényességükkel. Ha így abszolút fényességüket bekalibráltuk, nyert



3. ábra. A sötét anyag eloszlása a Millennium-szimuláció egy „pillanatfelvételén” (<http://www.mpa-garching.mpg.de/galform/virgo/millennium/>)

ügyünk van, hiszen a fényintenzitás $1/\text{távolság}^2$ -es csökkenése alapján tetszőleges helyen meg tudjuk határozni távolságukat. Persze, praktikusán nem tetszőleges távolságban, hiszen egy adott távolságon túl már túl halványak távcsöveink számára. A cefeidák távoli rokonai a szupernóvák, különösen az Ia típusúak szintén standard gyertyaként használhatók, még nagyobb távolságokon is, hiszen robbanásukkor fényük akár egy galaxis milliárd csillagát is képes túlragyogni. Segítségükkel tehát kiléphetünk a galaktikus skálákra. Sajnos egy-egy galaxisban átlagosan csak 100 évente látunk ilyen felvillanást, a nagyon távoliakban pedig nem igazán észlelhetőek, így mindegyik galaxist nem tudjuk ily módon bekalibrálni. A szupernóvák észlelése és a távolságskála rögzítése a kozmológiai modell tisztázása szempontjából nagyon kritikus, ezért számos felmérést indítottak a közelmúltban, hogy minél több és minél távolabbi galaxishoz szerezzünk be adatokat. A kérdés fontossága persze mindig vonzza a kritikus hangokat is, hiszen ha az adatokat rosszul kalibráljuk, például a galaktikus por miatt, vagy nem megbízhatóak a szupernóvamodelljeink, akkor a jelenlegi kozmológiai modellek érvényessége kétségbe vonható. A vitákat itt is, reméljük mihamarabb, az adatok gyarapodása fogja eldönteni.

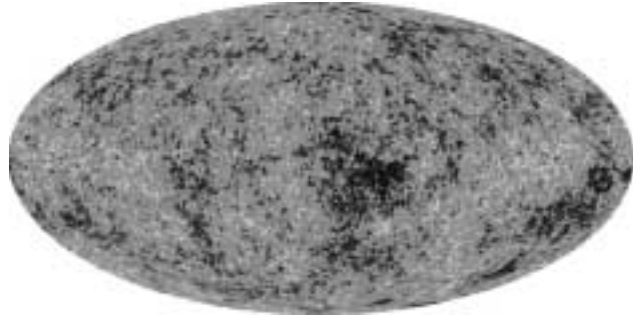
Ha elfogadjuk a Hubble-törvényt, és a cefeidák valamint a szupernóvák segítségével bekalibráljuk, akkor nagyobb skálákon a vöröseltolódás szolgálhat a távolság analógiájának. A vöröseltolódás a galaxisok látszó radiális távolodásának eredménye, és a spektrumvonalak vörös tartomány felé eltolódásában jelentkeznek. Ennek pontos méréséhez spektrumokat kell felvenni, ami nagyon időigényes mérés. A majd később tárgyalt SDSS például észlelési idejének 80%-ban a maradék 20%-ban lefényképezett galaxisok csupán 1%-ának tudja a vöröseltolódását megmérni. Számos nemzetközi csoporttal együtt kollégáimmal és diákjaimmal sokat dolgoztunk azon a kérdésen, hogy pusztán a fényképekből nyerhető fotometriai információ alapján hogyan lehet a vöröseltolódást minél pontosabban megbecsülni.

Nagyszabású észlelések

A kozmikus távolságokról szóló kitérő előtt említett, különböző korokat leíró szimulációkat kell tehát összevetnünk az észlelésekkel, hogy modelljeink helyességéről meggyőződjhessünk, illetve azok paramétereit meghatározhassuk. Az észleléseknek hasonlóan nagy skálát kell átfogniuk, és persze még nagyobb anyagi és időbeli ráfordítást igényelnek a kutatóktól, mint a szimulációk. Szerencsére a mikroelektronika és a technológia fejlődése lehetővé tette, hogy az elmúlt évtizedben számos nagyszabású felmérés végrehajtására alkalmas eszközt hozzanak létre a kutatók. Az egyik felmérés, amely egyik sarokköve a modern kísérleti kozmológiának, a kozmikus háttérsugárzás detektálására alkotott COBE és WMAP műholdakon nyugszik. Magának a kozmikus mikrohullámú háttérnek felfedezéséért *Arno A. Penzias* és *Robert W. Wilson* 1978-ban kaptak Nobel-díjat. *John C. Mather* és *George F. Smoot* pedig 2006-ban azért kapták meg ezen elismerést, mert a fenti műszerekkel ki tudták mutatni a kozmológiai modellek által előrejelzett 10^{-5} nagyságrendű fluktuációkat a homogén háttérhez képest. Ez nem volt könnyű dolog, hiszen a fent említett nagyságrend szemléletesen azt jelenti, hogy ha a sűrűségfluktuációkat kidomborodásoknak tekintenénk egy gömb felszínén, akkor egy biliárdgolyó tükörfényes felszínén kell tizedmikronnál kisebb egyenetlenségeket feltérképezni, és korrelációit meghatározni. A földi atmoszféra és rádiózavarok elkerülése érdekében műholdról zajlottak a mérések, és az égen végigpásztázva két-két pont hőmérsékletkülönbségét mérték. A kapott eredményeket még korrigálni kellett a galaxis és ismert extragalaktikus források zavaró hatásainak kiküszöbölésére, de végül 1992-ben elkészült a COBE nagyjából 7 fok felbontású, majd 2003-tól egyre több adattal a WMAP pár tized fok felbontású térképe (4. ábra).

Természetesen nem a konkrét térképet lehet összevetni a szimulációkkal, hiszen ennek pontos képét nagyban befolyásolja a kezdeti véletlen fluktuációk elrendeződése, hanem a fent már említett korrelációs függvényeket vagy fluktuációs spektrumokat kell összevetni. Mivel egy gömb felületét látjuk, célszerű a gömbfüggvények szerint kifejezni a fluktuációkat, kezdve a lassan változó hosszú hullámúaktól a nagyobb frekvenciás rövid hullámúakig. Az észleléseknél minden skálán ki tudjuk számolni a zajból és a műszer tökéletlenségéből adódó hibákat is.

Az 5. ábráról leolvashatjuk, hogy a becslést mérési hibák rendkívül kicsik, és a legjobban illeszkedő modell jóslatát szinte minden skálán nagyon jól követi. Megjegyezzük, hogy a legnagyobb szögskálákhoz tartozó egyetlen kilógó pont szignifikanciája nagy vihart kavart. Vannak, akik nagy jelentőséget tulajdonítanak ennek, illetve a különböző multipól módusok fázisai egybeesésének, és a modellek alaposabb revízióját javasolják. A többség inkább kívárja, amíg a hamarosan üzembe állítandó, még precízebb Planck műhold több adatot gyűjt be. Mindenesetre az ábrán jól látszik, hogy a modellek által jóslott úgynevezett

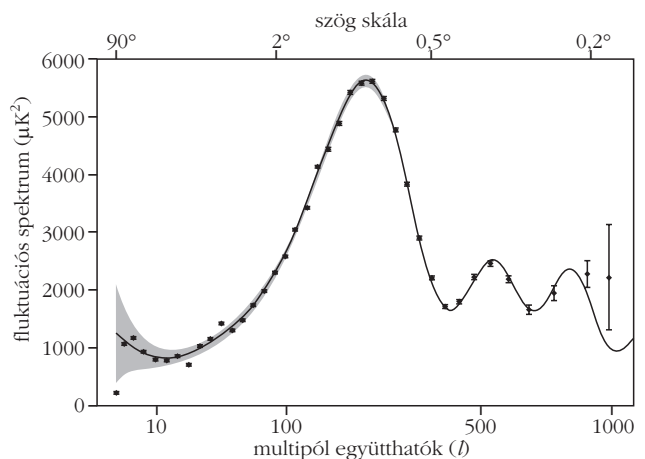


4. ábra. A WMAP műhold által készített kép az éggömbön látható hőmérsékletfluktuációkról. (<http://map.gsfc.nasa.gov/>)

akusztikus csúcsok létét a mérések kiválóan igazolják, és a mérési pontosság határain belül az első két csúcs pontosan illeszthető, szűk határok közé szorítva bizonyos kozmológiai paraméterek értékeit.

Láttuk tehát az Univerzum csecsemőkori képét. Ha modelljeink jók, akkor azt is pontosan vissza kell adniuk, hogy az „ifjú”, majd a mai Univerzum hogyan néz ki. Ehhez a galaxisok nagy léptékű eloszlását kell megvizsgálni minél nagyobb vöröseltolódás-tartományban. Az ég felületén nagy tartomány azért kell, hogy a fluktuációs spektrumnak minél nagyobb részéhez illeszthessük modelljeinket, a mélyebb vöröseltolódások pedig az említett Hubble-törvény értelmében nagyobb távolságokat jelentenek, ahonnan a fény hosszú idő alatt ér ide, vagyis távolabbi galaxisokat észlelve az időskálát tágíthatjuk. Persze, ez a két követelmény kompromisszumokra kényszeríti az észlelő csillagászokat. Ha felnézünk az égre, a népdalok tanúsága szerint ragyognak a csillagok. Ószintébben fogalmazva inkább pislákolnak, a galaxisok pedig még szerényebben küldenek felénk néha-néha egy pár kóbor fotont. Az észlelési idő (nem is beszélve a pályázatok és doktori terminusok idejéről) viszont véges, és ha műszerünk adott számú foton észlelésére képes, akkor választhatunk, hogy egy kis területről készítsünk mélyebb felvételt, vagy pedig a teljes égboltról egy sekélyebbet. Annak következtében, hogy

5. ábra. A mikrohullámú háttérsugárzás fluktuáció spektruma a szögskála függvényében. A pontok körüli függőleges szakaszok a mérési hibát, a beszínezett sáv pedig a modell bizonytalanságát jelzi. (<http://map.gsfc.nasa.gov/>)



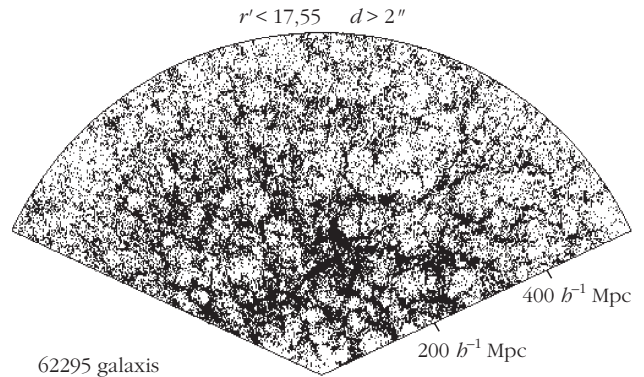


6. ábra. Az SDSS CCD-kamerája, háttérben tervezőjével, Jim Gunnal. A kis négyzetek különálló CCD-chipek, a rájuk szerelt színszűrőkkel. (<http://www.sdss.org>)

a csillagászok az eddig használt fotolemezekről a 90-es évek közepétől kezdtek áttérni a CCD-eszközökre, a vizsgálható térfogat szerencsére fokozatosan kitágul. Az újfajta nagy skálás és viszonylag mély felmérések prototípusa a Sloan Digital Sky Survey (SDSS, <http://www.sdss.org>, illetve magyarul <http://skyserver.elte.hu>). Ezen a projekten a cikk egyik szerzője és diákjai (*Győry Zsuzsanna, Purger Norbert, Dobos László*) jó ideje dolgoznak, de számos más magyar kutató, mint a tervezésben és adatfeldolgozásban kulcsszerepet játszó *Szalay Sándor* és volt diákjai (*Budavári Tamás, Szokoly Gyula, Szapudi István*) is hozzájárultak sikeréhez.

Az SDSS távcsöve egy földi távcső, 2,5 méteres tükrőátmérőjével a jelenlegi távcsövek középmezőnyétől is lemarad. Különlegessége abban áll, hogy működését több éven át teljes mértékben erre a projektre koncentrálták, és két, a maga nemében és idejében egyedülálló műszer helyezhető különlegesen nagy látószögű torzítatlan fókuszsíkjába. Az egyik műszer, egy összesen 120 megapixeles kamera (6. ábra), amely az optikai tartomány 5 sávjában készít felvételeket az égboltról. Tervezésekor, illetve gyártásakor a 90-es évek végén ez az egy távcső tartalmazta az összes csillagászati CCD-pixelék nagyobbik hányadát. Ha arra még kell is egyikét évet várni, hogy mindannyiunk mobiltelefonjának kamerája elérje ezt a felbontást, azért ma már számos hasonló kaliberű csillagászati kamera áll rendelkezésre, és hamarosan üzembe áll a Pan-Starrs projekt 1,4 gigapixeles kamerája, amely az SDSS 5 éves munkáját alig egy hét alatt lesz képes elvégezni.

Érdekességként jegyezzük meg, hogy a távcső, részben azért, hogy a követő mechanikával spórolhassanak, részben pedig azért, hogy a CCD-k kiolvasási holtidejétől megszabaduljanak, úgynevezett „drift scan” üzemmódban dolgozik. Ez azt jelenti, hogy miközben a Föld forgása következtében az ég egy szelete végigpásztázza az érzékelőt, ugyanebben az ütemben léptetik a CCD-ből kifelé az adatokat. Így egy pontszerű forrás képe egy CCD-oszlopon végighaladva integrálódik ki, kiátlagolva az egyes pixelek különbségéből adódó esetleges hibákat is, és megtakarítva a kiolvasási holt-

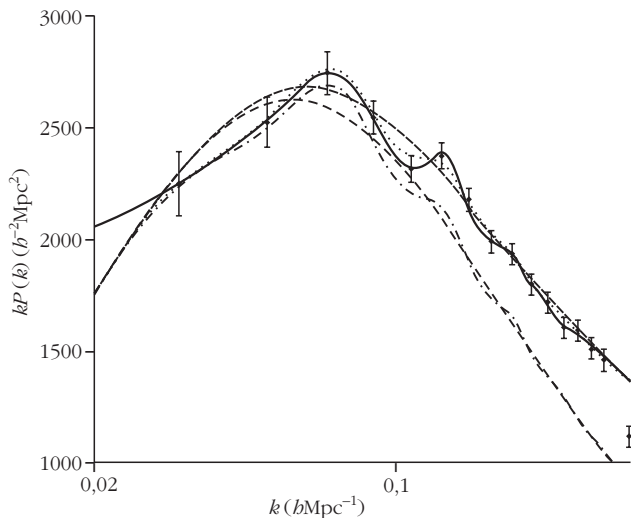


7. ábra. Az SDSS által felvett 3 dimenziós térkép egy szelete. Minden kis pont egy-egy galaxis térbeli elhelyezkedését jelöli.

időt. Persze, ha mozgó objektumokat (pl. aszteroida) fényképezünk, akkor, mivel a különböző színszűrők időben követik egymást, azok színes gyöngysorként jelennek meg a kombinált színes képeken.

A fotometria, vagyis a színes képek mellett a távcső színképeket, spektrumokat is vesz fel. Hagyományosan egy távcső egyszerre egy-két objektumról tudott csak spektrumot készíteni, és mivel a fényt a hullámhossz szerint szét kell szórni, nagyon sokáig kell exponálni, hogy a zajból jól kiemelkedő jelet kapjunk. Így olyan galaxis, amelyről teljes spektrum, így vöröseltolódás, és a Hubble-törvény révén távolságinformáció is rendelkezésre állt, az SDSS előtti időkben csupán pár ezer volt. Az SDSS távcsövébe egy speciális spektroszkóp került, amely a fókuszsíkba helyezett üvegszálak által elvezetve, egyszerre 640 színképet tudott felvenni. A fenti műszerek tették lehetővé, hogy az SDSS működésének nagyjából 5 éve alatt mintegy 150 millió galaxis és ugyanennyi csillag képét készítse el, és közülük közel 1 milliónak a spektrumát is felvegye. Az eredmény tehát egy több mint 1 milliószor 1 millió pixeles, 5 színben készült kép, és az objektumok nagyjából 1 százalékának 3 dimenziós pozíciója. Mindezen adatok nyilvánosak, sőt a több mint 3 terabájtnyi adat, mely hatékony kezelésének bonyolalmi külön kihívást jelentenek, magyarországi szerverről is elérhető.

Habár az 7. ábra nem tudja visszaadni a 3 dimenziót, egyből láthatjuk, hogy a galaxisok eloszlása nem homogén, sőt, örömmel fedezhetjük fel, hogy a hálószerű szövedék struktúrája hasonló a Millennium-szimulációban kapott eloszlásokhoz. A kozmikus mikrohullámú háttér csekély 10^{-5} -es fluktuációit a gravitáció vonzó hatása galaxishalmaz méretű skálákon kétszeres relatív sűrűségeltérésekké növelte, amelyet a korábban említett *bias* tovább növel. Természetesen nem csak szemünkre kell hagyatkozni, amikor a galaxiseloszlást össze akarjuk hasonlítani a modellekkel. Erre is kiszámolható a fluktuációspektrum, hasonlóan, mint ahogy a kozmikus mikrohullámú háttér esetében tettük. A két spektrumnak nem direkt módon kell illeszkedni, hiszen az Univerzum más korszakáról készültek a felvételek, de az akusztikus csúcsok jelenlétére itt is számítunk, illetve az illesztett modellparamétereknek az ott kapottakkal konzisztensnek kell lenniük.



8. ábra. Az SDSS fényes elliptikus galaxisainak térbeli eloszlásából származó fluktuációs spektrum és a rá illesztett különböző modellek. (Eisenstein et al., *Astrophys. J.* 633 (2005) 560–574.)

Az úgynevezett fényes elliptikus galaxisok a sötét anyag völgyekben összegyűlő galaxishalmazok központi objektumai, ezért viszonylag jó nyomjelzői a sötét anyag eloszlásának. Mivel fényesek, elég nagy távolságban is detektálni tudjuk őket, így kiválóan alkalmasak arra, hogy eloszlásukat összevessük a sötét anyag szimulációkból kapottakkal. A 8. ábrán az ilyen galaxisok térbeli eloszlásának sűrűségfluktuáció spektruma látható. Valóban felismerhetőek a hanghullámok nyomai, sőt, a legjobban illő modell paraméterei összhangban vannak a WMAP-észlelésekből kapott értékekkel. Ezen kulcsfontosságú kozmológiai eredmények mellett az SDSS „mellékterméként” még számos érdekes új eredményt hozott, kezdve az aszteroidák méret- és összetétel-eloszlásának

pontosabb meghatározásától a galaxisunk szerkezetének és dinamikájának feltérképezésén át a látható Univerzum határáról is felénk sugárzó gigantikus feketelyukakig, melyek tanulmányozása a galaxisok korai fejlődését teljesen átírta.

Összefoglalás

Láttuk, hogy az elmúlt évtizedben az extragalaktikus csillagászatban és kozmológiában forradalmi átalakulások játszódtak le. Egyre pontosabbak a kozmológiai paraméterek mért értékei, az Univerzum és a galaxisok fejlődésének történetét egyre részletesebben értjük, méréseinkhez jól illeszthetőek a modellek. A forradalmi változásokat elsősorban az észlelési lehetőségekben bekövetkezett technológiai ugrásnak, és az adatok feldolgozását, valamint a részletes szimulációkat lehetővé tevő informatikai fejlődésnek köszönhetjük. Ez a technológiai fejlődés, amennyire előre láthatunk, folytatódni fog. Számos nagyszabású terv van folyamatban, amelyek ha megvalósulnak, számos új műhold és gigantikus távcső fogja ontani az új mérési adatokat az elektromágneses tartomány minden részében, sőt, akár a gravitáció hullámain is észlelni tudjuk.

Persze szükségünk is van minél több adatra, hiszen ne feledkezzünk meg arról, hogy bár a modell körvonalai pontosan illeszkednek a mérésekhez, az energiamérleg nagy részét kitevő sötét energiáról és sötét anyagról vajmi keveset tudunk. Ahhoz, hogy a beáramló adatokat hatékonyan kezelni tudjuk, és ki tudjuk belőle hámozni a rejtélyek megoldását, sok-sok olyan lelkes jövődöntő kutatóra van még szükségünk, akik a hagyományos matematikai és szaktudományos ismeretek mellett fejlett informatikai tudással is fel vannak vértezve.

SZÉL HOZOTT, SZÉL VISZ EL

A Naphoz hasonló csillagok keletkezését külső hatások indítják el?

Tóth L. Viktor

ELTE FFI Csillagászati Tanszék,
MTA KTM Csillagászati Kutatóintézet

Jelentős szerepe van-e a külső hatásoknak a kis tömegű csillagok keletkezésében a pre-protosztelláris felhőmagok kialakulásától kezdve? – Igen. Állnak-e még a Sas-köd Hubble-űrtávcső által híressé tett felhőoszlopai? – Igen.

Kell-e nagyobb motiváció az indukált csillagkeletkezés vizsgálatához, mint az az 1970-es években körvonalazódott, és azóta széles körben elfogadott elmélet, miszerint a preszoláris csillagközi felhőben külső hatásra indult el a Nap és a Naprendszer kialakulása? Mintha csak a csillagok nevében szólna a költő:

„Köd előttem, köd mögöttem,
Isten tudja, honnan jöttem.
Szél hozott, szél visz el.
Minek kérdjem, mért visz el?”

Szabó Lőrinc, 1923, *Szél hozott, szél visz el*

A csillagközi anyag a Naprendszer közelében

A csillagok átmérőjéhez képest óriási távolságok vannak csillagok között. Egy csillagközi utazónak a (millió km-es) csillagátmérő 20 milliószorosát kell meg-

tennie. Ez az óriási tér nem teljesen üres, benne elektronokat, atomokat, molekulákat és a milliméter tized részénél kisebb porszemcséket találunk. A csillagközi gáz galaktikánkban a csillagközi pornál százszor nagyobb össztömeget képvisel, de a por mennyisége korántsem jelentéktelen: „Bölcs, vén könyvekben áll, hogy por vagyunk”, hogy egy szintén 1923-as keltezésű versre hivatkozzunk (József Attila, *Tanítások*). A csillagközi anyag helyi sűrűsödését nevezzük csillagközi felhőnek. Napunk és vele a Naprendszer égitestjei galaktikánk, a Tejútrendszer középpontja körül 27 ezer fényévnnyire köröz, 780 ezer km/h keringési sebességgel. Most éppen egy tőle eltérő sebességgel keringő csillagközi felhőfoszlányon száguld keresztül. A mi „Lokális felhőcskénk” (Local Interstellar Cloud, vagy Local Fluff) igen ritka, 1 literében csak 250–300 hidrogénatom van. Összehasonlításképpen a szobában beszippantott minden liter földi levegőben körülbelül $2,5 \cdot 10^{22}$ molekulát találunk. A 7000 K hőmérsékletű, körülbelül 15 fényév átmérőjű „Lokális felhőcske” egy 30–40 fényév átmérőjű kis felhőcsoportban van. (Ennek a csillagközi felhőcsoportnak a tagjait francia kutatók előszeretettel nevezik el az *Asterix* képregény szereplőiről.) Az emberi szemmel látható fény a csillagközi anyag porszemcséin szóródik és elnyelődik. A látóirányunkba eső csillagközi felhők mögötti csillagokat ezért halványabbnak látjuk, a leghalványabbak mintegy eltűnnek, „kihálnak”, ez a csillagközi extinkció jelensége. A mi „felhőcskénkénél” ezerszer–milliószor sűrűbb csillagközi felhők is vannak, de tőlünk kicsit távolabb, ilyenek a Taurus, az Ophiuchus és a Chamaeleon felhői. Ezek a sűrű (10^2 – 10^5 cm⁻³) és hideg (10–100 K hőmérsékletű) felhők 300–400 fényév távolságban, szinte falként övezik azt az üreget, amelynek forró (több százezer fokos) ritka gázában a „Lokális felhőcske” is úszik. Ezt a „Lokális buborékot” is nevezett üreget szupernóva-robbanás nyitotta a mi spirálkarunk csillagközi anyagában. Az ehhez hasonló, néhány száz fényév méretű csillagközi buborékok nem ritkák.

Csillagközi felhők és csillagkeletkezés

A Világegyetemben a hidrogén sokféle formában jelenik meg. Lehet atomos, lehet ionizált, protonra és elektronra szétválva, alkothat hidrogénmolekulákat (H₂), lehet más atomokhoz kapcsolódva különféle molekulák alkotórésze (pl. víz, ammónia, szénhidrogének). A csillagközi térben mindez előfordul, de hidrogén más elemekkel alkotott molekulái csak elhanyagolható tömeghányadot jelentenek a csillagközi gázban.

A hidrogén megjelenési formái szerint megkülönböztetünk atomos HI-felhőket, HII-zónákat és molekulafelhőket. Az elsőben a hidrogén nagyobb része atomos állapotú, a másodikban jelentősebb az ionizált hidrogén aránya, a harmadikban pedig a molekuláris állapotban levő hidrogéné.

Nem meglepő, hogy egy megfelelő méretű csillagközi felhő ritka gázát a tömegvonzás képes egyben tartani, hiszen a Föld tömege elegendő légköre gázatomjainak megtartásához. Egy a Földnél ezerszer nagyobb tömegű felhő mérete, a sűrűségarányoknak megfelelően, 8–9 nagyságrenddel (100–1000 milliószor) nagyobb a Földénél, ami néhány fényév átmérőt jelent.

A felhő saját tömegvonzásából számolható helyzeti energia és a gázzszemcsék (főleg hidrogénmolekulák) hőmozgásából eredő belső energia mellett jelentős a felhő belsejében kavargó turbulens mozgás energiája, illetve a mágneses tér energiája, a forgási energia. Ez utóbbi három stabilizálja a felhőket, ezért nem roskad össze szabadeséssel és lesz csillaggá minden galaktikus csillagközi felhő. A kényes egyensúlyt azonban külső hatások megbonthatják. Ekkor beszélünk indukált vagy triggerelt felhőkollapszusról. Izgalmas kérdés, hogy ezek a külső hatások mennyire jelentősek a csillagkeletkezésben.

A csillagközi anyag nagyléptékű szerkezete

– hurkok, buborékok

A galaktikus csillagközi anyag nagyléptékű alakzatainak felfedezésében már az 1970-es években közreműködtek magyar csillagászok. *Fejes István* (Kozmikus Geodéziai Observatórium, Péc) azonosított egy semleges hidrogénből álló héjat a Loop IV óriási hurokszerű struktúrával, annak rádiósugárzása (mágneses térben befogott elektronok szinkrotron-sugárzása) alapján [1]. A csillagközi anyag szerkezetét porszemcséinek hőmérsékleti sugárzása mérésével is feltárhatjuk. A porszemcsék 10–100 K hőmérsékletüknek megfelelően az infravörös tartományban sugároznak. A legelső infravörös hurkokat egy időben, de egymástól függetlenül fedezte fel és írta le egy amerikai és egy magyar kutatócsoport 1987-ben. Az eredményeket *P. R. Schwartz* és munkatársai az amerikai *Astrophysical Journal*-ban [2], *Kun Mária*, *Balázs Lajos* és *Tóth Imre* az európai *Astrophysics and Space Science* folyóiratban [3] publikálták.

Ezen magyar sikerek hatására az ELTE Csillagászati Tanszékén 1995-ben hallgatók bevonásával, tudományos diákköri munka keretében, elkezdtek az égbolt szisztematikus felmérését és infravörös hurkok egy katalógusának elkészítését. A kutatás folyamatos támogatást kapott az OTKA-tól. A csoport egykori tagjai közül *Kiss Csaba*, *Könyves Vera* és *Moór Attila* (MTA KTM CsKI) már megszerezte PhD-fokozatát, *Kiss Zoltán* pedig 2007-ben védi meg doktori dolgozatát. A katalógus legelső bejegyzését jelentő Cepheus–Cassiopeia-buborékot (GIRL 115+10,0) az ELTE-n folyó vizsgálatában a szerző további doktori hallgatói is közreműködtek: *iff. Horváth András* (ma tanszékvezető a győri Széchenyi Egyetemen) és *Nikolic Silvana* (ma a Santiagói Egyetem munkatársa Chilében).

Hurokkatalógus a teljes égboltra kiterjedően, és annak elemzése a hurkok kialakulása szempontjából

Az európai csillagászat vezető folyóirata, az *Astronomy and Astrophysics* 2004-ben címloldalán hozta kutatócsoportunk eredményét [4]. A 2004-es cikkünk szerint a Naprendszer környezetében a csillagközi anyagot az 1. ábrán látható és ahhoz hasonló óriási buborékok héjába söpörte egy eddig ismeretlen asztrofizikai folyamat. Az üregek belsejében szinte nincsen csillagközi por, azok fala viszont porban gazdag csillagközi anyagból áll. Az üreg poros falában számos nagy tömegű csillag és ionizált hidrogénből álló HII-zóna található, melyek jelzik a hurokkatalógus fontos „melléktermékét”, a hurkokkal asszociált objektumok katalógusát.

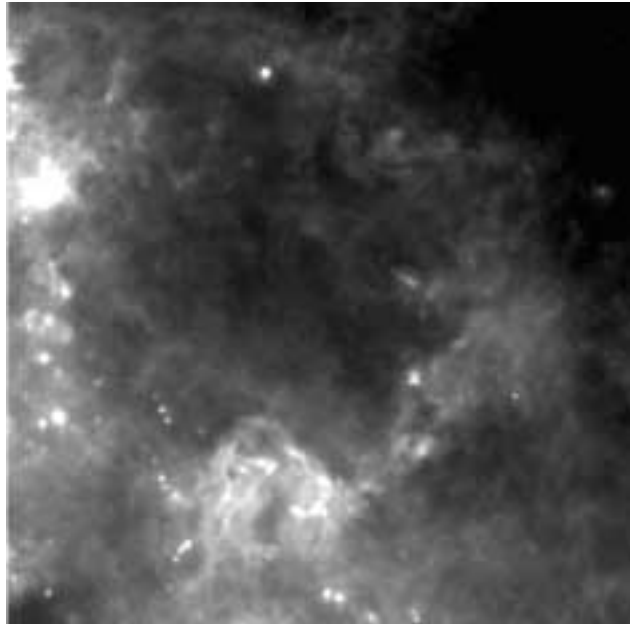
Kutatócsoportunk legfrissebb, 2007 márciusában megjelent elemzése már több mint 462 ilyen infravörös hurkot ír le [5]. Ezek szerint galaktikánk, ameddig az IRAS mesterséges holdon elhelyezett, infravörösben érzékeny detektorok láttak (kb. 3000–4000 fényévi távolságig), habfürdőre vagy ementáli sajtra hasonlít, hol jobban, hol kevésbé dominál az üregek térfogata.

Az infravörös hurkokról írt cikkünk rámutat arra is, hogy a galaktika szimmetriásíkja közelében a nagy tömegű csillagok szupernóva-robbanásai, attól távolabb pedig a csillagközi anyag turbulens mozgása alakítja ki a csillagközi anyag nagyléptékű szerkezetét. A *Galaktikus Infravörös Hurkok Katalógusa* a maga nemében egyedülálló. A korábbi hasonló összegzések kinematikai alapon próbáltak üregeket, rétegeket felfedni a csillagközi anyagban. Egy ilyen munka a prágai *Ehlerova, Palous* szerzőpár HI-üreg katalógusa [6], mintegy 800 táguló üreggel. A sebességviszonyokat mi nem szabtuk kiválasztási feltételül, ezért mi „láthattuk” a nem vagy csak kis (<8 km/s) sebességgel táguló héjakat is. A Tejútrendszer fősíkjától távoli, csillagközi anyag nagyléptékű szerkezetének turbulenciákkal való magyarázata jelentős új eredményünk, mely egy általános sejtést igazol mérési úton.

Trigger-jelenség megfigyelése

Az egyik legkézenfekvőbb példánk az indukált csillagkeletkezésre a Cepheus–Cassiopeia szupernóva-buborékba részben belemerülő L1251 jelű csillagközi felhő. Az egykor e felhőben keletkezett és ma a benne, körülötte megfigyelt fiatal csillagok korát és eloszlását, a felhő szerkezetét és dinamikáját több, részben magyar cikk vizsgálta [7, 8]. Ezek azt valószínűsítették, hogy a felhőn körülbelül 1 millió éve áthaladt lökéshullámfront nyomán alakult ki annak üstökös alakja, és növekedett meg a csillagkeletkezés határfoka.

A Hubble-űrtávcső egyik legnépszerűbb mozaik fotóján (2. ábra) a Sas-köd felhőit mint cseppkőoszlopokat látjuk. A „Teremtés oszlopai” hangzatos elnevezést kapott struktúráját az előbb említett L1251 felhő-



1. ábra. A Cepheus-buborék

hoz hasonlóan a felhőközi tér lökéshullámai és ionizáló sugárzása formálja. Az „oszlopok” csúcsain beágyazott fiatal csillagok („tojások a sasfészekben”) jelzik az indukált csillagkeletkezést, amit számos szakcikk taglalt. A *Lyman Spitzer* asztrofizikusról elnevezett amerikai űrtávcső infravörös felvételei alapján egy szupernóva és a Sas-köd felhőoszlopai közti kölcsönhatásról *Nicolas Flagey* (Institut d’Astrophysique Spatiale) francia doktori hallgató tanulmányából értesülhettünk. A 2006 végén publikált mérési eredmények alapján nem lehetett kizárni, hogy már el is söpörte egy közeli szupernóva-robbanás lökéshulláma akár a teljes látványos felhőcsoportot, csak 1000 fényév távolából mi még a pusztulást megelőző állapotot látjuk.

2. ábra. A Teremtés oszlopai a Sas-ködben



Trigger-jelenség modellezése

Amikor a forró, nagy tömegű csillag belsejében a hidrogén nagyobb része már héliummá alakult, a csillag anyagának nagy része egy pillanatszerű folyamatban szupernóvaként robban bele az általa korábban létrehozott üregbe. A robbanás közelében a csillagközi anyag teljes ionizációja és a felhők szétfoszlatása a jellemző. A lökeshullám, amit kelt, száz fényévreke tovaszánguld, és gyúrja, formálja az útjába kerülő csillagközi anyagot.

Hasonló esetet modelleztünk numerikusan a Zeus hidrokóddal a felhőparamétereket és a front sebességét széles skálán változtatva [9, 10]. Eredményeink szerint, ha a szupernóva lökeshulláma egy elég nagy méretű és távolabbi csillagközi felhőt ér, akkor jelentősen átalakítja ugyan a felhő szerkezetét, de nem fújja szét annak anyagát. A front és a felhő ütközése gyorsíthatja a felhőmag-keletkezést, ami a csillagkeletkezés legelső fázisa. A modell szerint az L1251 vagy a hasonló méretű Sas-köd szétosztatásához, a front sebességétől függően 10^5 – 10^6 évnél kell eltelnie, ez pedig elegendően jelentős felhőtömeg pre-protosztelláris felhőmagokba gyűréséhez. Ezt a modellt elfogadva nem aggódunk a Sas-köd felhőoszlopaiért, pusztulásuk híre csak „egy kacsa volt a sasfészekben”. A francia kutatók honlapjukon már ezt a módosított verziót közlik.

Jelentős-e általában a külső hatások szerepe?

A Cepheus terület extinkciójának felmérését a USNO (US Naval Observatory) fotometriai katalógusa 2MASS (Two Micron All Sky Survey) infravörös katalógus elemzésével végeztük el. A Cepheus területen több mint 200 csillagközi felhőt azonosítottunk, az extinkció eloszlása alapján a felhők szerkezetét is meghatároztuk, jellemzésükre és automatikus osztályozásukra paramétereket vezettünk be. A Cepheus fler és vidé-

kén nyert legfontosabb tapasztalatunk, hogy a sűrű és a ritka csillagközi anyag határának régiójában nagyobb tömegű, strukturáltabb felhők vannak. Ezekben zajlik a csillagkeletkezés zöme [11, 12].

A sűrű és a ritka csillagközi anyag határait jól jelző infravörös hurkokban a fiatal csillagok számában és a felhők strukturáltságban is kimutattunk többletet. A csillagtöbbletet olyan hatás okozza, amely már a csillagkeletkezés legkorábbi fázisa, a felhőmagok kialakulásától kezdve jelentős. A felhők hasonló valószínűséggel keletkeznek minden tartományban, ahol a csillagközi anyag rendelkezésre áll. Jelen értelmezésünk szerint a felhőkben a gravitációsan kötött felhőmag kialakulásának karakterisztikus ideje millió év nagyságrendű. Emiatt lassú folyamat a csillagkeletkezés. A sűrű és ritka tartományok határretegeiben ez az idő rövidül le akár 1 nagyságrenddel. A galaktikus sűrű korongban a csillagközi anyag tömegének több mint harmada határretegekben van, ezért jelentős a triggerelt felhőmag- és csillagkeletkezés.

Irodalom

1. Fejes I., *Astronomy & Astrophysics* 15 (1971) 419.
2. Schwartz P.R., *Astrophysical Journal* 320 (1987) 258.
3. Kun M., Balázs L., Tóth I., *Astrophysics and Space Science* 134 (1987) 211.
4. Kiss Cs., Moór A., Tóth L.V., *Astronomy & Astrophysics* 418 (2004) 131.
5. Könyves V., Kiss Cs., Moór A., Kiss Z.T., Tóth L.V., *Astronomy & Astrophysics* 463 (2007) 1227.
6. Ehlerova S., Palous J., *Astronomy & Astrophysics* 437(2005) 101.
7. Kun M., Prusti T., *Astronomy & Astrophysics* 272 (1993) 235.
8. Tóth L.V., Walmsley C.M., *Astronomy & Astrophysics* 311 (1996) 981.
9. Horváth A., Tóth L.V., *Astrophysics and Space Science* 233 (1995) 169.
10. Horváth A., Ziegler U., *Astronomy & Astrophysics* 349(1999) 595.
11. Kiss Z.T., Tóth L.V., Krause O., Kun M., Stickle M., *Astronomy & Astrophysics* 453 (2006) 923.
12. Tóth L.V., Kiss Z.T. in *Triggered Star Formation in a Turbulent ISM*. (ed. B.G. Elmegreen, J. Palous) Cambridge Univ. Press (2007) 124.

SZÁZÖTVEN ÉVE HULLOTT A VILÁGHÍRŰ KABA-DEBRECENI LEBKŐ

Nagy Mihály
Debreceni Református Kollégium

„Mily rövid az élet!...
Mint hullócsillag futása,
Mely földünk körébe jutva,
Lángra gyúl, és tűz-barázdát
Írva elszalad, gyorsabban,
Mint egyet pillantanál,
Útja honnan jött? Hová visz?...
Míg *sötét* volt, s újra *az* lesz,
A világ-űr végtelenjén
Hol bolyongott? És hová fog?...
Ki tudná megmondani!
Míg *tündöklött*, addig élt.”
Arany János: *Honnan és hová?* (részlet)

A százötven éves évforduló alkalmat kínált arra, hogy a Debreceni Református Kollégiumban őrzött nevezetes kő, amelyet a tudományos körök régóta számon tartanak, most a közérdeklődésbe is bekerüljön. Bemutatjuk, mivel szolgált rá hírnevére a kabai meteorit, és összefoglaljuk a százötven éves évforduló eseményeit.

Meteorok, meteoritok

Az égből hullott kövek, másként hullócsillagok régóta izgatják az emberek képzeletét. Nyáron, augusztus tizedike körül egy csillagos éjszakán, ha figyeljük az

égboltot, kis szerencsével néhány perc alatt rövidebb-hosszabb fénycsíkokat láthatunk, amelyeknek a haladási iránya rendszerint megegyezik. Ezek a légkörbe bekerült, a sűrűlódástól felizzó meteoritok nyomai.

A meteorok is a Naprendszerhez tartoznak, és, a Földhöz hasonlóan, a Nap körül keringenek, pályájukon akár találkozhatnak is a Földdel. Ilyenkor bekerülhetnek a Föld légkörébe, és ott a nagy sebesség következtében látványosan felizzanak. A kisebb darabok teljesen elégnak, a fénycsík megszakad. A nagyobb darabok a felhevülés következtében szétrobbanhatnak. Ha ez az esemény nem nagy magasságban történik, egyes darabok elérhetik a Föld felszínét.

A Föld felszínét elérő meteoritot *meteorit*nak nevezük. A mikrometeorokból naponta több tonnányi hullik a Föld felszínére. Ezek a viszonylag kis sebesség következtében nem izzanak fel, tehát vizuálisan nem figyelhetők meg, és a Föld felszínén utólag sem könnyen azonosíthatók. (A mesterséges holdak nap-elemtábláin azonban összegyűlnek, ezért időnként meg kell tisztítani azokat ettől a kozmikus portól, hogy hatásfokuk ne csökkenjen.)

A jelenleg általánosan elfogadott elmélet szerint a meteoritok kisméretű égitestekből keletkeztek kozmikus katasztrófák következtében [1]. A kiszakadt darabok, legyőzve a gravitációt, elhagyták az anyaégitest vonzaskörét, és önálló, Nap körüli pályára kerültek.

A meteoritok fajtái

A földre hullott meteoritok között a két szélső típust a fém- és a kőmeteoritok jelentik, de megtalálhatók az átmenetet jelentő darabok is.

Jó esetben az észlelés és a meteorit megtalálása egybe esik, vagy csak kevés idő telik el a két esemény között. Ilyenkor van a legnagyobb esélye a megtalálásnak. (A tartósan hóval borított területeken, például magas hegyeken, vagy a Föld pólusain ugyancsak könnyebb meteoritokat gyűjteni.) A fémmeteoritok épen megmaradhatnak akár évszázadokig is, mivel a vas-nikkel ötvözet, amiből ezek a meteoritok állnak nem, vagy csak alig oxidálódik. Már a hulláskor széttrörik viszont a kőmeteoritok egy része. Ezeket a meteoritokat nehezebb felismerni, mivel a földi romboló hatásoknak (oxidáció, nedvesség) kevésbé állnak ellen.

A meteoritok harmadik csoportja átmenetet alkot a fém- és a kőmeteoritok között, éles határ nincs. A fémmeteoritok általában kevés fémszulfidot is tartalmaznak, a kőmeteoritokban pedig elemi állapotú fém is előfordulhat.

A szenes kondrit típusú meteoritok

A kőmeteoritok két nagy csoportra, a kondritokra és az akondritokra oszthatók. A kondritok apró, legfeljebb egy centiméter átmérőjű gömböket, görögül kondrumokat tartalmaznak, finomszemcsés, laza, sötét színű alapanyagban. Az akondritokból ezek a gömbszerű képződmények hiányoznak, olvadékból



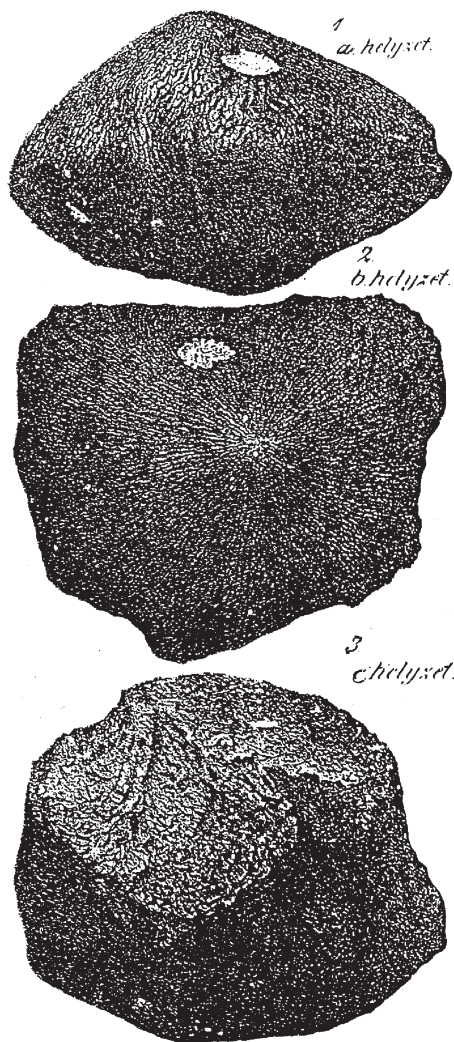
1. ábra. Fehér zárvány a kabai meteorit orr-részén. Lepattant róla az olvadási kéreg.

megszilárdult, egységes szerkezetűek. Az elképzelések szerint a kondrit típusú meteoritok őrizték meg a Naprendszer anyagának ősi állapotát. Egy kisbolygónak olyan felszíni rétegéből keletkeztek, amelynek anyaga még nem hevült fel egyik összetevőjének olvadáspontjáig sem.

A kondrit típusú meteoritok néha kevés, elemi állapotban levő szenet is tartalmaznak. A kabai meteorit is ilyen, széntartalma megközelíti a két százalékot [2]. Jellegzetességei közé tartoznak még az úgynevezett fehér zárványok, amelyek néhány milliméter széles és egy-két centiméter hosszú résekbe kristályosodtak. Ezek között valószínűleg a legnagyobb az, amelyik a meteorit kúpos orr-részének oldalán tűnik a szemünkbe. Felületének erről a részéről az olvadási kéreg letöredezett (1. ábra). A vizsgálatok szerint a fehér zárványok anyaga főleg a kétezer fok fölött olvadó spinellből áll. A spinell oktaéder alakú, szépen fejlett, színezett kristályait ékkőnek használják. A meteoritban egy apró szemcsés, szürkésfehér színű változat található. A nevezetességek egyike az is, hogy spinellt egy meteorit anyagában első ízben a kabai meteoritban mutattak ki [2].

Korabeli híradások a meteorit becsapódásáról és megtalálásáról

„A mult 1857-ik év april 15-kén estveli 10 óra tájban Kaba helységnek egyik jómódú és értelmes lakosa Szilágyi Gábor aludt a háza előtt, tehát a szabad ég alatt, midőn is egy sajátoz zőrej által, – mely az ő kifejezése szerint a mennydörgéstől egészen különböző volt – álmából fölriasztatott, s ekkor látott, egyébként felhőtlen ég és szélcsendes idő mellett, egy szerinte kocsis nagyságú, vakító fénnel világító tüzes testet, mely Földes helység felől, tehát délkeleti irányból jöve, ívképző útját mintegy négy másodperc alatt bevégezte. Ezen tüneményt több szomszéd, sőt távolabbi helységek lakosai is észlelték, nevezetesen debreceni és kardszagi lakosok is. Más



2. ábra. A kabai meteoritról Mariotte fényképész által, fotók alapján készített rajzok.

nap korán reggel Szilágyi Gábor a tanyájára lovagolt ki, mikor is útközben lova egyszer hirtelen neki bokrosodva horkolni kezdett, s tovább menni nem akart; ő pedig a szekér-járta úton megpillantott egy fekete követ, mely a kemény földbe annyira be volt nyomulva, és ékülve, hogy fölülte éppen a földdel színelt. A föld a kő körül be volt horpadva és megrepedezve. Kén- vagy egyéb szagot Szilágyi Gábor ekkor nem vett észre. E fölfedezés dacára Szilágyi folytatta útját és csak estve felé tanyájáról visszajöve ment ki több szomszédokkal és nézőkkel a hely színére ásóval és kapával fölfegyverkezve s a lebkövet kiásta. A sértetlen lebkő Szilágyi szerint 7 fontot nyomott, de élei és csúcsai több helyütt, valószínűleg nemes fémek kutatása tekintetéből, leüttetvén s a lakosok által széthordatván, a helységi előljárók kegyeletéből gyűjteményünkbe jutott főtömeg jelenleg éppen 5 és $\frac{1}{4}$ fontot¹ nyom.”

A fenti ízes és szemléletes leírás, amelynek éppen ezért a helyesírásán sem változtattunk, *Török József*-

¹ Egy bécsi font ötszázhatvan gramm, tehát a meteorit tömege három kilogramm körül lehetett.

nek, a Debreceni Református Kollégium orvosának és természetrajz tanárának megfogalmazásában maradt ránk. A szöveget 1858. június 7-én, a Magyar Tudományos Akadémián olvasta fel [3]. Török József ezen alkalommal az Akadémián a meteoritot és annak *Mariotte* fényképész által, fotók alapján, három oldalról készített rajzát (2. ábra) is bemutatta.

Egy másik korabeli híradás szerint [4] „April 15-én dühöngött szélvihar alkalmával Kaba város határán ... a mezőről hazatérő több mezei munkás szemeláttára saját szerű zúgó dörgés közt egy hat fontos *leb-kő* (meteor) esett le, a szemtanúk állítása szerint égve a levegőből. Mi állományát illeti, apró gömbölyű fekete kavicsokat lehet benne megkülönböztetni, itt-ott fehér kovagrészecskék, és porhanyó szürke, lyukacsos területcskék tűnnek fel; küloldalain mindezen részek összefolyva, barna mázt vonnak az egészre, mi csakugyan égésre mutat. Az egész rendetlen alakú; egy tökéletesen kifejlett, s két más kifejletlenebb csúcsról azonban azt lehet következtetni, hogy egy 6 csúcsú alak volt belőle készülöben. ...”

Az utolsó mondatban megfogalmazott következtetés inkább találgatás, ma már azt is aligha tudjuk eldönteni, hogy „szélcsendes idő” volt valójában, vagy „szélvihar dühöngött”.

A kabai meteorit „szerencséje”, hogy a „hullás” közben és a földet éréskor épen maradt, és az is, hogy hamar megtalálták. (A mi meteoritunk megtalálását Szilágyi Gábor kabai gazdának, vagyis inkább a lovának, köszönhetjük.) Szerencsés körülménynek mondható az is, hogy a hullás és a megtalálás között nem volt eső, és a talaj felső rétege is száraz volt. A meteorit ugyanis, laza szerkezete miatt, a nedvességtől megduzzadva könnyen szétomolhatott volna.

Az egyik leírásból kitűnik, hogy a meteorit kondritos jellege („apró, gömbölyű, fekete kavicsok”) már a megtaláláskor felkelte az érdeklődést.

Az első leírás és a szervesanyag-tartalom felfedezése

A meteorit első leírása, amely a vegytani elemzésre nem terjed ki, Török Józseftől származik, akárcsak a megtalálás történetének ismertetése [3, 5].

A meteorit kéreg alatti szerkezete a megtaláláskor belőle leütött kisebb darabok által vált megfigyelhetővé. Az erről szóló leírásból érdemes idézni:

„Mi végezetre a hátsó tőrlapot illeti... a lebkő belső tömegének színe sötétszürke. Ezen sötétszürke tömegben számtalan apróbb és nagyobb fehérszínű pontok és foltok láthatók, melyek közül néhány szinte babnagyságú. ... Végre találtnak az alaptömegben számtalan kisebb nagyobb köles-borsszemnyi nagyságú, tiszta fekete színű golyócskák v. tekecskek, melyek közül némelyek héjas szerkezetűek. Ezen golyócskákat az alaptömegeből meglehetősen könnyen lehet kiválasztani, mikor is ... kerekded gödröcskék maradnak vissza. Ezen gödröcskék és golyócskáknál fogva az alaptömeg némileg az ikrakőhöz hasonlít.”

A leírásból kitűnik, hogy Török József már az első alapos szemrevételezés alkalmával felismerte a meteoritban a kondrumokat, azok héjas szerkezetét, valamint a fehér zárványokat is. Az ikrakővel való hasonlóság (amely a limonit és a kalcit egyes megjelenési formáira jellemző) túlzás ugyan, de a szabályos gömb alakú képződmények megjelenése meteoritban nemcsak Török szerint volt „páratlan nevezetesség”, ma is az.

1858 augusztusában *Hörnes Móric*, a bécsi Mineralógiai Kabinet igazgatója levelében azt javasolja *Balogh Péter* tiszántúli református püspöknek, hogy a meteorit vegyelemzését *Friedrich Wöhler* göttingeni német vegyészrel végeztessék el. Wöhler korának európai hírvégyésze volt. Nevéhez fűződik az első szerves szintézis – laboratóriumban állított elő karbamidot (egy fehérjelebomlási termék) 1828-ban. (Wöhler ezzel megdöntötte a *vis vitalis* (életerő) elméletét, amely szerint szerves vegyület csak élő szervezetben jöhet létre.) Nevét egy ritka ásvány, egy cirkónium tartalmú szilikát, a *wöhlerit* is őrzi. Ebben az időben már meteorit elemzéseivel is tekinthető szerzett.

Török József szerint a Wöhlernek szánt mintát fűrész és véső segítségével választották le. Ennek a fűrészelésnek a nyoma a meteoriton jelenleg is látható, és egyenetlen volta miatt jól megkülönböztethető a későbbi, jóval keményebb, gyémántbetétes vágószerszámok nyomaitól.

Wöhler a kétszer is elvégzett elemzés eredményeiről a *Német Tudományos Akadémia Közleményeiben* számolt be [6, 7]. Első közleményében leginkább a meteorit kémiai összetételével foglalkozik. A kémiai elemzés összesítésénél az elemi szén mellett másfél százalék ismeretlen anyagról tesz említést, amiben benne van a szerves anyag is. Befejezésül megjegyzi, hogy a meteoritok megolvadt felszíne és szervesanyag-tartalma nem zárja ki egymást. A meteorit a légkörön való áthaladásakor csak rövid ideig van nagyobb felmelegedésnek kitéve, és csak a felülete olvad meg.

Hoffer András, a Debreceni Református Kollégium tanára, egy tanulmányában írt a kabai meteorit történetéről [8]. Ebben olvasható, hogy Wöhler első közleményének egy dedikált példányát sikerült tanulmányoznia a Magyar Nemzeti Múzeum ásványtárában. A címlapon Wöhler kézírásával ez volt olvasható: „Barátjának, Th. Scherernek, a szerző.” A közlemény végén, ugyancsak kézírással, Wöhler a következőket írta barátjának: „Török professzortól Debrecenből később még kaptam ennek a kőnek a töredékeiből egy kis mennyiséget, amellyel egy bitumenes anyag jelenlétét ismételtelen bizonyossággal igazolni tudtam. Olyan anyagét, amely a mi földi tapasztalataink szerint csak szerves eredetű lehet. Nagyon hasonlít a földviaszfajokhoz: ozokerithez, schererithez stb. Közelebbit abból a nagyon kis mennyiségből nem tudtam megállapítani.” Ez a szöveg Wöhlernek a meteoritról megjelent második közleményében is megtalálható.²

² Valamivel később, mint a kabaiban, Wöhler ugyanezt a szerves anyagot mutatta ki a húsz évvel korábban hullott Jöreménység-foki meteoritban is.

Wöhler az elemi széntartalmat 0,58%-nak adja meg, a szénhidrogén-tartalomra nem közöl pontos adatot. *Sztrókey* az előbbi 1,99%-ban, utóbbit, nem méréssel, hanem számításon módszerrel, 4,03%-ban adja meg [2]. A széntartalom Sztrókeynél feltehetően a szénhidrogénben levő szenet és a meteorit elemi széntartalmát együttesen jelenti.

Tudománytörténeti érdekesség, hogy a vis vitalis elméletet huszonnyolc éves korában megdöntő tudós harminc évvel később, amikor a kabai meteoritban kimutatta a szerves anyagot, kijelenti, hogy azt csak élő szervezet hozhatta létre.

Minden esetre, a szénhidrogén-tartalom kimutatása – meteoritban először – a kabai meteoritot egy csapásra világhírűvé tette.

Nevezetes események a meteorit történetéből

A meteorit történetét tanulmányozva tanulságos volt számomra, hogy a meteorit megmaradása, Debrecenben, a Református Kollégiumban maradása, illetve a feldarabolástól való megóvása – miközben a tudományos kutatás igényeit is figyelembe kellett venni – milyen szoros kölcsönhatásban volt a környező társadalom történetével.

A kabai polgárokat és az előljáróságot még százötven év múltával is elismerés illeti, hogy bár saját hasznát nem remélhettek (meggyőződtek róla, egy kis darab leütésével, hogy nemes fémet nem tartalmaz), mégsem dobták ki, hanem a környék tudományos centrumába, a lelkesképzéséről és természettudományos oktatásáról egyaránt méltán híres Debreceni Református Kollégiumba vitték abból a megfontolásból, hogy ha a leletnek van tudományos jelentősége, azt ott biztosan tudni fogják.

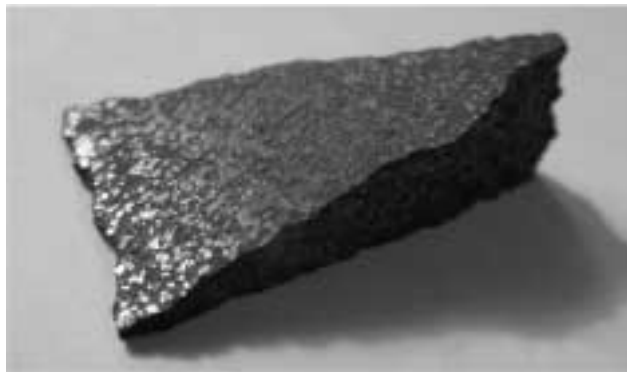
A Kollégiumban az első írásos feljegyzést az 1857. április 15-én hullott meteoritról az éppen két héttel később, április 29-én tartott tanári kari ülés jegyzőkönyvében találjuk [9]. A rövid bejelentés és határozat szövege:

„116. Tek. Török József úr bemutatja e f. hó 15-kén Kaba helység határában leest, s a kabai előljáróság által a főiskolai museum részére ajándékozott, öt fontnál többet nyomó meteorkövet.

Hálás köszönettel vétetik, s a köszönetnek levélben kifejezésére jegyző megbizatik.”

1857-et írtak akkor, mindez nyolc évvel az 1848-as szabadságharc bukása után, de még tíz évvel a kiegyezés előtt, a Bach-korszak közepén történt.

A meteorit hullásáról a Bécsi Császári és Királyi Mineralógiai Kabinet valószínűleg újsághírből értesülhetett, és nem sokáig késlekedett az intézkedéssel sem. Az 1857. augusztus 12-én kelt, 1178-857. számú rendelettel utasította *Csorba Jánost*, Debrecen polgármesterét, járjon el a Kollégium vezetőségénél a meteorit Bécsbe küldése tárgyában. A bécsi levél nem maradt fenn, arról csak a polgármester öt nappal későbbi keltezésű leveléből tudunk, amelyet *Búzás Pálnak*, a Főiskola igazgatójának írt. Inkább a sorok között, mint a leírt szövegből



3. ábra. Fém-kő meteorit. (Lutahar, Bazaar, India, 1861.) Csere a British Múzeumtól.

derül ki, hogy nehezeére esett az utasítás végrehajtása. Idézet a levélből: „Felhívom tehát Igazgató Tanár urat, hogy ha a kérdéses meteor a Collegium muzeumába adatott volna be, szíveskedjék a Collegium annak leg-alább egy részét Bécsbe leendő juttatás végett, városi kiadó Tikos József úrnak által adni.”

A tanári kar szeptember 28-án azt a határozatot hozza, hogy a meteoritból nem vágnak le, hanem a kabaiaik által letört és utólag bekért darabokból küldenek Bécsbe, összesen 39 grammot. Ezzel azonban Hörnes Móric, a Mineralógiai Kabinet igazgatója nem volt elégedett. 1858 januárjában levelet küldött, most Balogh Péter helyettes szuperintendensnek. (*Szoboszlai Pap István* püspök 1855-ben bekövetkezett halála után a protestánsok egészen 1860-ig nem választhattak püspököt.) Hörnes a levélben az egész meteorit Bécsbe küldését kéri. A tanári kar a kérést megtárgyalva, nem vállalja a kő felküldését, Balogh Péter pedig – feltehetőleg szándékosan – elfelejt a levélre válaszolni.

1858. július 11-én Hörnes újabb, formálisan udvari- as, valójában fenyegető hangú levelet ír Balogh Péternek [10]. Idézünk a levélből: „Ön – sajnos – úgy látszik, még nem tudott időt találni arra, hogy levelemre válaszoljon. Mint ahogy Ön első levelemből kiveheti, a Császári Tudományos Akadémia engem nevezett ki eme tárgy referensének s az én kötelességem, hogy arról jelentést tegyek. Arról a kis töredékről, amit a Császári Akadémia kapott, lehetetlenség a kőnek meteorit voltát bizonyossággal megállapítani ... Megismétlem azért kérésemet, hogy a nevezett 6 font súlyú meteorikövet tessék hivatalból a császári és királyi udvari mineralógiai kabinetnek beküldeni, hogy a kő valódi volta megállapíttassék. ... Egyébként talán nem is tudja Ön, hogy törvényeink szerint minden ilyenféle lelet leadandó a koronának.”

A levélnek volt utóirata is: „P. S. Ha 14 napon belül választ nem kapnék, kényszerítve leszek további lépések megtételére.”

Balogh Péter válasza most egy hét alatt megszületett [10]. Ebből is idézünk: „Nagyságos Uram! Sajnálom, hogy az Ön nagybecsű levele hosszabb távollétem miatt mindeddig válaszolatlan maradt. Nagybecsű levelét az akadémiai tanári karnak adtam át válaszadás végett, az azonban az Ön kívánságának teljesítésé-

sét hatáskörén kívül esőnek látta. ... Egyébként ajánlatát szívesen az egyházkerületi közgyűlés elé terjesztem s Önt a határozatról annak idején értesítem. Hogy pedig Nagyságod a Császári Tudományos Akadémiában jelentést tehessen, bátorkodom a cs. kir. Udvari ásványtani kabinet részére mellékelni a kaba-debreceni meteoritnak dr. Török József úrtól való ásványtani leírását és három oldalról készült fényképét. ... Balogh Péter h. superintendens.”

Ezek után, talán hatalmának korlátait felismerve, ajánlotta Wöhlert a debrecenieknek a meteorit anyagának kémiai elemzésére. A már ismertetett eredmények nyomán a meteorit világhírűvé vált, de ez felélesztette a félelmeket Hörnes beígért „további lépései”-től.

Az alábbi történetnek írásos nyoma nem maradt, de talán mégsem egészen légből kapott.

Szájhagyomány és a későbbi családi levelezés szerint, a meteoritot a bécsi udvar akár erőszak árán is meg akarta szerezni gyűjteménye számára. A budai helytartó tanács állítólag a debreceni csendőrség segítségét kérte, hogy a Bécsből érkező személy számára a meteorit megszerzését – ha kell – karhatalommal is biztosítsa. A csendőrsegről egy volt diákja értesítette egykori iskoláját. A meteorit ezt követően eltűnt. Keresték a követ nemcsak a Kollégiumban, hanem a tanárok lakásán, többek között Török Józsefnél és *Kovács Jánosnál*³ is, eredmény nélkül. A kiegyezés előtt, mikor a politikai helyzet enyhülni kezdett, a kő nagyobb feltűnés nélkül visszakerült a helyére.

Egy egészen másféle hangvételű levélváltásról is essék szó. 1863-ban *Maskelyne*, a British Múzeum ásványtárának igazgatója, levelet írt Balogh Péternek, aki ekkor már megválasztott püspök és debreceni lelképásztor volt. Maskelyne gyűjteményük számára egy kis mintát kért és kapott a híres meteoritból. Az 1864. január 26-án kelt köszönő levélben többek között ezt olvassuk: „Ön szíves volt igazságérzetemre és nagylelkűségemre bízni, hogy a Debreceni Kollégiumnak – meteorit darabokban – olyan ellenértéket küldjek, amelyet én értékben viszonzásnak minősíthetek a Kollégiummal szemben. ... Duplumaink közül olyan mintákat választottam, amelyek bemutatására szolgálnak amaz idegen égitestek minden fő változatának ... kövek, vagy vasak, vagy mindkettőnek keverékei.” [8]

A kilenc különböző hullásból származó gyűjtemény együttes tömege megközelítette a hatszázötven grammot. Ezek a meteoritok egy kivételével ma is a Kollégium birtokában vannak (3. ábra).

Még egy cseréről tudunk a 19. századból. Az Erdélyi Múzeum Egyesület 1882 nyarán a kabai meteoritról lepattant két, együttvéve sem egészen ötgrammos darabkájáért a Mócs környékén néhány hónappal korábban hullott meteoritból egy 432 grammos, olvadási kéreggel borított darabot küldött a Kollégiumnak (4. ábra).

³ Egykor diákja, 1856-tól pedig negyven éven át természettanára volt a Kollégiumnak.



4. ábra. Kőmeteorit. (Mócsi járás, Kolozs megye, 1882.)

Az 1950-es évekig csend volt a meteorit körül. Aztán 1951 és 1958 között több mint ötven grammal csökkent a meteorit tömege.⁴ Két mintavételről sikerült feljegyzést találnom, a közölt mennyiségeknél azonban mintegy négy grammal nagyobb volt a meteorit tömegcsökkenése. Az egyik levágásnál a kérés és az engedély is „néhány gramm”-ról szólt, a levágott darab pedig 37 (!) grammra sikerült. 1963-ban ismét kérés érkezett az egyházi főhatósághoz. A levágásnál (20,9 gramm), a Kollégium Gimnáziumának természettudományokat tanító fiatal tanáraként én kaptam a feladatot, hogy az MTA Atommag Kutató Intézetébe, a minta leválasztása végett elszállítsam a meteoritot. Ezt követően, több mint harminc évig nem került sor újabb mintavételre a meteoritból.

A százötven éves évforduló eseményei

A százötven éves évforduló eseményeinek szervezését a pénzühiány akadályozhatta, a lelkesedés azért sok mindent pótol. Az újságok, rádió- és TV-csatornák szenzációként tálták a jubileum eseményeit. Kevesen lehettek Debrecenben és környékén, akik áprilisban semmit sem hallottak a kabai meteoritról.

A megemlékezés programját a *Református Kollégium* és a „*Varázskuckó, Debrecen*” *Természettudományos Játsszóház Alapítvány* szervezte. A továbbiakban ebből idézünk fel néhány fontos momentumot.

Április 12-én sajtótájékoztató volt a Református Kollégium kis tanácstermében. A terem teljesen megtelt, az eseményeket ismertető rövid tájékoztató anyag pillanatok alatt elfogyott.

A *Meteorit-napok* megnyitása április 13-án a Dóczy Református Gimnázium zsúfolásig megtelt dísztermében volt. A nap fő eseménye *Nagy Mihály, Kirsch Éva: A Kaba-kő titka* című, az évfordulóra írt színjátékának

⁴ Hoffer András szerint a kabai meteorit tömege 1928-ban 2686 gramm volt [8].



5. ábra. A kabai meteorit képe a kúpos orr-rész felől fotózva.

bemutató előadása volt – természetesen amatőr diákszínjárszókkal. A tizenöt jelenetből álló játékkal a két fizikatanár szerzőnek az volt a célja, hogy a tudománytörténeti szenzációt a fiatalabb korosztály számára is befogadhatóvá tegye. A díszterem közönsége lelkes tapssal köszönte meg a produkciót a diákoknak. Két nappal később Kabán, az ottani nézők előtt aratott sikert a színjáték. (Április 26-án, Debrecenben, egy harmadik előadás is volt. A nézőtérben feltűntek a Debreceni Egyetem tanárai és az ATOMKI kutatói is. Némelyek közülük, az utóbbi évtized meteoritkutatásaiban résztvevők, bizonyosan meglepődtek, amikor a színpadon őket megjelenítő diákszereplővel szembesültek.)

Április 15-én, a hullás napján a Református Kollégium Csokonai szobájában *meteoritkiállítás* nyílt. Tizennyolc hullásból származó mintegy negyven, a Kollégi-

6. ábra. A kabai meteorit képe oldalról.



umban őrzött kisebb-nagyobb meteoritmintát tekinthetett meg a szépszámú érdeklődő (5., 6. ábra).

A kiállítás megnyitásának napján egymás mellett volt látható az eredeti kabai meteorit és a néhány nappal korábban elkészült jó minőségű másolata, feladva a leckét a nézőknek, melyik az igazi.

Délután a megemlékezés Kabán folytatódott. A meteorit már említett, erre az alkalomra készített másolatát *Fekete Károly*, a Hittudományi Egyetem professzora és Nagy Mihály fizikatanár, a Református Kollégium Gimnáziumának volt igazgatója ünnepélyes keretek között adták át a város polgármesterének.

A kabai meteoritról rendezett *tudományos ülésszakra* került sor április 16-án délután, a Kollégium Dísztermében. Az ülésszak levezető elnöke *Kiss Árpád Zoltán*, az MTA Atommagkutató Intézetének tudományos tanácsadója volt.

Az első előadó *Kálmán Béla*, az MTA Napfizikai Observatóriumának főmunkatársa volt, *A Naprendszer, ahogy ma látjuk* címmel tartott előadást. *Rózsa Péter*, a Debreceni Egyetem Ásvány- és Földtani Tanszék docense előadásának címe *A Naprendszer vándorai, a meteoritok* volt. Nagy Mihály a *kabai meteorit rövid történetét* foglalta össze. A negyedik, utolsó előadást *Bérczi Szaniszló*, az ELTE docense tartotta, *Vizsgálatok a kabai meteoriton* címmel.

Befejezésül a meteoritkiállítás vendégkönyvében olvasható egyik bejegyzést idézzük: „Kislánykoromtól sokat hallottam erről a különleges meteoritról Kabán született és élt nagyszüleimtől. Különleges élmény saját szememmel látni.” Az aláírásokból kiderült, hogy az édesanya kisfiával együtt tekintette meg a kiállítást.

A kabai meteorit története immár négy nemzedék érdeklődését tartja ébren.

Irodalom

1. Bérczi Sz.: *Kis atlasz a Naprendszeréről (1)*. Budapest, 2000.
2. Sztrokyay, Tolnay, Földváriné: A kabai meteorit. *Földtani Közlemény XCI. 2. Füzet* 197.
3. Török József: Értesítés a kaba-debreceni lebkőről. *Magyar Akadémiai Értesítő XVIII.* (1858) 313–318.
4. Meteor-kő. *Vasárnapi Újság IV.* 18. sz. Pest, 1857. május 3. 152.
5. Török J.v.: Ueber den Kaba-Debreczin-Meteorit. *Poggendorff's Annalen d. Physik 105* (1858) 329.
6. Wöhler C.M.: Über die Bestandteile des Meteorsteines von Kaba in Ungarn. *Sitzungsber. der math. Naturw. Cl. D. Akademie der Wissenschaften in Wien 33* (1858) 205.
7. Wöhler C.M.: Die organische Substanz im Meteorsteine von Kaba. *Sitzungsber. Der math. Naturw. Cl. D. Akademie der Wissenschaften in Wien 34* (1859) 7.
8. Hoffer András: A kabai meteorit története. *Debreceni Szemle II.* 1928. jún. 332–346.
9. TIREL. II. 1. d. 15 *Tanárkari gyűlések jegyzőkönyve*. 1856–57. isk. év, 116. szám.
10. TIREL. II. *Közgyűlési iratok*. 1858/2829.

REZGŐ TÜKRÖK A KVANTUMVILÁG HATÁRÁN

Geszi Tamás

ELTE TTK, Komplex Rendszerek Fizikája Tanszék

A nanomechanika – a mikrométernél kisebb eszközök mechanikája – óriási lendületet vett az utóbbi évtizedekben [1]. Kicsiny, rugalmas nyelvek kihajlásának észlelésén alapul a pásztázó atomerő-mikroszkópia számos változata, köztük az egyes paramágneses elektronspineket is érzékelni képes mágneses erődetektor [2]. Ha majd sikerül az érzékenységet odáig fokozni és a termikus zajt annyira kicsívni, hogy az eszköz már magspineket is érzékelni tudjon, az a szerkezeti kémia forradalmi megújulásához vezethet.

A fizikai alap kutatás világa – *Marshall* és munkatársai 2003-as úttörő cikkét [3] követő rövid szélcsend után – a 2006-os évben kezdte komolyan venni, hogy a nanomechanikai oszcillátorok a kvantummechanika alapvető tulajdonságainak megértésére irányuló vizsgálatoknak is új és nélkülözhetetlen eszközeit jelenthetik.

A kihívást a kvantummechanika és a klasszikus mechanika közötti átmenet természetének megértése jelenti. Az anyaghullámok rövidhullámú határesetre – a jól ismert WKB-közelítés – csak annyit mond, hogy ebben a határesetben a hullámcsomagok mozgása követi a klasszikus mechanika törvényeit, de ettől az

még hullámmozgás marad, vagyis interferenciára képes, amit viszont makroszkopikus tárgyaknál – homokszemnél, ribizliszemnél, macskánál – sohasé észlelünk. A környezet okozta dekoherencia sikeres elmélete leírja az interferencia elvesztését, de nem ad számot a mérési folyamat furcsaságairól: a véletlen megjelenéséről és a versengő detektorok korrelált, látszólag egymást figyelő viselkedéséről.

A méteres repülési távolságú atom-interferométerek, de a legkisebb, ultratisztaságú, 1 K alá hűtött félvezető eszközök – kvantumpöttyök – is igazolják, hogy az átmenetet nem érdemes a méretektől való függés következményei között keresni: a könnyű elektronok és nem annyira könnyű atomok és molekulák még makroszkopikus távolságokban is megőrzik a hullámmozgás koherenciáját. A döntő tulajdonság a *tömeg* lehet: a legnehezebb fullerén-molekula, amellyel még sikerült interferenciakísérletet végezni (nehezebb molekulák már nem párolognak el), és a máig gyártott legkönnyebb nanomechanikai oszcillátor között tömegben 9–10 nagyságrendnyi a távolság. Ezen a kiterjedt senki földjén jól elérhetnek markáns fizikai effektusok, amelyek meghatározhatják a kvantum-klasszikus határ természetét.

Ezen a téren a nanomechanika nyújtotta lehetőségek kiaknázásához két dolog szükséges:

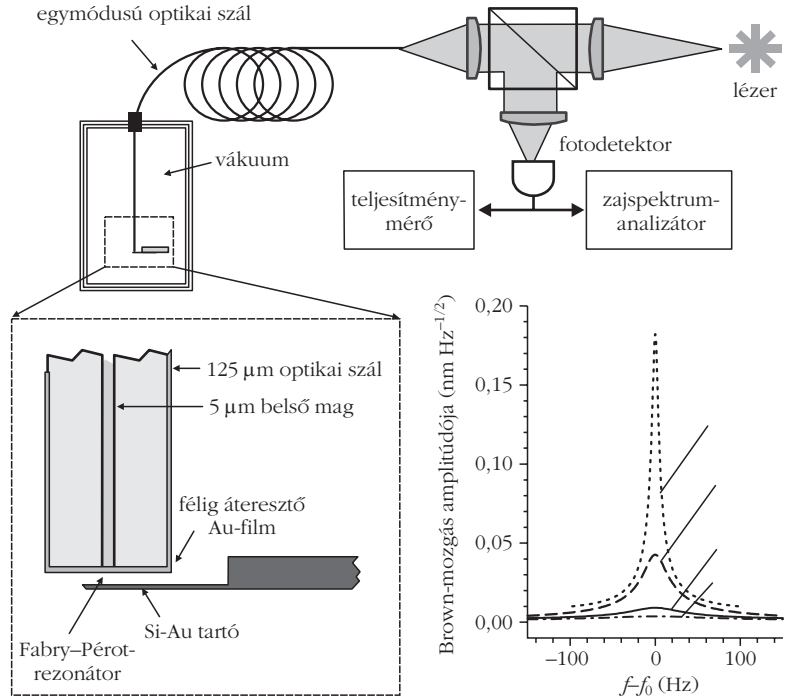
- A környezet termikus zajának kiküszöbölésére a nanomechanikai oszcillátorokat le kell hűteni a kvantummechanikai alapállapot közelébe, ami egy ν frekvenciájú oszcillátor esetén olyan alacsony hőmérsékletet jelent, hogy $kT/b\nu$ egységnyi nagyságrendű legyen (k a Boltzmann-állandó, b a Planck-állandó). Ez még GHz-es oszcillátornál is 0,01 K körüli hőmérsékletet jelent, kisebb frekvenciájúknál még alacsonyabban.

- A várt kvantumos viselkedés megfigyelése céljából elég erősen csatolni kell az oszcillátorokat olyan mikro- és nano-rendszerekhez, amelyek kvantumos viselkedését már megbízható kísérletek igazolják: optikai rezonátorba zárt, és onnan kicsatolva, detektorral észlelhető fotonokhoz, kicsiny szupravezető szigeteken vagy hurkokon mozgó Cooper-féle elektronpárokhoz, vagy félvezető „kvantumpöttyökön” átalagutazó elektronokhoz, amelyek mind képesek arra, hogy a nanomechanikai oszcillátor mozgását elektromos jellé alakítsák. A kihívás abban áll, hogy a kvantummechanika által jószolt elmozdulások roppant csekélyek: nagyságrendjük az atommag átmérőjével összemérhető. A felsorolt eszközök azonban ekkora elmozdulások észlelésére is alkalmasak.

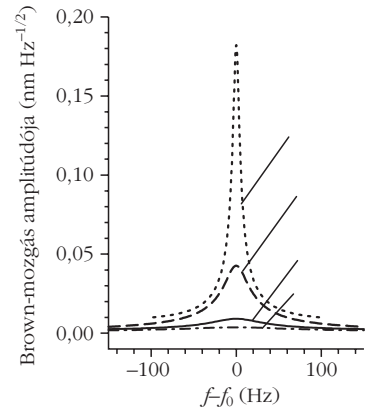
A címben említett tükrök a nanomechanikai oszcillátor és a foton összekapcsolásának eszközei. A megálmodott és részben megvalósított kísérletek sorában egy Fabry–Pérot-rezonátor egyik végét ilyen, egy rugalmas rezgő nyelvhez erősített tükör zárja le. A rezonátor interferencia által jelzi az oszcillátor kicsiny elmozdulását. Ez a mozgás detektálásának sokszorosan érzékenyebb eszköze, mint régi laboratóriumokban látott elődje: egy elforduló tükör által visszavert sugár geometriai elmozdulása a falon.

A GHz-es nanooszcillátorok már megszülettek, a századkelvines hűtés határát is átléptük, de, ahogy a vicc mondja, a két jóból egyszerre csak egy valósul meg: a legnagyobb frekvenciájú oszcillátorokat nehezebb lehűteni, de nehezebb is hozzacsatolni más kvantumrendszerekhez, mert a nagy frekvencia kemény, nehezen hajló anyagot feltételez. Az előrehaladás kulcsa mindenképpen a hatékonyabb hűtés, és éppen ezen a területen hihetetlenül intenzív fejlesztés indult meg az utolsó egy-két évben.

A hűtés a hőmozgás lefékezését, vagyis bármilyen irányú impulzusának lecsökkentését jelenti, melegítés nélkül. Ez paradoxonnak tűnhet, mert a fékezés hét-



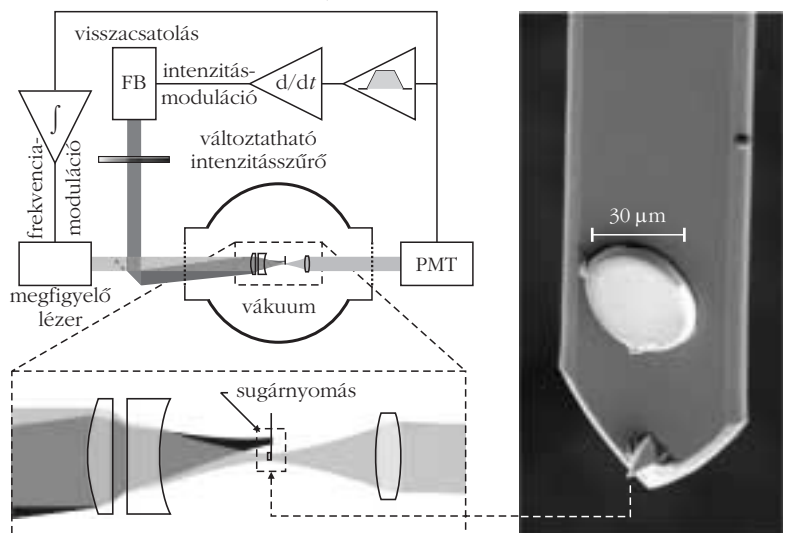
1. ábra. Hűtés késve reagáló hideg fényvel, *Höbberger-Metzger és Karrai* [4] nyomán: felül és balra a kísérlet elrendezése (az optikai szál pumpálja és letapogatja a rezgő tükrrel lezárt rezonátort); jobbra alul a mért zajspektrum változása a hűtés előrehaladásával.



köznapi eszköze a sűrűlódás, ami általában hőt termel. Az atomok lézeres hűtése már sikeresen túllépett ezen a paradoxonon, mivel az atomok az impulzusátadással felvett energiát spontán, esetleg stimulált emisszióval messzire tudják küldeni maguktól. Ez az eszköz azonban a sok nagyságrenddel nagyobb rezgő nyelvek esetén nem működik.

Ami viszont működni látszik, az a rezonátorban felhalmozott koherens fény egy speciális tulajdonsága: az, hogy *késve* reagál a rezonátor egyik falát alkotó tükör mozgására. Ez természetes, hiszen a $\Delta\omega\Delta t \geq \frac{1}{2}$ idő-frek-

2. ábra. Hűtés aktív visszacsatolással, *Kleckner és Bouwmeester* [5] nyomán. A PMT fotoelektron-sokszorozó jeléből numerikus differenciálással kapott sebességgel vezérelt FB visszacsatoló lézert fénynyomása fékezi le a tükör rezgését. Jobbra a tükröt hordozó, atomerő-mikroszkóp céljaira gyártott rezgőnyelv.



vencia határozatlansági reláció miatt minél jobb a rezonátor, vagyis minél élesebb a rezonancia, annál hosszabb idő kell a sokszorosan oda-vissza pattogó fényt rezonáltató állapot felépüléséhez. A tükör mozgására késve felépülő koherens fénypárna nyomása emiatt a mozgó tükör *sebességétől* függ, ami súrlódási erőnek felel meg.

A fékező impulzusátadással, persze, most is jár energiaátadás, de most az energiát a fény veszi fel, ami később a rezonátorból kiszökve segíti az energia kipumpálását. A rezonátor fénypárnája tehát egy hűtőgép hűtőközegének felel meg; a rezgő tükör mindig *hideg fénnel* találkozik. Ezt a mechanizmust több kutatócsoport is használta hűtésre (1. ábra), elméletével is több csoport foglalkozik.

Ezzel párhuzamosan kialakult azonban a rezgő tükrök hűtésének egy másik, lényegesen különböző elven alapuló módszere is. Ez a módszer, amit általában *aktív hűtésnek* neveznek, *Maxwell* démonára emlékeztet. A rezonátorból kiszökő fény gyors információt ad a tükör lassan fluktuáló rezgésének pillanatnyi helyzetéről–sebességéről. Ezt az információt egy elektronikus jelfeldolgozó áramkör arra használja, hogy egy másik lézernak az oszcillátorra irányított fénynyomását mindig éppen a fékezés irányába szabályozza (2. ábra).

Az ízlések különbözők. Az elektronikus szabályozás szakembereit elbűvölő megoldást a fizikusok talán kevésbé érzik elegánsnak, mint a késleltetett fény-

nyomás hideg súrlódását. A verseny pillanatnyi állása azonban az, hogy a rezgő tükrök világrekordját 3 mK hőmérséklettel éppen egy elektronikus szabályozást használó aktív hűtési séma tartja.

A rezgő tükör és a foton összefonódását először felvető cikk [3] konkrét elképzeléseiben hibásnak bizonyult [6], de az elmúlt év során sokat ígérő újabb változatai jelentek meg, amelyek talán több eséllyel foghatnak hozzá a kvantum–klasszikus határ bontogatásához.

A nanomechanikai oszcillátorok és a fotonokat–elektronokat hozzájuk csatoló tükrök, félvezető vagy szupravezető egy-elektron tranzisztorok világa napról-napra új felfedezésekkel kápráztatja el a témára figyelő fizikusokat. A szokatlan pezsgés azt jelzi, sokan komolyan hiszik, hogy ezen a viharosan táguló jelenségkörön keresztül néhány éven belül jobban megismerhetjük a klasszikus–kvantum határ egzotikus vidékét.

Irodalom

1. K.C. Schwab, M.L. Roukes, *Physics Today* 58/7(2005) 36; (letölthető a nano.caltech.edu/publicat.html weboldaltól)
2. D. Rugar, R. Budakian, H.J. Mamin, B.W. Chui, *Nature* 430 (2004) 329.
3. W. Marshall, C. Simon, R. Penrose, D. Bouwmeester, *Phys. Rev. Lett.* 91 (2003) 130401.
4. C. Höhberger-Metzger, K. Karrai, *Nature* 432(2004) 1002.
5. D. Kleckner, D. Bouwmeester, *Nature* 444(2006) 75.
6. J.Zs. Bernád, L. Diósi, T. Geszti, *Phys. Rev. Lett.* 97 (2006) 250404.

A DEFORMÁCIÓS ANIZOTRÓPIA DISZLOKÁCIÓS MODELLE

Ungár Tamás

ELTE Fizikai Intézet, Anyagfizikai Tanszék

A minket körülvevő világot ezernyi különböző anyag alkotja. Ezeket a legkülönbözőbb módokon próbáljuk azonosítani, jellemezni, rendszerezni. Azt mondjuk, hogy vannak szerves vagy szervetlen, lágy vagy szilárd, élő vagy élettelen, vagy éppen kristályos vagy üvegszerű anyagok. Az anyagok besorolásának talán legnagyobb mesterei a krisztallográfusok. Ők valamikor 18. században jelentek meg, amikor a felvilágosodás korában a természettudományok is lendületet kaptak. Először csak azt vették észre, hogy a különböző, a természetben található anyagokat, amelyeket ásványoknak nevezünk, legtöbbször jól meghatározott és mindig jellemző módon ismétlődő sík lapok határolják. Ebből már akkor arra következtettek, hogy ezeknek az anyagoknak feltehetően nagyon szabályos, a természet által meghatározott szerkezete kell, hogy legyen. Az ilyen szerkezetet kristályszerke-

zetnek nevezték. Figyelemre méltó, hogy pusztán az ásványi anyagok külső határoló lapjainak megfigyelése alapján, elméleti geometriai és matematikai módszerek segítségével, már az első időkben megteremtették a krisztallográfia alapjait. Ez a tudományág a mai napig is azzal foglalkozik, hogy leírja és meghatározza az anyagok építőköveiben rejlő ismétlődő szabályosságokat, a rácspériodicitást. Itt rácson az anyag építőköveinek rácsát kell értenünk. A 18. századtól mintegy 200 évnek kellett eltelnie, amíg a 20. század első éveiben, több felfedezés szerencsés összjátékának köszönhetően, egyértelműen bizonyítottá vált, hogy

(1) a minket körülvevő anyagok építőkövei atomok és molekulák,

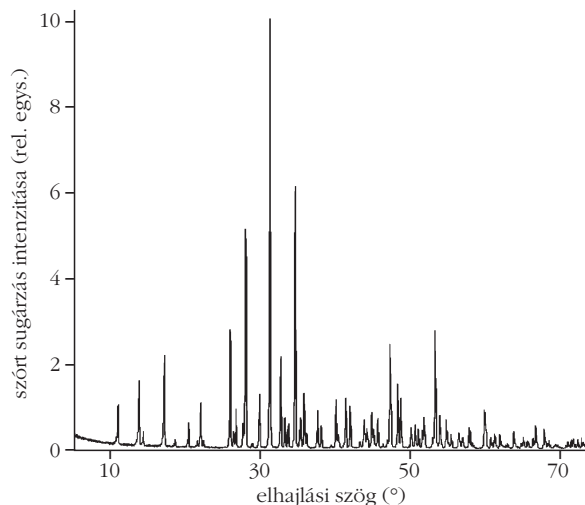
(2) ezeknek az anyagoknak igen jelentős hányada kristályos szerkezetű,

(3) valamint, hogy ezek az anyagok olyan háromdimenziós rácsot alkothatnak, amelyen bizonyos sugárzások ugyanúgy elhajlanak, mint a látható fény az optikai rácson.

A Philadelphiában működő ICDD (International Committee for Diffraction Data, Diffrakciós Adatok Nemzetközi Szervezete) 2007-ben a szerzőnek ítélte a Hanawalt-díjat.

Itt a „bizonyos sugárzások” azt jelenti, hogy a sugárzás hullámhosszának az atomi méretek nagyságrendjébe, vagyis a 0,1 nm-es tartományba vagy attól nem túlságosan távoli tartományba kell esnie. Ettől eltekintve a sugárzás lehet akár elektromágneses vagy részecskesugár, nevezetesen például röntgen-, elektron- vagy neutronsugár. Ezt a felfedezést követően, amiért *Max von Laue* és két munkatársa 1911-ben Nobel-díjat kaptak, megindult az anyagok atomi szerkezetének szisztematikus és átfogó felderítése. Ezt a tudományágat ma is kristallográfiának nevezzük. A tudományág, természeténél fogva magán hordozza a rendszerezés jellegét, ezért már kezdetben, az 1930-as években kialakult az egyes kutatók közötti nagyfokú szervezetszervezésre való törekvés. Fontossá vált, hogy minden új kristályszerkezet felfedezése vagy meghatározása lehetőleg minél gyorsabban közismertté váljon, egyrészt az ismétlések elkerülése, másrészt a kristályszerkezetek rendszereinek felépítése érdekében. Megalakult a kristallográfusok nemzetközi szervezete, az *International Union of Crystallographers* (IUCr), valamint létrejött a világ talán első adatbankja, az *International Centre for Diffraction Data* (ICDD), a diffrakciós adatok nemzetközi központja. A philadelphiai (Pennsylvania, USA) központú ICDD ma már több mint 200 000 szerves és szervetlen anyag kristályszerkezetének adatait tartja nyilván, és ezzel a vegyipar, a gyógyszergyártás, az élelmiszeripar, az építőipar, az elektronikaianyag-gyártás és általában az anyagokkal kapcsolatos bármely iparág egyik legnagyobb szolgáltató adatbázisa. Az adatbázisban egy-egy anyag diffrakciós spektrumának összes fontos paraméterét megtaláljuk. A diffrakciós spektrum az anyagmintára ejtett sugárzás (röntgen-, elektron- vagy neutronsugárzás) elhajlási képe. Az 1. és 2. ábra néhány tipikus elhajlási képet (diffrakciós spektrumot, illetve képet) mutat. Ez a két ábra jól szemlélteti, hogy az anyagok röntgendiffrakciós képe milyen kiválóan alkalmas a különböző anyagok azonosítására, hiszen még az amúgy rokon anyagoknak tekinthető két cukor, a tejcukor és a szőlőcukor röntgendiffrakciós képei is gyökeresen különböznek egymástól, nem is beszélve a trikálciumfoszfátról. Azt mondhatjuk, hogy a röntgendiffrakciós kép az anyagok *ujjlenyomata*. Itt jegyezzük meg, hogy a trikálciumfoszfátot a hétköznapi életben úgy ismerjük, mint: E 341, amelyet az élelmiszeripar töltőanyagként, lisztkezelőként, savasság szabályozóként és emulgátorként használ.

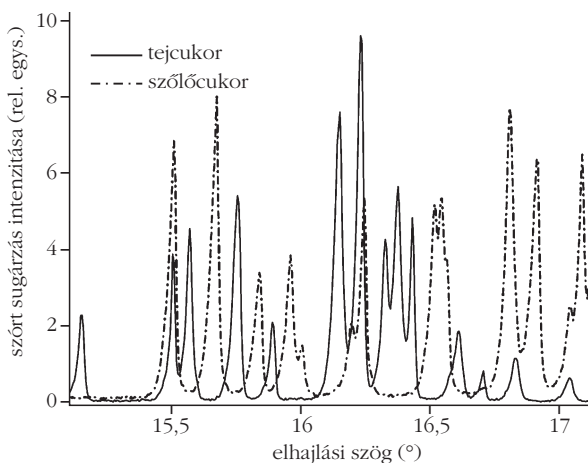
Vegyük most pontosabban szemügyre a röntgendiffrakciós képet. Vizsgáljuk meg a következő konkrét példát. Az ókori egyiptomi sírok számtalan korabeli személyes használati tárgyat tartalmaznak, amelyeket annak idején a halottakkal együtt temettek el. A női sírokból például százával kerültek elő különböző kozmetikumok, többek között mindenféle fiolákban, dobozocskákban, kerámiából vagy nádból készült tartályokban elhelyezett arcfestékek. A párizsi Louvre régészei elhatározták, hogy megpróbálnak utánajárni az ókori egyiptomiak által használt arc- és szemfestékek kémiai összetételének, sőt, ha ez lehetséges, akkor

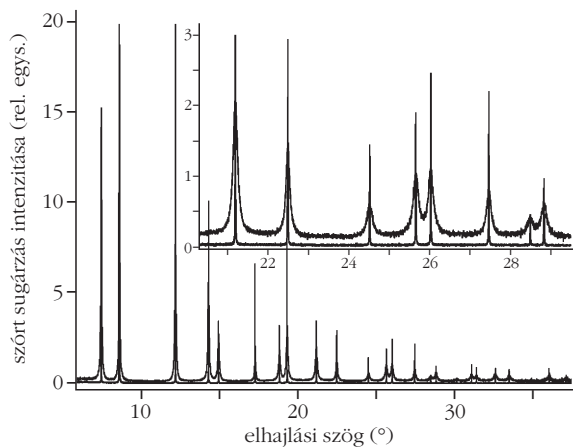


1. ábra. Szintetikusan előállított trikálciumfoszfát, $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ röntgendiffrakciós képe. (M. Ermrich, F. Peters, *Z. Kristallogr. Suppl.* 23 (2006) 523–528, engedélyével.)

annak is, hogy a különböző árnyalatú szemfestékeket milyen technológiai eljárásokkal állították elő. Rögtön kiderült, hogy az arcfestékek majd mindegyike két alapvető összetevőt tartalmaz. Az egyik az ólomszulfid, PbS_2 , köznapi nevén galenit, míg a másik az ólomkarbonát, $\text{Pb}(\text{CO}_3)$, másnéven cerruzit. Mindkettő viszonylag stabil, ásványi eredetű vegyület, így a bennük lévő ólom nem jelent közvetlenül mérgező hatást. Míg a galenit fénylő, koromfekete kristályokból áll, addig a cerruzit fehér. A két ásvány megfelelő porítással és keverésével előállítható a teljes fekete-fehér színskála bármely árnyalata. Valószínűleg ez tette ezt a két vegyületet az egyiptomi kozmetikusok számára oly vonzóvá. Itt jegyezzük meg, hogy a galenit számos ázsiai országban, például Indiában ma is kurrens kozmetikai alapanyag. A kozmetikumokban a festékek, jelen esetben a galenit vagy a cerruzit, finom por alakjában vannak jelen úgy, hogy valamilyen olajos hordozóban szuszpenziót alkotnak. A kémiai összetétel meghatározása után a Louvre régészei azt a kérdést tették fel, hogy vajon az ókori egyiptomiak milyen

2. ábra. A tejcukor (glukóz, kihúzott vonal), valamint a szőlőcukor (fruktóz, pont-vonal görbe) röntgendiffrakciós képeinek egy-egy kis részlete.



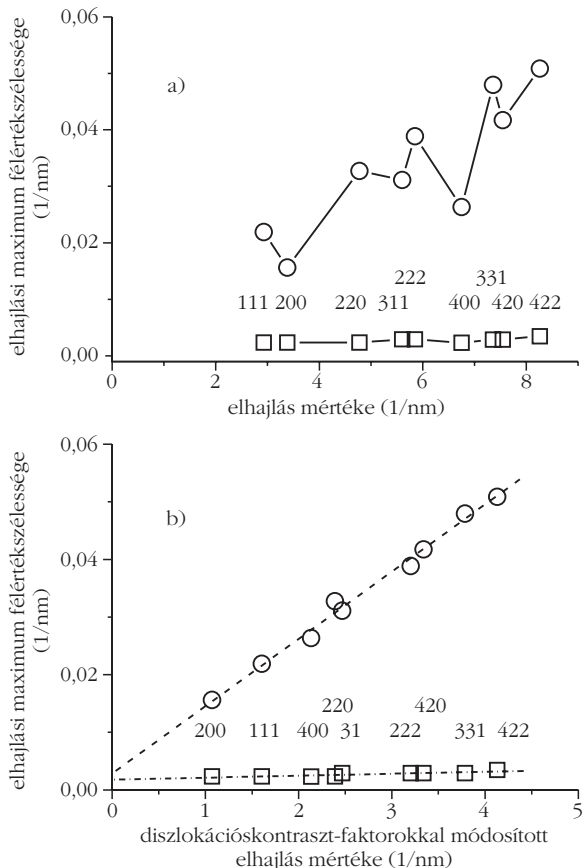


3. ábra. Egy-egy 12 órán át golyós malomban őrölt, illetve ezt követően 800 °C-on 2 órán keresztül hevített galenitminta röntgendiffrakciós képei [3]. Az ábra jobb felső részében a röntgendiffrakciós képek egy-egy részlete nagyítva látható.

módszerekkel állították elő a festékekben használt porokat. Sok forrásmunka utalt arra, hogy a nyers ásványi kristályokat különböző ideig tartó és különböző intenzitású őrléssel porították, majd a szuszpenziókat esetenként hevítették is.

Lássuk, hogy mi történik a galenit röntgendiffrakciós képével, ha őröljük, illetve hevítjük. Ezt mutatja a

4. ábra. A 3. ábrán feltüntetett elhajlási képek maximumainak félértékszélességei az elhajlás mértékének függvényében (a), ugyanezek a félértékszélesség-értékek a diszlokációs kontrasztfaktorokkal módosított elhajlás mértékének (a diffrakciós vektor C faktorokkal módosított abszolút értékének) függvényében (b).



3. ábra, amelyen egy 12 órán át nem túlságosan intenzív őrléssel, illetve az őrlést követően 800 °C-on 2 órán keresztül hevített galenitminta röntgendiffrakciós képei láthatók [3]. A hevített, illetve a csak őrölt minták elhajlási maximumai rendre igen keskenyek, illetve jelentősen kiszélesedettek. Figyelemre méltó, hogy az elhajlási maximumok pozíciói a mérési pontosság határain belül nem változtak meg. Az ábra jobb felső sarkában az egész elhajlási képnek egy részlete azt mutatja, hogy milyen jelentős különbség van a két elhajlási kép között. Az őrlésnek két alapvető hatása van a galenit kristályokra:

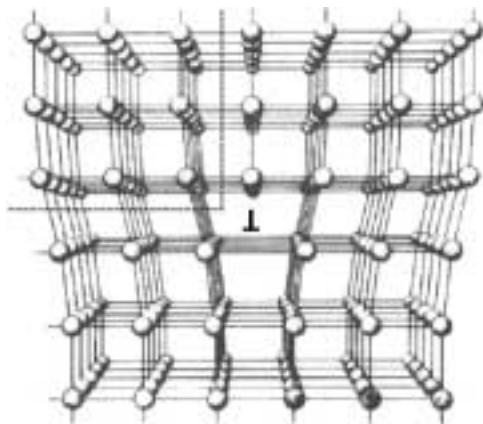
(1) egyrészt a kezdetben nagyméretű, nagyjából tökéletes kristályok elaprózódnak,

(2) másrészt az őrlés okozta mechanikai behatások és az így végbemenő képlékeny alakváltozások nagyszámú kristályhibát, elsősorban diszlokációkat hoznak létre a kristályokban.

Elsősorban ez a két hatás okozza az elhajlási maximumok kiszélesedését. A jelenség, amit a szakzsargon *vonalszélesedésnek* nevez, már nagyon régen ismert, ennek ellenére a mai napig van kutatni való annak felderítésére, hogy milyen kapcsolat van az elhajlási maximumok pontos alakja és az anyag mikroszerkezete között.

Nem könnyű röviden definiálni azt, hogy mi a mikroszerkezet. Legyen itt annyi elég, hogy olyan fizikai tulajdonságok összessége, amelyek lényegesen befolyásolják a konkrét anyagminta vagy anyagdarab felhasználhatóságát. Az itt taglalt galenit esetében mind a milliméter méretű tökéletes kristályok, mind a finomra őrölt mikron méretű porszemcsék anyaga galenit, de mégis, az egyik csak egy ásványdarab, a másik viszont egy kozmetikai alapanyag. A két anyagdarab kémiaiilag azonos, sőt, a kristályszerkezetük is megegyezik, mégis a mikroszerkezetük alapvetően különbözik.

Most térjünk vissza a 3. ábrán látható elhajlási képekhez. A két elhajlási kép közötti minőségi különbséget számszerűen is ki lehet fejezni. Az egyik szokásos eljárás az, hogy meghatározzuk az elhajlási maximumok szélességét a félmaximum magasságában. Ezt nevezzük *félértékszélességnek*. A 4.a ábra a két elhajlási kép maximumainak félértékszélességeit mutatja az elhajlás függvényében. Itt röviden meg kell állnunk, mert, bár a mérőberendezés az elhajlást az elhajlási szög függvényében adja meg, mind az elhajlást, mind a maximumok félértékszélességeit a jelenség lényege szempontjából sokkal megfelelőbb mennyiség függvényében írjuk le. Röviden gondoljuk végig, hogy mi is lehet ez a mennyiség. El tudjuk képzelni, hogy egy kristályban minél kisebb az atomok közötti távolság, az elhajlási maximumokhoz annál nagyobb szögű elhajlás tartozik, és megfordítva, minél nagyobb az atomok közötti távolság, az elhajlási maximumok annál közelebb lesznek az egyenes irányhoz. Ráadásul, az elhajlás mértéke fordítottan arányos a röntgensugárzás hullámhosszával. Az elhajlás lényeges tulajdonságait tehát akkor kapjuk meg helyesen, ha az elhajlás szöge helyett a hullámhosszal

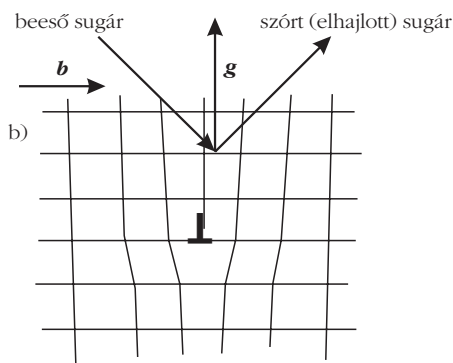
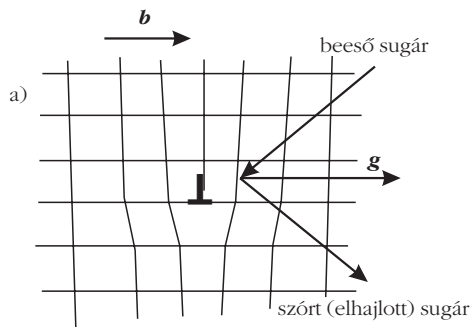


5. ábra. Egyszerű kristályos anyag atomjainak sematikus képe egy többlet betolt atomsíkkal. A betolt atomsík határoló éle, amit a fordított T jelez, egy éldiszlókáció. A szaggatott vonallal jelölt bal felső rész hibátlan, tökéletes kristály.

normált mennyiség függvényében írjuk le az elhajlást. Ennek a mennyiségnek nyilvánvalóan 1/hosszúság dimenziójúnak kell lennie. A 4.a ábrán mind a félértékszélességeket, mind az elhajlás mértékét ilyen mennyiség függvényében ábrázoltuk, 1/nm egységekben. Az ilyen típusú ábrázolást, első alkalmazói után, Williamson–Hall-ábrának nevezzük.

A mikroszerkezet legegyszerűbb modellje alapján, ha az anyagmintában a kristályok mérete nagyon kicsinnyé válik, akkor az elhajlási maximumok kiszélesednek. Viszont a 4.a ábrán látható Williamson–Hall-típusú ábrázolásban a kiszélesedés mértéke ilyenkor konstans, mindegyik maximum kiszélesedése azonos nagyságú. Vagyis, a félértékszélességeknek ebben az ábrázolásban egy vízszintes mentén kellene elhelyezkedniük. Abban az esetben viszont, ha a kristályrács el is torzul, például azért, mert diszlókációk vannak benne, a kiszélesedés mértéke növekszik az elhajlással. Vagyis, a félértékszélességek növekednek az elhajlással. Azt gondolhatnánk, hogy torzult kristály esetében ez a növekedés monoton, sőt, hogy a növekedés mértékéből meghatározhatnánk a torzultság mértékét, vagy akár a kristályban található diszlókációk mennyiségét, illetve sűrűségét is.

Szemügyre véve a 4.a ábrát azt látjuk, hogy a finomra őrlt galenitnak megfelelő félértékszélességek növekednek ugyan az elhajlás mértékével, de ez a növekedés korántsem monoton. A krisztallográfiában ez a *nem-monoton* viselkedés a hatvanas évek óta ismert, és a jelenség *deformációs anizotrópia* néven vonult be a szakirodalomba. A „deformációs” jelző arra utal, hogy a félértékszélességek növekednek az elhajlás mértékével, az „anizotrópia” pedig az elhajlás rendjében való anizotrópiát jelent. Meg lehet mutatni, hogy a kristályrácsnak a képlékeny alakváltozással létrehozott rácsorzulását a képlékeny alakítással létrehozott diszlókációk okozzák. Egy korábbi cikkünkben már foglalkoztunk a diszlókációk és a röntgen elhajlási maximumok kiszélesedésének a kapcsolatával, mégis, a jobb követhetőség kedvéért itt megegyezően összefoglaljuk azokat a dolgokat, amelyek a további megfontolások szempontjából lényegesek.



6. ábra. Diszlókációk és kristályon elhajló sugárzás kapcsolatának sematikus ábrázolása. Az a) ábrán a sugárzás a diszlókáció által erőteljesen deformált atomsíkon, a b) ábrán a diszlókáció által csak gyengén vagy alig deformált atomsíkon hajlik el. Az a) esetben erőteljes, a b) esetben gyenge vagy észrevehetetlen a megfelelő elhajlási maximum kiszélesedése.

A diszlókációk egyik legegyszerűbb típusát, az éldiszlókációt úgy képzelhetjük el, hogy az anyagot bevágjuk az atomsíkokkal párhuzamosan egy él mentén, majd a bevágásba, a bevágás végéig egy további atomsíkot tolunk be. Ezt szemlélteti az 5. ábra, amelyen a bevágás a fordított T-ig terjed. Az ábra szaggatott vonalakkal határolt bal felső részén hibátlan kristály látható. Az is jól látszik, hogy a diszlókáció egy vonal mentén, a betolt többletatomsík határvonala mentén húzódik. Ha az anyag felső és alsó részét, nyíró erők alkalmazásával, egymáson elcsúsztatjuk, elegendő, hogy a fordított T-vel jelölt atomsík fokozatosan úgy mozduljon el, hogy közben mindig csak egyetlen atomsíknyi nyírás következzen be. Ez a mechanizmus teszi lehetővé, hogy a nyírási deformáció 300–400 GPa helyett csupán 300–400 MPa feszültséget igényel. Az 5. ábrán jól látható, hogy a diszlókáció környezetében különösen a függőleges atomsíkok görbültek erőteljesen. A továbbiak szempontjából ugyanakkor lényeges észrevennünk, hogy jelen esetben a vízszintes atomsíkokat ez a diszlókáció szinte érintetlenül hagyja. Azt mondhatjuk, hogy a diszlókáció egy extrém módon anizotróp kristályhiba.

A diszlókációk és a röntgensugarak elhajlása közötti kapcsolatok lényeges tulajdonságait a sematikus 6. ábra jól szemlélteti. Az atomsíkokat vékony vonalakkal, beeső és szórt (elhajlott) sugár irányát egy-egy nyíllal, a Burgers-vektort és a diffrakciós (vagy elhajlási) vektorokat vastag nyilakkal jelöltük. A **b** Burgers-vektor a diszlókáció erősségét adja meg, a diffrakciós

vektor pedig a sugárzás elhajlását okozó atomsíkokra (vagy hálózati síkokra) merőleges vektor. Itt jegyezzük meg, hogy a \mathbf{g} -vel jelölt diffrakciós vektor hossza egyben reciproka a szóbanforgó atomsíkok távolságának. A *6.a*, illetve *6.b ábrák* ugyanazt a diszlokációt és a körülötte lévő néhány atomsíkot mutatják sematikusán. A különbség csupán a ráeső és szórt sugárzás irányában van. Az első esetben, ez van a *6.a ábrán*, a szórás vagy elhajlás létrehozó atomsíkok, különösen a diszlokáció közvetlen közelében, erőteljesen torzulnak, azt látjuk, hogy el vannak görbülve. Ezzel szemben a második esetben, ez van a *6.b ábrán*, a szórás létrehozó atomsíkok szinte teljesen érintetlenek, szép egyenes síkok. Ennek megfelelően az első esetben az elhajlási maximum jelentősen kiszélesedik, viszont a második esetben szép éles marad. Ezt a jelenséget látjuk számszerűsítve a *4.a ábrán*, ahol a kiszélesedés mértéke az egyik elhajlási maximum esetében nagyobb, a másiknál kisebb, de globálisan mégiscsak növekszik.

A *6. ábrán* feltüntettük a Burgers- és a diffrakciós vektorokat, \mathbf{b} -t és \mathbf{g} -t. Könnyen leolvasható az *6.a* és *6.b ábrákról*, hogy az első esetben $\mathbf{bg} \neq 0$, a másodikban $\mathbf{bg} = 0$. Ez a két vektor skaláris szorzatára vonatkozó feltétel egyszerű eligazítást ad arra nézve, hogy az elhajlási maximum mikor és milyen mértékben szélesedik ki. A *6. ábra* alapján kimondhatjuk azt a jól működő szabályt, hogy amikor $\mathbf{bg} = 0$, akkor az elhajlási maximum kiszélesedése zérus vagy közel zérus, amikor viszont $\mathbf{bg} \neq 0$, akkor az elhajlási maximum kiszélesedik, sőt, a kiszélesedés mértéke annál nagyobb, minél nagyobb ennek a szorzatnak a zérustól való eltérése. Az összefüggés ennél bonyolultabb, de a jelenség lényegének megértése szempontjából a további részletek nem fontosak. A jelenség lényeges része az, hogy a kiszélesedés mértéke a két vektor, \mathbf{b} és \mathbf{g} relatív orientációjától függ. A *4.a* és *4.b ábrákon* az elhajlási maximumokat hármas indexekkel, a Miller-indexekkel, illetve azoknak egész számú többszöröseivel jelöltünk. Ezek az indexek közvetlen kapcsolatban állnak a \mathbf{g} diffrakciós vektorral. Ezért van az, hogy az elhajlási maximumok hol szélesebbek, hol kevésbé szélesek, hiszen mindegyik maximum esetében más és más az éppen aktuális diffrakciós vektor és a vizsgált anyagmintában lévő diszlokációk \mathbf{b} Burgers-vektorai közötti relatív orientáció. Elméleti és numerikus módszerekkel pontosan ki lehet számítani, hogy mekkora lesz a kiszélesedés mértéke, ehhez csak azt kell tudni, hogy az anyagmintában milyen típusú diszlokációk milyen mennyiségben vannak jelen [1, 2].

A diszlokációk okozta rácstorzulások tehát irányfüggők, azt mondjuk, hogy a rácstörzések *anizotrop*. Vagyis, bizonyos kristálytani irányokban nagyobb, más irányokban kisebb. Ugyanakkor, a szigorúan vett irányfüggés lényegében csak a diszlokációk típusától függ, és független az adott diszlokációk mennyiségétől vagy sűrűségétől. Ez más szóval azt jelenti, hogy ha megváltoztatjuk egy bizonyos diszlokációtípus mennyiségét a kristályban, de a diszlokáció típusát változtatlanul hagyjuk, akkor az elhajlási maximumok kiszélesedése

ugyan megnövekszik, de a deformációs anizotropia jellege nem változik meg. Ez gyakorlatilag azt jelenti, hogy a deformáció irányfüggését és a rácstörzések nagyságát szétválaszthatjuk. Ezt az irányfüggést összefoglalóan egy úgynevezett diszlokációs *kontrasztfaktor*ba foglalhatjuk bele, amit jelölünk C -vel. A C faktor bármilyen diszlokációtípusra és konfigurációra numerikus módszerekkel kiszámítható. Tudni kell hozzá az adott anyag rugalmassági tulajdonságait, és meg kell oldani a diszlokációk rugalmas deformációs egyenleteit. Nyilvánvaló, hogy az olyan kristálytani irányokban, amelyekben a diszlokációk okozta rugalmas deformációk nagyobbak, illetve kisebbek, a megfelelő diszlokációs kontrasztfaktorok is rendre nagyobbak, illetve kisebbek lesznek. A *4.a ábrán* az elhajlási maximumok szélességét az elhajlás mértékének reciprokhosszúság-egységeiben mértük fel, ez a változó éppen a \mathbf{g} diffrakciós vektor hosszának megfelelő paraméter. Meg lehetett mutatni, hogy ha ezt a változót módosítjuk a C diszlokációs kontrasztfaktorokkal, akkor egy olyan új változót kapunk, amely éppen azokban a kristálytani irányokban nagyobb, illetve kisebb, amelyekben az elhajlási maximumok kiszélesedése is rendre nagyobb, illetve kisebb. Egy ilyen ábrázolásban, amelyet *módosított Williamson–Hall-ábrázolás*nak neveztünk el [1, 2], az elhajlási maximumok kiszélesedése monoton módon viselkedik. Ezt mutatja a *4.b ábra*, amelyen ugyanazok a szélességértékek szerepelnek, mint a *4.a ábrán*, csak a vízszintes tengelyen a diszlokációs kontrasztfaktorokkal módosított változót tüntettük fel. Ez az ábra azt mutatja, hogy a deformációs anizotropiát jól írja le e jelenség diszlokációs modellje.

A deformációs anizotropia diszlokációs modellje, azon túl, hogy helyesen adja meg a jelenség fizikai okát, számos új lehetőséget tár fel magának a jelenségnek a felhasználására. Ez a lehetőség abban rejlik, hogy a deformációs anizotropiát felhasználhatjuk a diszlokációs kontrasztfaktorok kísérletes meghatározására. Az így kapott mért kontraszt faktorokat, a $C_{\text{mérés}}$ értékeket, összehasonlíthatjuk elméletileg számolt, $C_{\text{elméleti}}$ értékekkel, amelyeket különböző diszlokációtípusok, illetve úgynevezett csúszási rendszerek figyelembe vétele alapján tudunk numerikus módszerekkel meghatározni. Ez a módszer tehát lehetőséget nyújt arra, hogy képlekenyen alakított kristályos anyagokban meghatározzuk az éppen jelenlévő diszlokációtípusokat, illetve meghatározzuk, hogy a képlekenyen alakváltozás milyen csúszási rendszerek aktiválása révén jött létre.

A kristályos anyagok mikroszerkezete – amelynek egyik legfontosabb része a diszlokációs szerkezet – a képlekenységi tulajdonságokon túl nagyok sok szempontból fontos információkat tartalmaz. A bevezetőben láttuk, hogy a kristályos anyagok diffrakciós képe az anyagok ujjenyomatának tekinthető. Ebben az értelemben a mikroszerkezet az anyagok *előéletének* vagy *történetének az ujjenyomata*. A diszlokációs szerkezet részletes vizsgálata alapján sok mindenre következtethetünk.

(1) A képlékenységi tulajdonságokra, megmondhatjuk, hogy a képlékeny alakváltozás milyen módon, milyen diszlokációk és csúsztási rendszerek aktiválása révén megy végbe. Ez új lehetőségeket teremt bonyolult szerkezeti anyagok, például a reaktoroknál alkalmazott Zr-alapú ötvözetek, a repülőgép-turbinákban használt Ti-alapú ötvözetek, vagy az autóiparban egyre divatosabb Mg-alapú ötvözetek kutatásában és fejlesztésében.

(2) A geológiában fontos tudni, hogy milyen diszlokációk és csúsztási rendszerek aktiválódnak a különböző kőzetek deformációja során. Az elektronmikroszkópia mellett az itt leírt módszer hasznos kiegészítéseket nyújthat, különösen olyan esetekben, amikor atmoszférikus körülmények között a vizsgált ásvány- vagy kőzetanyag nem stabil [4].

(3) Következtethetünk arra is, hogy a vizsgált anyagminta milyen képlékeny deformáció révén került abba az állapotba, amelyben a vizsgálatokat éppen végezzük. Például régészeti leletek esetében következtethetünk arra, hogy elődeink milyen mecha-

nikai vagy hőkezelési eljárást alkalmaztak, fémes vagy akár kerámia alapú tárgyaik előállításához. Az egyiptomi szemfestékek vizsgálata például azt mutatta, hogy az ókori kozmetikumok készítői szelíden, csak éppen annyira őrlték meg az alapanyagait, hogy a durva szemcsék eltűnjenek és csak ritkán alkalmaztak hevítést, azt is csak legfeljebb 300 °C-nál nem magasabb hőmérsékleteken [3].

Irodalom

1. T. Ungár, A. Borbély: The effect of dislocation contrast on X-ray line broadening: a new approach to line profile analysis. *Applied Physics Letters* 69 (1996) 3173–3175.
2. T. Ungár, G. Tichy: The effect of dislocation contrast on X-ray line profiles in untextured polycrystals. *Physica Status Solidi A* 147 (1999) 425–434.
3. T. Ungár, P. Martinetto, G. Ribárik, E. Dooryhée, Ph. Walter, M. Anne: Revealing the powdering methods of black makeup in Ancient Egypt by fitting microstructure based Fourier coefficients to whole X-ray diffraction profiles of galena. *Journal of Applied Physics* 91 (2002) 2455–2465.
4. P. Cordier, T. Ungár, L. Zsoldos, G. Tichy: Dislocations creep in MgSiO₃ perovskite at conditions of the Earth's uppermost lower mantle. *Nature* 428 (2004) 837–840.

TISZA LÁSZLÓ ÉS A SZUPERFOLYÉKONYSÁG ELMÉLETE

Geszi Tamás

ELTE, Komplex Rendszerek Fizikája Tanszék

Ez az előadás¹ történeti áttekintést kíván adni a százéves *Tisza László* munkásságának legismertebb részéről: a híres kétfolyadékos modell létrehozásáról, amely azóta a folyékony hélium fizikájának maradó és megkerülhetetlen keretét jelenti. Az áttekintésben Tisza Lászlóval öt évvel ezelőtt a Gellért-szállóban készített és a *Természet Világában* megjelent riportom, valamint *Frenkel Andornak* az idén, ugyanott megjelent, sokkal részletesebb riportsorozata jelentette a kiindulást. A részletek kibogozásában három nem régen megjelent összefoglaló cikkre [1–3] támaszkodhattam.

Az előzmények

A héliumot először *Heike Kamerlingh Onnes* cseppfolyósította 1908-ban, Leiden egyetemén, a Joule–Thomson-effektus felhasználásával. Ettől kezdve a cseppfolyós hélium több mint húsz évig csak a nagyon alacsony hőmérsékletek előállításának eszközeként szerepelt. Segítségével fedezte fel 1911-ben Kamerlingh Onnes a fémek szupravezetését is. (Az „anyag alacsony hőmérsékleten mutatott tulajdonságainak tanulmányozásáért” 1913-ban Nobel-díjat kapott.)

Hogy a folyékony hélium maga is varázslatos és meglepő jelenségekben gazdag tárgya a fizikának, az jóval később kezdett kiderülni. 1926-ban közölte Kamerlingh Onnes tanítványa, az ugyancsak Leidenben („a világ leghidegebb helyén”) dolgozó *Willem Hendrik Keesom* az első fázisdiagramot, amely azt mutatta, hogy a hélium a legalacsonyabb hőmérsékleteken sem fagy meg, csak igen nagy nyomás alatt. Ugyancsak ő tette 1930-ban azt a korszakos felfedezést, hogy a folyékony halmazállapoton belül, 2,17 K hőmérsékleten fázisátalakulás történik, amit a fajhőnek a görög λ betűre emlékeztető éles csúcsa jelez. Keesom nevezte el az átalakulás helyét λ -pontnak, a melegebb oldalon levő folyadékot hélium-I-nek, a hidegebb oldalon levőt hélium-II-nek. Ez utóbbinak különleges tulajdonságairól szól történetünk.

1935 körül irányult a figyelem a hélium-II furcsa viselkedésére, amely egyrészt a hőmérséklettel meredeken csökkent, másrészt függni látszott a mérőberendezés geometriájától. Addigra Leiden mellett még két laboratóriumban indultak meg a vizsgálatok: a kanadai Torontóban, valamint Cambridge-ben is, ahol a zseniális fiatal orosz fizikus, *Pjotr Kapica* 1929 óta vendégkutatóként működött. Atyai támogatója, *Rutherford* közvetítésével felépítette a Mond-laboratóriumot (*Mond* a szponzor neve), ahol Kapica nagy mérnöki fantáziával új alapokra helyezte és ipari méretekig fokozta a hélium cseppfolyósítását. 1934-ben Kapicát hazahívták a Szovjetunióba, és onnan már nem engedték vissza cambridge-i labora-

¹ Elhangzott a Magyar Tudományos Akadémián 2007. október 16-án, a Tisza László századik születésnapja alkalmából tartott ünnepi ülésen.

tóriumába. Volt azért egy megoldás – másnak egy sem lett volna, de neki sikerült: személyes kapcsolatot talált *Sztálin*nal, és ezen keresztül elérte, hogy Moszkvában újra felépíthesse az elveszett laboratóriumot, benne új munkatársakkal – köztük volt *Landau* is. Ettől kezdve Kapica, valamint a cambridge-i Mond-laboratóriumba az ő helyére Torontóból meghívott kutatók, *Allen* és *Misener* egymással versenyezve, lényegében függetlenül, 1937-ben ismerték fel és 1938 elején publikálták a hélium-II legfontosabb tulajdonságát: azt, hogy a folyadék vékony kapillárison vagy összepréselt felületek közötti szűk résen sűrűlőds nélkül áramlik át (ezt Kapica nevezte el *szuperfolyékonyságnak*, a szupravezetés mintájára). Csak később lett világossá, hogy ez nemcsak a viszkozitás eltűnését, hanem a fallal való sűrűlőds teljes hiányát is jelenti. Ugyanez a folyadék viszont a belemerített lengő-forgó tárgyak (hengerek, korongok, lapátok) mozgását véges, jól mérhető viszkozitással csillapítja!

Ha a felfedezést a két csoport függetlenül tette is, a publikációba egy kis szépséghiba csúszott: Allen és Misener tudomást szerzett Kapica beküldött cikkéről, és ezután küldte be a magáét. Ez lehet az oka, hogy csak negyven évvel később adtak a felfedezésért Nobel-díjat, akkor is csak Kapicának.

A szuperfolyékonyság és a kétféle viszkozitás mellett más érdekes tulajdonságai is kiderültek a hélium-II-nek: ezek legtöbbször a „termomechanikai effektus” gyűjtőnév alá lehet besorolni, és a melegítéskor fellépő nyomásváltozásra vezethetők vissza.

A szuperfolyékonyság és a kétfolyadék-modell

A λ -pont alá hűtött hélium különös tulajdonságainak magyarázata felé az első jelentékeny lépést a Párizsban élő *Fritz London* tette meg. Ő azt ismerte fel, hogy a folyékony hélium könnyű atomjait a kvantummechanika által kikényszerített kinetikus energia akadályozza meg a kristályosodással járó lokalizációban. A delokalizált atomok sokaságán viszont a megfigyelt rejtélyes fázisátmenet kapcsolódhat a Bose–Einstein-kondenzációhoz: ahhoz az elképzeléshez, hogy egész spinű atomok (ilyen a hélium leggyakoribb, 4-es izotópja is) sokaságából egy adott hőmérsékleten kiválik egy 0 impulzusú „kondenzátum”, miközben az atomoknak egy – a további hűtéssel csökkenő – hányada továbbra is gerjesztett, véges sebességgel mozgó állapotban marad. Ez a kondenzáció azonban – a vízgőz kicsapódásától eltérően – az *impulzustérben* történik; a közönséges térben nézve a kondenzátum és a gerjesztett atomok ugyanazt a helyet töltik ki.

London felfrissítette *Einstein* vázlatos számításait, kiszámította az átalakulás hőmérsékletét a héliumatomok tömegére és a folyékony hélium sűrűségére, és azt kapta, hogy ez a hőmérséklet 3 K körül van: olyan közel a hélium 2,17 K-es átalakulásához, hogy az ember hinni kezd: ez nem lehet véletlen.

1937-ben a Landau harkovi iskoláját megjárta, tehetséges kezdő fizikus Tisza László Párizsba került, és a már sikeres, elismert Fritz Londonnal rendszeres,

nagy beszélgetésekben tervezték jövőbeli közös munkájukat. 1938 elején megjelent Kapica cikke a szuperfolyékonyság felfedezéséről, és a beszélgető partnerek aznap este megéreztek, hogy rajtuk a lépés sora. Fritz London számára az új jelenségek új kihívást jelentettek, hogy egy lelkes fiatal segítővel megerősítve, alapos kutatómunkával derítse fel a kapcsolatot az általa felismert Bose–Einstein-kondenzációs vonallal.

Tisza számára az estét követő álmatlan éjszaka a felismerés ideje volt. A kulcs a kétféle viszkozitás, és London elképzeléseiben adott ennek hordozója is: a Bose–Einstein-kondenzátum az, ami résen-kapillárison akadálytalanul átsiklik, és a gerjesztett atomokból álló gáz az, ami a forgó-lengő korongok mozgását viszkozitásával csillapítja. A kettő, mint *két folyadék*, ugyanazon a helyen van, de nem mint egy keverék, hanem függetlenül mozognak, kétféle sebességgel, kétféle viszkozitással. Másnap reggel Tisza boldogan kereste Londont, hogy elmondja, mire jutott az éjszaka, és várta az örömteli elismerést.

Fritz London tájékozta a haragtól. Ilyet nem lehet csinálni, ez megcsúfolása az ő komoly programjának, az egy helyen kétféle mozgó két folyadék képe abszurd. Az együttműködés terve ködbe foszlott, Tisza László magára maradt gondolataival jó két évre; ezalatt kidolgozta és publikálta azt, amit máig is a *Tisza-féle kétfolyadékos modellnek* nevezünk, és azt is, ami ennek melléktermékeként gyorsan kihullt az idő rostáján [4]. Ami kihullott, az az ő nagy fájdalma volt, ami fennmaradt, az a fizika nagy szerencséje.

A kétfolyadékos modell sajátosan csatolt hidrodinamikai egyenletrendszerként jelent a tudathasadásos hélium viselkedésében megmutatkozó „két folyadék” (mai nyelven: *normál* és *szuperfolyékony* komponens) sűrűségére és áramsűrűségére, valamint a csak a „normál” komponens által hordozott entrópiásűrűségre és entrópiaáram-sűrűségre. Ez utóbbit hőmérvél lehet mérni. Erre vonatkozik Tisza László leglátványosabb felfedezése is: az egyenletrendszer megoldásából rájött, hogy a közönséges hanghullámok mellett a folyékony héliumban terjedhet egy „termikus hang” is (mai nyelven: *második hang*), amelyben a hőmérséklet inhomogenitása terjed hullámszerűen, nem pedig diffúziószerűen, mint a közönséges anyagoknál megismert hővezetés.

Az első két év

A háború éveit következtek, Cambridge-ben lényegében leállt a tudományos kutatás, de Moszkvában folytatódott, amíg lehetett. Kapica egy fiatal tanítványa, *Peskov* kitalálta a módját, hogy megfigyelje a második hangot, és megmérte a sebességét is, egyelőre korlátozott hőmérsékleti tartományban. Tisza boldog volt, és Fritz London is megbékélt a látványos megerősítés nyomán.

Kapicához csatlakozott – rémálomszerű közjátékok után – Landau is, aki a közvetlen közelében zajló kí-

sérletek magyarázatát sok tekintetben másképpen látta. Átvette (vagy újra kitalálta: ezt már sohasse fogjuk megtudni) a kétfolyadékos modellt, de a hozzá tartozó London–Tisza-féle mikroszkopikus magyarázatot nem fogadta el, mondván, hogy egy olyan erősen kölcsönható folyadékban, mint a hélium, nem létezhetnek a Bose–Einstein-kondenzátum mellett szabadon mozgó gerjesztett atomok. Az alacsony hőmérsékleten végzett fajhőmérések egyértelműen rámutattak, hogy a legalacsonyabb energiájú „elemi gerjesztések” (ez a kifejezés is Landautól származik) hanghullámok kvantumai, amelyeket a „foton” szó mintájára *fonon*nak nevezett el.

Ez váratlan élességgel világította meg a kapillárisan átfolyó hélium szuperfolyékonyságának valódi okát. Üljünk bele az áramló folyadék koordinátarendszerébe: a kapilláris visszafelé mozgó fala csak úgy tud impulzust átadni a folyadéknak és ezáltal csillapítani az áramlását, ha a folyadékban terjedő fononokat sugároz ki az áramlással ellentétes irányba. Ehhez a kisugárzáshoz azonban az kell, hogy a fal és a folyadék egymáshoz képest legalább a hang sebességével mozogjon!² Hangsebességnél lassabb kapillárisáramlás a fal nem tud csillapítani: nincs viszkózitás.

Ebben a gondolatkörben a kétfolyadékos modell „normál” komponensét nem egyes gerjesztett atomok alkotják, hanem a fononokból álló gáz, amely impulzust szállít, és viszkózus erőt tud létrehozni.

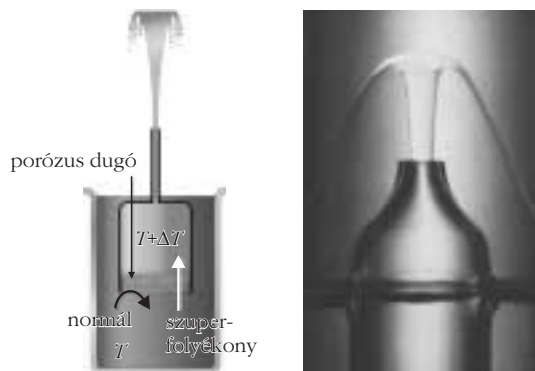
Annak, hogy az alacsony energiájú gerjesztések nem egyes atomok, hanem hangsebességgel mozgó fononok, közvetlen következménye, hogy a második vagy termikus hang sebességének hőmérséklet-függése eltér a Tisza által megjósolttól: a hőmérséklet csökkenésével nem nullához, hanem véges értékhez tart. A döntő kísérlethez mélyebbre kellett menni a hőmérséklettel. Ez Peskovnak már csak a háború elmúltával sikerült, és az eredmények Landau elméleti jóslatát erősítették meg.

Epilógus

A folyékony héliumból és a hozzá szorosan kapcsolódó szupravezetéstől nagy fizika nőtt ki. Egy-két önállóan kiemelt fordulópont:

- *Bogoljubov* megmutatta, hogy a gyengén kölcsönható Bose-gáz modelljében valóban a Landau által posztulálthoz hasonló, fonon-szerű elemi gerjesztések lépnek fel. Ez volt talán a legfontosabb gyökere annak az óriási fellendülésnek, amely a *soktest-elmélet* néven ismert elméleti fizikai kultúra kialakulásához vezetett, és mindenekelőtt a szilárdtestfizika tudományát teljesen új alapokra helyezte. Magyarországon két nagy iskolája alakult ki a soktest-elméletnek, *Szépfausz Péter*, illetve *Zawadowski Alfréd* körül. Mindkettő jelentős eredményekkel járult hozzá a szuperfolyékony hélium fizikájához is.

² Ezzel kapcsolatban emlékezzen vissza a Cserenkov-sugárzásra, aki tudja, mi az.



A szökőkút-effektus

- *Oliver Penrose* és *Lars Onsager* rájött, hogy mi módon definiálható a kölcsönható Bose-kondenzátum hullámfüggvénye, amely a szuperfolyékony hélium egyfajta „nemdiagonális hosszútávú rendjét” írja le, és ezáltal a λ -pont fázisátmenetében a rendparaméter szerepét tölti be.

- Neutronszórással meg lehetett határozni a fonongerjesztések diszperziós függvényét, benne a Landau által felismert roton-minimummal.

- *Feynman* felismerte, hogy a kölcsönható Bose-kondenzátumban kvantált örvények (*vortexek*) keletkezhetnek; ezt később számos kísérlet igazolta. Hasonló kvantált örvények fontos szerephez jutnak a fémek szupravezetőiben is, amit *Abrikoszov* ismert fel, Feynmantól függetlenül.

- Jóval később, az 1990-es évek közepén sikerült megvalósítani csapdázott hideg gázok Bose–Einstein-kondenzációját. Ez – a sűrű folyékony héliumtól eltérően – gyengén kölcsönható rendszer, amelyen kiválszóan működnek a soktest-elmélet évtizedekkel előbb kidolgozott módszerei.

Tisza László önkéntes elhatározással kimaradt ebből a fejlődésből. Kutatói energiáit a termodinamikában kamatoztatta. Ennek nyilvánvaló oka az a megrázkódtatás volt, amely a kétfolyadékos modellhez fűzött mikroszkopikus magyarázatának kudarcával érte. Visszatekintve, a kétfolyadékos modell az elméleti fizika ragyogó sikere és maradandó eredménye. A folyékony hélium tulajdonságait ma is ezen, a jelenségekhez tökéletesen igazodó nyelven írjuk le, és hogy ezt felismerni mekkora tett volt, arra máig érvényes bizonyíték Fritz London megdöbbenése azon a bizonyos reggelen.

A szuperfolyékonyság kutatásának korai évei után Tisza László csak egyszer szólalt meg a témában: ő volt az első, aki Landaut Nobel-díjra javasolta.

Jó egészséget kívánva nagyhírű hazánkfiának, ezzel zárom az ünnepi megemlékezést a százéves Tisza László történelmi súlyú felfedezéséről.

Irodalom

1. Griffin, in: *Bose–Einstein Condensation in Atomic Gases*. (eds. M. Inguscio, S. Stringari, C. Wieman) IOS Press, Amsterdam, 1999, 1.
2. K. Gavroglu, *Physics in Perspective* 3 (2001) 165.
3. S. Balibar, *Journal of Low Temperature Physics* 146 (2007) 441.
4. L. Tisza, *Nature* 141 (1938) 913; *C. R. Acad. Sci.* 207 (1938) 1035, 1186; *Journal de Physique et le Radium* 1 (1940) 164, 350.

AZ INTERNET FIZIKÁJA

Vattay Gábor

ELTE TTK, Komplex Rendszerek Fizikája Tanszék

A modern kommunikációs hálózatok és az internet működésük során számos, az elektromágnesesség körébe eső effektust használnak ki. Emiatt, mintegy mellékesen, a környezetünkben hozzáférhető számítástechnikai eszközök számos érdekes fizikai jelenség demonstrálására is alkalmasak. Az ELTE Fizikai Intézetében szervezett *Atomoktól a Csillagokig* előadás nyomán ezek közül most az interneten terjedő jelek sebességének egyszerű és érdekes mérését mutatom be, mely könnyen kivitelezhető és bemutatható középiskolákban egy számítógép segítségével.

Az internet a számítógépek világméretű, gigantikus hálózata. A számítógépek kommunikációjuk során kis csomagokat küldenek egymásnak, melyet a hálózat elemei juttatnak célba. A csomagokat címzéssel látják el. A hálózat legfontosabb elemei az útvonal választók a „router”-ek, melyek elolvassák a csomagok címeit, és továbbítják egy olyan routerhez,

mely közelebb fekszik a csomag végállomásához. A csomagok a routerek sorozatán ugrálva jutnak célba. Számítógépünk segítségével megtudhatjuk, hogy az általunk feladott csomagok milyen routereken haladnak keresztül addig, míg eljutnak a célpontig. Bármelyik operációs rendszerben egy terminálablakot nyitva kiadhatjuk a „tracert” vagy „tracert” parancsot, ami sorban kiírja számunkra azoknak a routereknek a nevét, melyen keresztülhaladnak csomagjaink. Az *1. ábrán* láthatjuk az ELTE egyik tanszéke és a Bécsi Műszaki Egyetem webszervere közti útvonalon található routereket. Megtudhatjuk a routerek nevén és hálózati címén kívül azt az időt is (milliszekundumokban), ami ahhoz kell, hogy csomagunk az adott routerhez érjen és onnan egy válaszcsoomag visszaérkezzen hozzánk. A program 3-3 mérést végez minden routeren, és megadja annak eredményét. Minél távolabb, minél több lépésre van tőlünk egy router, annál hosszabb ideig tart a csomag utazása, illetve a visszaküldött nyugtacsomag megérkezése. Ráadásul a mérések általában különböző eredményekre vezetnek.

1. ábra. A tracert www.tuwien.ac.at parancs kiadása után megtudhatjuk, hogy milyen útvonalon jutnak el csomagjaink a Bécsi Műszaki Egyetem webszerverére.

```

C:\Documents and Settings\Vattay Gábor>tracert www.tuwien.ac.at
Otvonal követése a következőhöz: info.zv.tuwien.ac.at [128.138.182.138]
legfeljebb 30 ugrással:

  0  0 ms  0 ms  0 ms  192.168.288.1
  1  0 ms  1 ms  1 ms  192.168.288.1
  2  0 ms  1 ms  1 ms  192.168.288.1
  3  0 ms  1 ms  1 ms  192.168.288.1
  4  0 ms  1 ms  1 ms  192.168.288.1
  5  0 ms  1 ms  1 ms  192.168.288.1
  6  0 ms  1 ms  1 ms  192.168.288.1
  7  0 ms  1 ms  1 ms  192.168.288.1
  8  0 ms  1 ms  1 ms  192.168.288.1
  9  0 ms  1 ms  1 ms  192.168.288.1
 10  0 ms  1 ms  1 ms  192.168.288.1
 11  0 ms  1 ms  1 ms  192.168.288.1
 12  0 ms  1 ms  1 ms  192.168.288.1
 13  0 ms  1 ms  1 ms  192.168.288.1
 14  0 ms  1 ms  1 ms  192.168.288.1
 15  0 ms  1 ms  1 ms  192.168.288.1

Az útvonalkövetés elbárállt.
    
```

2. ábra. Az ELTE egyik gépe és a Bécsi Műszaki Egyetem webszervere közti körutazási idők mérése a ping www.tuwien.ac.at parancs segítségével. A parancs négy mérést végez, ezekből meghatározza a várakozási idő minimumát is.

```

C:\Documents and Settings\Vattay Gábor>ping www.tuwien.ac.at
info.zv.tuwien.ac.at [128.138.182.138] pingelés 32 bajt méretű adatokkal:

Válasz 128.138.182.138: bajt=32 idő=7 ms TTL=241
Válasz 128.138.182.138: bajt=32 idő=7 ms TTL=241
Válasz 128.138.182.138: bajt=32 idő=7 ms TTL=241
Válasz 128.138.182.138: bajt=32 idő=7 ms TTL=241

128.138.182.138 ping- statisztikája:
    Csomagok: küldött = 4, fogadott = 4, elvesztett = 0 (0% veszteség),
    Összesített válaszidő: minimális: 7ms, maximum: 7ms, átlag: 7ms
    minimum = 7ms, maximum = 7ms, átlag = 7ms
    
```

A csomagok terjedési ideje két részből tevődik össze. A csomagok a routerek között valamilyen kábelben keresztül haladnak. Rövid távolságok esetén (pl. egy intézményen belül) rézkábeleken, nagyobb távolságok esetén pedig optikai kábeleken haladnak a jelek. Ezekben az anyagokban a jelek terjedési sebessége állandó, kisebb a vákuumbeli fénysebességénél, de annak nagyságrendjébe esik. A terjedési idő másik részét az az idő teszi ki, amit a routerek a csomag feldolgozásával töltenek. Ez az idő attól függ, hogy a routerben hány csomag vár arra, hogy címzését elolvassák és útba igazítsák. A várakozási sor annál hosszabb, minél több csomag érkezik időegység alatt az adott routerhez.

Lehetőségünk van számítógépünk segítségével közvetlenül is megmérni azt a körutazási időt (Round Trip Time), ami ahhoz kell, hogy csomagunk egy másik számítógéphez érjen és onnan egy nyugtacsomag visszaérkezzen. A „ping” parancs kiadásával sokszor egymás-

1. táblázat				
Ping kísérlet az ELTE számítógépe és más egyetemek között				
	www.tuwien.ac.at Bécs	www.u-psud.fr Párizs	www.columbia.edu New York	www.ucsd.edu San Diego
2× földrajzi távolság	434 km	2 496 km	14 024 km	20 180 km
minimális körutazási idő	5 ms	36 ms	128 ms	191 ms

sebességét, ami körülbelül 110 000 km/s-nak adódik, ez közel harmada a vákuumbeli fénysebességnek. Természetesen ez a mérés számos pontatlansággal terhelt, és a kiszámított sebesség is csak valamiféle átlagnak tekinthető. Azonban jó

után megmérhetjük ezt az időt és statisztikát készíthetünk a mért körutazási időkből. A 2. ábrán egy ilyen mérést mutatunk be.

Sok mérést végezve meghatározhatjuk a legkisebb körutazási időt. Ez abban a ritkán előforduló esetben valósul meg, amikor csomagunk egyik routerben sem áll sorban. A minimális körutazási idő így jó közelítéssel jellemzi az adott útvonalon a kábeleken létrejövő fizikai késleltetés idejét.

Ezt felhasználva számítógépünkkel megmérhetjük az internet kábelein haladó csomagok terjedési sebességét. Ehhez választanunk kell a világ különböző pontjain olyan számítógépeket, melyekkel a kísérlet elvégezhető (válaszolnak a ping parancsra) és amelyek tőlünk mért távolságát meghatározhatjuk. Természetesen a kábelek pontos hosszát nehéz volna kideríteni, ezért azt a földrajzi távolsággal becsüljük. Minél távolabb van tőlünk egy számítógép, ez a szám annál pontosabban becsüli a valódi kábelek hosszát. Kísérletünkhöz a leginkább megfelelőek az egyetemi számítógépei, mert ezek webszervereit általában maguk az egyetemi tanszékek tartják fenn, és tényleg az egyetem területén találjuk meg őket. A kísérlethez kiválasztottam négy ilyen számítógépet Bécsben, Párizsban, New Yorkban és San Diegóban. A ping kísérletet sokszor elvégezve meghatároztuk az ELTE számítógépe és az 1. táblázatban felsorolt gépek között a legkisebb körutazás idejét, és meghatároztuk a földrajzi távolság kétszeresét, ami a kábeleken az oda-vissza utazáshoz szükséges.

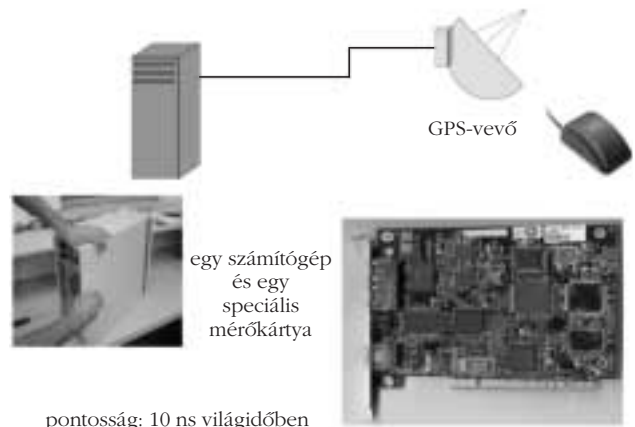
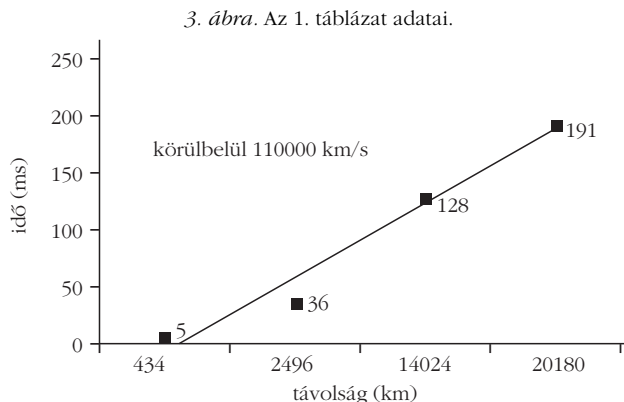
Várakozásunknak megfelelően a távolsággal monoton növekszik a minimális körutazási idő. A mért adatokat ábrázoltuk a 3. ábrán. A körutazási idő lineárisan nő a földrajzi távolsággal. Az egyenes meredekségéből meghatározhatjuk a jelek terjedésének átlagos

arra, hogy egy kis betekintést nyerjünk azokba az új mérési eljárásokba, melyeket ma az internet különböző tulajdonságainak mérésére dolgoztak ki.

Az internet precíz mérésére az elmúlt tíz évben számos új módszert és eszközt dolgoztak ki. A precizitás fokozására olyan hálózati mérőkártyákat hoztak létre, melyekkel a csomagok kiküldése 10–100 ns pontossággal időzíthető. A hálózati mérésekhez a pontos időt a legegyszerűbb a GPS-rendszer műholdjairól venni, melyet atomi órákhoz szinkronizálnak és globálisan pontos időt szolgáltatnak.

Az ELTE Komplex Rendszerek Fizikája Tanszék laboratóriumában számos ilyen speciális mérőberendezést használunk (4. ábra). Ezek segítségével már egy néhányszor 10 m hosszúságú közönséges ethernetkábelben terjedő jelek mikroszekundumos késleltetése is mérhető, és a jel sebessége is jól megmérhető. A mérések többsége azonban nem a fizikai késleltetés meghatározását szolgálja, hanem a routerekben létrejövő késleltetés fluktuációiból próbálnak visszakövetkeztetni a bennük létrejövő csomagforgalmi folyamatokra. Ilyen mérések segítségével megállapítható két számítógép közti maximálisan kihasználható sávsebesség, mely a mérnökök számára a hálózat egyik legfontosabb jellemzője. A fizikai kutatások számára is nagy jelentősége van a hálózati méréseknek. Ezek abban segíthetnek, hogy az asztro- és részecskefizikai mérésekben létrehozott tera- és petabájt méretű adatbázisok adatait a hálózaton keresztül gyorsan átvihessük.

4. ábra. Egy korszerű internetmérő berendezés tipikusan egy szerver PC-ből áll, melyhez egy GPS-vevő és egy speciális hálózati mérőkártya csatlakozik, melyek együttesen 10–100 ns csomagküldési pontosságot ér el.



X. SZILÁRD LEÓ NUKLEÁRIS TANULMÁNYI VERSENY

Beszámoló, II. rész

Sükösd Csaba
BME Nukleáris Technika Tanszék

A versenykiírás értelmében az I., illetve II. kategóriában versenyző diákok két-két feladata különböző volt. Ezeket, valamint a két kategóriában azonos számítógépes és mérési feladatot mutatjuk be. Részletes beszámolóinkat a verseny eredményének ismertetésével zárjuk.

Az I. kategória (11–12. osztályosok) utolsó két feladata

9. feladat (kitűzte: Sükösd Csaba)

Az ITER nevű, nemzetközi összefogásban Cadarache-ban (Franciaország) épülő, tokamak típusú kísérleti fúziós berendezésben a szupravezető tekercsek 11 T indukciójú mágneses mezőt hoznak létre. A több millió fokos deutérium-trícium plazmában $D+T \rightarrow {}^4\text{He} + n$ atommag-reakció következik be, amelyben 17,6 MeV energia szabadul fel. A plazma hőmérsékletének fenntartásához az is kell, hogy a keletkező ${}^4\text{He}$ részecskék (α -részecskék) legnagyobb része a plazmában adja le a mozgási energiáját (a szakemberek ezt α -fűtésnek hívják).

a) Mekkora a keletkezett α -részecskék mozgási energiája?

b) Az α -részecskék a mágneses erővonalak mentén spirális pályán mozognak. Legfeljebb mekkora sugara van ennek a spirálisnak, ha a mágneses indukció 11 T?

c) Mekkora átmérőjűnek kell lenni a plazmának, hogy a keletkezett α -részecskék 90%-a a mozgása során biztosan ne lépjen ki a plazmából, azaz a teljes energiáját a plazmában adja le?

Adatok, megjegyzés: Az α -részecske $6,644656 \cdot 10^{-27}$ kg tömegű. Tegyük fel, hogy az R sugarú plazmában egyenletes a részecskesűrűség, és a magreakciók is egyenletes sűrűséggel következnek be. (5 pont)

Megoldás:

A feladat megoldása három részre bontható.

a) Először azt határozzuk meg, hogy mekkora energiával keletkeznek az α -részek az említett atommag-reakcióban. Annak ellenére, hogy a reakció több millió fokos hőmérsékleten zajlik, a D és a T kezdeti mozgási energiáját elhanyagolhatjuk, hiszen az a reakcióban felszabaduló energiának csak mintegy ezreléke. Ennek alapján úgy vehetjük, hogy a D és a T „áll” a reakció előtt, azaz a teljes lendület nulla. A lendület úgy marad meg, ha a keletkező neutron és az α -részecske lendületének abszolút értéke (p) megegyezik, és irányuk ellentétes. Az energiamérleg-egyenlet tehát:

$$\frac{p^2}{2 m_n} + \frac{p^2}{2 m_\alpha} = 17,6 \text{ MeV.}$$

Mivel $m_n \approx m_\alpha/4$, így kapjuk, hogy $E_\alpha = 3,52$ MeV.

b) Az α -részecskék adott sebessége (energiája) mellett a spirális pálya sugara a sebességvektornak a mágneses télerősség-vektorral bezárt szögétől függ. Ha a sebességvektor párhuzamos a télerősség-vektorral, akkor a részecske egyenes vonalban halad („0 sugarú” spirális). A maximális pályasugarat akkor kapjuk, amikor a sebességvektor éppen merőleges a mágneses télerősség-vektorra. Ekkor is elfajult lesz a spirális: körmozgást kapunk. A körpálya sugarát a centripetális gyorsulásból határozhatjuk meg:

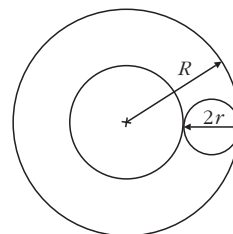
$$\frac{v^2}{r} = \frac{q v B}{m}.$$

Ebből kapjuk

$$r = \frac{m v}{q B} = \frac{\sqrt{2 m E_\alpha}}{2 e B}.$$

Behelyettesítve az adatokat az α -részecskék maximális pályasugarára 2,46 cm adódik.

c) Az előző pont alapján azok az α -részecskék, amelyek a plazma szélétől $2r = 2 \cdot 2,46 = 4,92$ cm-rel beljebb keletkeznek a plazmában, biztosan nem jutnak ki a plazmából útjuk során. Annak a feltétele tehát, hogy ezek aránya 90% legyen:



$$\frac{\pi (R - 2r)^2}{\pi R^2} = 0,9.$$

Ebből R kifejezhető:

$$R = r \frac{2}{1 - \sqrt{0,9}}.$$

Behelyettesítve az $r = 2,46$ cm értéket, kapjuk $R = 95,88$ cm. Azaz a „plazmafalon” átmérőjének majdnem 2 méternek kell lennie! Érthető, hogy miért van szükség óriási berendezésre az önfenntartó reakció megvalósításához.

Megjegyzések: Ténylegesen ennél kisebb átmérőre van szükség. A megoldás során két közelítést is tettünk. Az egyik az, hogy a plazma egyenletes sűrűségű. A

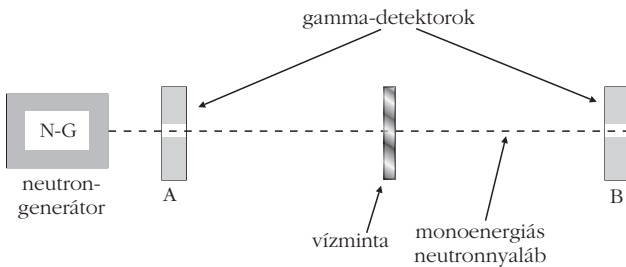
valóságban a plazma közepe sűrűbb, ezért a széle körüli részekben viszonylagosan kevesebb részecske tartózkodik, így a kiszökés is kisebb valószínűségű. A másik ok, ami miatt valamivel kisebb plazmasugár is elegendő az, hogy a szélén (az $R-2r$ körgyűrűben) keletkezett α -részek egy része is benne marad a plazmában, attól függően, hogy éppen milyen irányú sebességvektorral keletkeztek. Ezeket pedig a megoldásban nem vettük figyelembe a 90% meghatározásakor.

10. feladat (kitűzte: Szűcs József)

Neutronok ^1H magokban való elnyelődésének vizsgálatára neutrongenerátorból keskeny, monoenergiás neutronnyalábot nagyon vékony vízmintán vezetnek keresztül (lásd *ábra*). A vízminta előtt és mögött egy-egy gamma-detektorral (A és B) regisztrálják a $^1\text{H}(n,\gamma)^2\text{H}$ magreakció során kibocsátott gamma-fotonokat. Az egyik detektor $E_1 = 3,32$ MeV energiájú, a másik detektor pedig $E_2 = 3,57$ MeV energiájú gamma-fotonokat detektál. A detektált fotonok irányát vehetjük a neutronnyalábbal párhuzamosnak!

a) Melyik detektor (A vagy B) érzékeli az E_1 energiájú gamma-fotonokat, és miért?

b) A mért adatokból számítsuk ki a részecskenyaláb neutronjainak E_n energiáját és a keletkező deuteronok E_k kötési energiáját!



Adatok: A számításakor a neutronok tömegét vegyük $m_n = 1,67 \cdot 10^{-27}$ kg kerekített értéknek, a deuteron magokét $m_D = 3,34 \cdot 10^{-27}$ kg-nak. $1 \text{ MeV} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J}$, $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ értékekkel számoljunk. (5 pont)

Megoldás:

a) A bejövő neutronok lendületvektorának iránya (és ezzel a reakciópartnerek teljes lendületének iránya is) a „B” detektor felé mutat. Ezért a „B” detektorban detektált foton lesz a nagyobb energiájú, hiszen ebben az esetben a gamma-foton a reakció teljes lendületéből nagyobb részt hordoz, mint amikor a foton az „A” detektor felé bocsátódik ki. Nagyobb lendület pedig nagyobb energiát is jelent $E = pc$ alapján.

b) Az energiák kvantitatív meghatározásához a reakciók lendület- és energiamegmaradási egyenleteit kell felírni mindkét esetben.

Előre szóródó foton esetében a megmaradási tételek egyenletei:

$$p_n = p_D + \frac{E_f}{c}, \quad (1)$$

$$\frac{p_n^2}{2m_n} + E_k = \frac{p_D^2}{2m_D} + E_f. \quad (2)$$

ahol p_n és p_D a neutron és a deuteron, az E_f/c pedig a gamma-foton lendülete, E_k a deuteron kötési energiája, E_f az előre haladó foton energiája.

Megjegyzés: A nem nulla nyugalmi tömegű részecskék mozgási energiáját a klasszikus képlettel írhatjuk fel, mivel azok nagyságrendje legfeljebb néhány MeV, amely a körülbelül 1000–2000 MeV nyugalmi tömegnek megfelelő energiák mintegy 0,1%-a, így a tömegnövekedés elhanyagolható.

Visszafelé szóródó foton esetében a megmaradási egyenletek:

$$p_n = p_D' - \frac{E_f'}{c}, \quad (1')$$

$$\frac{p_n^2}{2m_n} + E_k = \frac{p_D'^2}{2m_D} + E_f', \quad (2')$$

ahol p_D' az előre lökődő deuteron, az (E_f'/c) pedig a hátra szóródó foton lendülete, míg E_f' a foton energiája.

Az (1') és az (1) egyenletek kivonásából kapjuk a (3), a (2') és (2) egyenletek különbségéből pedig a (4) egyenletet:

$$p_D' - p_D = \frac{E_f + E_f'}{c}, \quad (3)$$

$$p_D'^2 - p_D^2 = 2m_D(E_f - E_f'). \quad (4)$$

A (4) és (3) hányadosából egyszerűsítés és rendezés után kapjuk az (5) egyenletet:

$$p_D' + p_D = \frac{E_f - E_f'}{E_f + E_f'} 2m_D c. \quad (5)$$

A (3) és az (5) egyenlet összeadása, illetve kivonásából megkapjuk mindkét esetre a deuteronok lendületét:

$$p_D' = \frac{E_f - E_f'}{E_f + E_f'} m_D c + \frac{E_f + E_f'}{2c}, \quad (6)$$

$$p_D = \frac{E_f - E_f'}{E_f + E_f'} m_D c - \frac{E_f + E_f'}{2c}. \quad (7)$$

Az (1) egyenletből pedig a neutronok kezdeti lendülete adódik:

$$p_n = \frac{E_f - E_f'}{E_f + E_f'} m_D c + \frac{E_f - E_f'}{2c}. \quad (8)$$

A (6), (7), (8) egyenletekbe az adatok behelyettesítésével nyerjük az alábbi lendületértékeket, melyekből a neutronok és a deuteronok mozgási energiája kiszámítható:

$$p_D' = 3,82 \cdot 10^{-20} \text{ kg } \frac{\text{m}}{\text{s}},$$

$$E_D' = \frac{p_D'^2}{2m_D} = 2,18 \cdot 10^{-13} \text{ J} = 1,27 \text{ MeV},$$

$$p_D = 3,46 \cdot 10^{-20} \text{ kg } \frac{\text{m}}{\text{s}},$$

$$E_D = \frac{p_D^2}{2m_D} = 1,79 \cdot 10^{-13} \text{ J} = 1,12 \text{ MeV},$$

$$p_n = 3,65 \cdot 10^{-20} \text{ kg } \frac{\text{m}}{\text{s}},$$

$$E_n = \frac{p_n^2}{2m_n} = 3,99 \cdot 10^{-13} \text{ J} = 2,49 \text{ MeV}.$$

A (2) vagy (2') energiamérleg-egyenletekből pedig a deuteron kötési energiájára kapjuk az $E_k = 3,52 \cdot 10^{-13} \text{ J} = 2,2 \text{ MeV}$ értéket.

Megjegyzés: Ilyen nagy energiájú neutronok protonokon történő befogódásának roppant kicsiny a valószínűsége (a hatáskeresztmetszet mikrobarnokban mérhető), lassú neutronok befogódásának valószínűsége több nagyságrenddel nagyobb. Ezért nagyon vékony céltárgyat kell készíteni, hogy a gyors neutronok ne fékeződhessenek le, és ne zavarják meg a mérést. Vékony céltárgy esetén pedig a reakciósebesség (időegység alatt bekövetkező reakciók száma) lesz roppant kicsiny. Tehát e folyamat tényleges megmérése igen gondosan előkészített, hosszú ideig tartó kísérlettel történhetne csak meg.

II. kategória (juniorok) utolsó két feladata

9. feladat (kitűzte: Ujvári Sándor)

Becsüld meg, mennyivel csökken egy atomerőmű üzemanyag-kazettájának tömege, ha a kiegészítés során a benne lévő ^{235}U magok 10%-a szenved hasadást! Az üzemanyag-kazettában lévő UO_2 tömege kezdetben 220 kg, és ebben a ^{235}U dúsítási aránya 3%. (Tegyük fel, hogy körülbelül 200 MeV szabadul fel minden hasadáskor, és csak az ^{235}U hasadásával számolunk.) (5 pont)

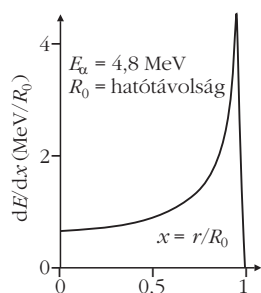
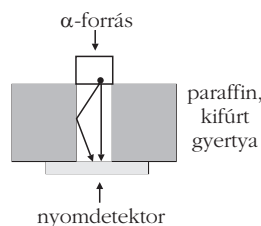
Megoldás: A viszonylag könnyű számítást elvégezve kapjuk: $\Delta m = 0,526 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$, azaz körülbelül 0,53 g.

10. feladat (kitűzte Kaszás Dezső)

Szilárdtest-nyomdetektorral az *ábra* szerinti elrendezésben kényelmesen vizsgálható α -részecskék szóródása atommagokon. A szóródott részecskéket arról ismerhetjük meg, hogy az általuk keltett nyom a maratás után más, mint a detektort irányváltozás nélkül elérő részecskéké.

Vajon hogyan tér el a szóródott részecskék nyoma a nem szóródott részecskék nyomától? Indokold is meg a választ! (5 pont)

Megoldás: Az α -részecskék útjuk végén roncsolják legjobban az anyagot (az *ábrán* példaként egy 4,8 MeV ener-



giájú α -részecske energialeadásának eloszlását mutatjuk be). Jelöljük R_0 -val az alfa-részecskék hatótávolságát az anyagban. A merőlegesen beesett részecskék természetesen ilyen mélységben hagynak nyomot (*ábra*). A ϕ szög alatt beesett részecskék azonban csak $b = R_0 \cdot \cos\phi$ mélységig jutnak el. Mivel a maratás többé-kevésbé egyenletes rétegeket távolít el a nyomdetektor felszínéről, először azon részecskék nyomait látjuk majd, amelyek ferdén estek be a felületre. Ezek lesznek a szóródott részecskék nyomai. A nem (vagy csak kis szögben) szóródott részecskék nyomait hosszabb idejű maratás után tehetjük láthatóvá, miután vastagabb anyagréteget lemarattunk a nyomdetektor felszínéről. (A zsűri itt mond köszönetet *Tóth Eszter* tanárnőnek, aki a megoldások ismertetése során fontos kiegészítő megjegyzést tett.)

Számítógépes feladat

A versenyzők a következő szövegű feladatkitűzést kapták: „Ismert, hogy egy pontszerű sugárforrástól R távolságra lévő detektor által érzékelt gamma-fotonok száma a detektor távolságának négyzetével fordítottan arányos, azaz $N \sim 1/R^2$. Egy kiterjedt detektornál azonban kérdéses az, hogy a detektor mely részétől kell mérni az R -et? A detektor geometriai homlokfelületétől (a forráshoz legközelebb lévő felülettől)? A detektor közepétől? Vagy valahonnan más-honnan?

A mérés célja:

A szimuláció segítségével egy kiterjedt (6 cm átmérőjű és 6 cm magas), henger alakú szcintillációs detektor „effektív homlokfelületének” helyzetét kell meghatározni különböző energiájú gamma-fotonokra vonatkozólag. A detektor egy radioaktív forrás által kibocsátott gamma-sugarakat észleli, és azok spektrumát fel tudjuk venni.

A pontszerű radioaktív forrás „kevert” radioaktív izotópokat tartalmaz, és a következő energiájú gamma-fotonokat bocsátja ki: 662 keV, 2560 keV és 3750 keV.

A detektort a sugárforrástól 3 cm és 40 cm közötti tartományban tudjuk mozgatni. A programról leolvashatjuk a detektor geometriai homlokfelületének távolságát a sugárforrástól.

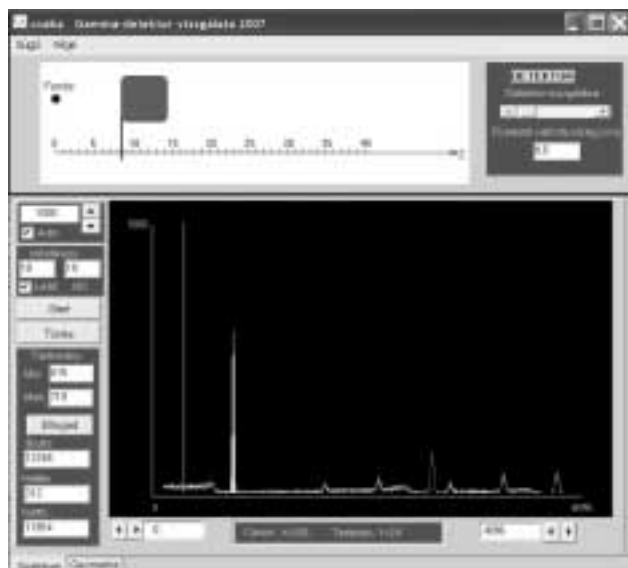
Legyen az effektív homlokfelület d cm-rel mélyebben a detektor belsejében, a geometriai homlokfelület mögött. Ez azt jelenti, hogy a detektor által érzékelt N beütésszám

$$N = \frac{\text{konst}}{(r+d)^2}, \quad (1)$$

ahol R a detektor geometriai homlokfelületének távolsága a sugárforrástól. Több, különböző R távolságban való méréssel a d távolság meghatározható.

Segítség: vegyük az (1) egyenlet reciprokát, és vonjunk mindkét oldalból négyzetgyököt. Ekkor látható, hogy $1/\sqrt{N}$ -et az R függvényében ábrázolva egyenest kapunk. Az egyenes paramétereiből a d meghatározható (pl. egyenes illesztésével a mérési pontokra).

A program kezelőfelületét az alábbi *ábrán* láthatjuk:



Konkrét feladatok:

1) Először „kalibráljuk” a detektorunkat, azaz a fentebb felsorolt, három ismert gamma-energia segítségével tájékozódjunk arról, hogy melyik gamma-foton melyik „csatorna” környékére ad „teljesenergia-csúcs”-ot. (A csatornaszám az energia lineáris függvénye.)

2) Vegyük fel a spektrumot több különböző detektortávolság mellett, és jegyezzük fel a három „teljesenergia-csúcs”-ban talált nettó beütésszámokat azonos mérési idők mellett (Lásd a „program használata” című útmutató „csúcsterület meghatározása” című pontját).

3) A kapott beütésszámok alapján határozzuk meg a detektor „effektív homloklfelületé”-nek helyzetét a három gamma-energiára vonatkozólag. Adjuk meg az eredmények bizonytalanságát (hibáját) is. (Ehhez akár milliméter-papiros egyenesillesztést, akár az Excel-programot, akár más, egyéni módszert és segédeszközt is használhatunk.) Minden esetben dokumentáljuk azonban, hogy a nyers mérési eredményekből hogyan jutottunk el a végeredményig!

4) Próbáljunk magyarázatot adni arra, hogy miért függ a megfigyelt módon az effektív homloklfelület helyzete a gamma-fotonok energiájától!

5) „*Szorgalmi*” feladat: adjunk magyarázatot arra, hogy miért látunk háromnál több csúcsot. (Ez nem szerves része a feladatnak, de többletpontot lehet érte kapni. Tehát, ha nem sikerül gyorsan választ adni erre, ne töltsünk el vele sok időt.)

Fontos!

Beadandó a „Mérési jegyzőkönyv”, amely tartalmazza

- a mérést végző azonosítóját,
- a mérések minden fontos paraméterét,

- a mért nyers adatokat,
- az eljárást (lépésenként), amellyel a végeredményhez eljutottunk,
- a végeredmény(ek)e)t,
- a végeredmény(ek) hibáját és a hiba kiszámítási vagy becslési módját,
- az eredmények diszkutálását,
- valamint minden olyan információt, amely a mérés reprodukáláshoz szükséges.

A mérési jegyzőkönyvnek olyannak kell lennie, hogy annak alapján bárki a mérést megismételhesse, és (a statisztikus hibákon belül) hasonló eredményt kaphasson”.

Kísérleti feladat

A mérési eszközök mellé a versenyzők a következő tájékoztatót kapták:

„ β -sugárzás energiájára adott nagyságrendi becslés”

A radioaktivitás felfedezése (1896) után hamarosan megállapították, hogy a sugárzás általában 3 komponensre bontható: α -, β -, és γ -sugárzásra. Az is kiderült, hogy a β -sugárzás során elektronok lépnek ki a sugárzó anyagból. Nagy meglepetést okozott viszont, hogy ezeknek az elektronoknak a megszokott kémiai energiáknál nagyságrendekkel nagyobb volt az energiájuk. Ebben a mérésben viszonylag egyszerű eszközökkel meghatározzuk egy β -sugárzó preparátumból kilépő elektronok energiájának nagyságrendjét.

A mérés elve:

A kollimált (nagyjából egy irányba haladó) β -nyalábot Geiger–Müller-számlálócsővel detektáljuk. A mozgó elektronokat mágneses mezővel eltérítjük, és a mágneses mező ismeretében az eltérés mérésével adunk becslést az elektronok energiájára. Az erős állandó mágnesekkel létrehozott mágneses indukció erősségét egy árammal átjárt vezetőre (kengyelre) gyakorolt hatásából lehet meghatározni.

A méréshez rendelkezésére áll:

- egy kollimátorban elhelyezett radioaktív sugárforrás (csak β -sugárzást bocsát ki),
- egy számítógéphez csatlakoztatott Geiger–Müller-számláló,
- egy tartóba erősített mágnespár,
- egy felfüggesztett kengyel,
- árammérő,
- változtatható ellenállás,
- 9 voltos elem.

A mágnes átmérőjét és a kengyel adatait, (méret, tömeg) a kísérletvezető tanár adja meg.

Fontos!

Beadandó a „Mérési jegyzőkönyv”, amely tartalmazza

- a mérést végző azonosítóját,
- a mérések minden fontos paraméterét,
- a mért nyers adatokat,
- az eljárást (lépésenként), amellyel a végeredményhez eljutottunk,

- a végeredmény(ek)et,
- a végeredmény(ek) hibáját és a hiba kiszámítási vagy becslési módját,
- az eredmények diszkutálását,
- valamint minden olyan információt, amely a mérés reprodukáláshoz szükséges.

A mérési jegyzőkönyvnek olyannak kell lennie, hogy annak alapján bárki a mérést megismételhesse, és (a statisztikus hibákon belül) hasonló eredményt kaphasson.

Tanácsok a feladat végrehajtásához:

a) Először mérjük meg a „háttér”. Távolítsuk el a kollimált sugárforrást, és mérjük a beütésszámot lehetőleg hosszú ideig. A mért beütésszám mellett jegyezzük fel azt is, hogy mennyi ideig mértünk.

b) Mérjük meg a kollimátorból kijövő β -sugárzást *mágnes nélkül*, több különböző szög mellett annak érdekében, hogy a mért „szögeloszlást” majd összehasonlíthassuk a mágnes jelenlétében mért szögeloszlással. A mért beütésszámokat korrigáljuk a háttérrel!

c) Vegyük fel a szögeloszlást ismét, ezúttal a *mágnes jelenlétében*. A szögeloszlást összehasonlítva az előző pontbeli szögeloszlással, határozzuk meg az eltérítés szögét (α)!

d) A *mágneses indukció erősségének meghatározása* a kengyel segítségével: Célszerű a kengyelt a mágneses mező széléhez tenni, és akkora áramerősséget beállítani a potenciométerrel, hogy a kengyel kitérítve kerüljön a mágneses mező közepére. A kitérítés szögéből (a kengyel adatainak az ismeretében) határozzuk meg a kengyelre ható erő nagyságát, és ebből a mágneses indukció értékét!

e) A c) pontban meghatározott szög és a d) pontban meghatározott mágneses indukció segítségével adjunk becslést az elektronok átlagos energiájára! Az energia meghatározásánál figyelembe kell venni, hogy az elektronok sebessége a fénysebesség nagyságrendjébe eshet.

f) Diszkutáljuk (elemezzük) az eredményt. Milyen hibák adódhatnak a mérés során, és ezek mekkorák lehetnek? Miért csak nagyságrendi becslést ad ez a mérés?

Néhány segítség:

1) Az eltérítés szögéből határozzuk meg először annak a körpályának a sugarát (R), amelyen a β -részecskék mozognak. A rajz alapján

$$\tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{d/2}{R}$$

A szög méréssel R meghatározható.

2) A mágneses indukció erősségének a meghatározása: ha a kengyelben I áramerősség folyik, és a kengyel éppen a d átmérőjű mágnes „közepére” lóg be, akkor a rá ható erő: $F = B \cdot I \cdot d$. Az F erőt a kengyel függőlegestől való kitérülésének szögéből (φ) lehet

meghatározni (egyszerű statikai feladat). Vegyük figyelembe, hogy a súlyerő a kengyel súlypontjában „hat”, a mágneses mező pedig a kengyelnek a mágneses mezőben lévő részén!

3) A mágneses térben haladó részecske p lendületét a B mágneses indukció és az R pályasugár ismeretében meghatározhatjuk abból kiindulva, hogy a körpályához szükséges centripetális erőt a mágneses Lorentz-erő ($F_L = e \cdot v \cdot B$) adja:

$$a_{cp} = \frac{F_L}{m}, \text{ azaz } \frac{v^2}{R} = \frac{e \cdot v \cdot B}{m}$$

és ebből $p = m \cdot v = e \cdot R \cdot B$.

4) A lendületből az energiát relativisztikus összefüggés segítségével határozzuk meg.

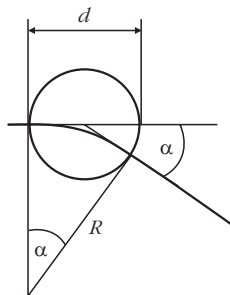
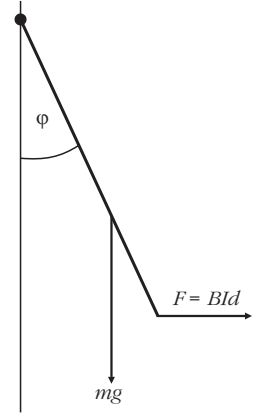
$$E_{mozgási} = \sqrt{(pc)^2 + (m_0 c^2)^2} - m_0 c^2.$$

Itt m_0 az elektron nyugalmi tömege ($m_0 c^2 = 0,511 \text{ MeV} = 0,8176 \cdot 10^{-13} \text{ J}$)."

A verseny értékelése

A verseny döntőjének délelőttjén a tíz elméleti feladat megoldására 3 óra, délután a számítógépes feladatra másfél óra, a kísérleti feladatra szintén másfél óra állt a versenyzők rendelkezésére. Egy-egy feladat teljes megoldása 5 pontot, a számítógépes feladat teljes megoldása 20 pontot, a kísérleti feladat teljes megoldása 30 pontot hozhatott, ez összesen 100 pont lehetett. Az idén valamivel alacsonyabb pontszámok születtek, mint 2006-ban, mivel a számítógépes feladat különösen nehéznek bizonyult. A legkiválóbb I. kategóriás versenyző 70 pontot ért el (tavaly 78 pont volt a legjobb eredmény). A legjobb junior versenyző 76 pontot ért el (tavaly 83 pont volt a legjobb). Az elméleti feladatok közül legnehezebbnek az I. kategóriás versenyzők 8. és 10. feladata bizonyult, de minden feladatra – még ezekre is – érkezett helyes megoldás! Az elméleti feladatok megoldásában *Vajna Szabolcs* (Berze Nagy J. Gimn. Gyöngyös), valamint *Meszéna Balázs* (Fazekas M. Főv. Gyak. Gimn. Budapest) érték el a legjobb eredményt – egyaránt 39 pontot a maximális 50-ből. A mérési feladatot *Nagy Viktor* (Zrínyi M. Gimn. Zalaegerszeg), valamint *Horváth László* (Batthyány K. Gimn. Szigetszentmiklós) oldotta meg maximális, 30 ponttal. Különösen értékelendő, hogy Horváth László junior kategóriás versenyzőként érte el ezt a szép eredményt. A számítógépes feladatra a legtöbb pontot Vajna Szabolcs kapta, aki a maximális 20 pontból 14 pontot tudott megszerezni.

Az összesített pontszámok alapján 2007-ben a díjakat a következő diákok kapták:



I. kategória (11–12. osztályosok)

- I. díj: KÓNYA GÁBOR (70 pont), Fazekas M. Főv. Gyak. Gimn. (Budapest), tanára *Horváth Gábor*;
II. díj: NAGY VIKTOR (68 pont), Zrínyi M. Gimn. (Zalaegerszeg), tanára *Pálovics Róbert*;
III. díj: VAJNA SZABOLCS (66 pont), Berze Nagy J. Gimn. (Gyöngyös), tanárai *Ombódiné Madai Judit* és *Kiss Miklós*.

„Junior” kategória

- I. helyezett: HORVÁTH LÁSZLÓ (76 pont), Batthyány K. Gimn. (Szigetszentmiklós), tanára *Bülgözdi László*;
II. helyezett: LOVAS LIA IZABELLA (64 pont), Leőwey K. Gimn. (Pécs), tanára *Simon Péter*;
III. helyezett: BOKÁNYI ESZTER (58 pont), Zrínyi M. Gimn. (Zalaegerszeg), tanára: *Pálovics Róbert*.

A záróülésem a tanulói díjak és oklevelek átadása után került sor az idei *Delfin-díj* átadására, amelyet minden évben a tanárok pontversenyében a legjobb eredményt elért tanárnak ítél oda a versenybizottság. Ebben az évben a Delfin-díjat ZSIGRI FERENC, az Apáczai Csere J. Gyakorló Gimn. (Budapest) tanára kapta. A Delfin-díj alapszabályának megfelelően a Delfin-díj bizottságnak lehetősége van egy külön Delfin-díj ki-

adására is. Ezzel a lehetőséggel az idén élt a bizottság, SÜKÖSD CSABA (BME Budapest) részesült külön Delfin-díjban a nukleáris ismeretek terjesztésében kifejtett tevékenységéért, valamint a Szilárd Verseny versenybizottsága vezetőjeként végzett munkájáért. A *Marx György Vándordíjat* – amelyet minden évben a pontversenyben legkiválóbb eredményt elért iskolának ítél oda a Versenybizottság – idén a *Zrínyi Miklós Gimnázium* (Zalaegerszeg) nyerte el. Az iskola teljesítményét még jobban dicséri, hogy már 2003-ban is ők őrizhették egy évig a Marx György Vándordíjat.

A Magyar Nukleáris Társaság „női” szakcsoportja, a WIN (Women in Nuclear) meglepetést készített a Szilárd Leó versenyen résztvevő diákok és tanárok számára. A gazdagon megrakott ajándécsomagban atomenergiával és nukleáris ismeretek terjesztésével kapcsolatos sok hasznos anyag, nyomtatvány, CD volt.

Az ünnepi beszédek után Sükösd Csaba köszönetét fejezte ki a versenyt támogató Paksi Atomerőműnek és a paksi Energetikai Szakközépiskolának a verseny megrendezésében nyújtott segítségükért, valamint az MNT WIN szakcsoportjának az ajándékokért. A versenyt 2008-ban is megrendezzük változatlan tematikával (versenykiírás a *Fizikai Szemlében*). Ismételten bátorítjuk a határon túli magyar tannyelvű iskolák tanulóit is arra, hogy nevezzenek be az Országos Szilárd Leó Fizikaversenyre.

ÉLMÉNYRÉSZECSKÉK A RÉSZECSCKE-ÉLMÉNYEINKBŐL

– Beszámoló a magyar fizikatanárok 2007. évi továbbképzéséről a CERN-ben

Kirsch Éva

Debreceni Egyetem Kossuth Lajos Gyakorló Gimnáziuma, Debrecen

Elblinger Ferenc

Garay János Gimnázium, Szekszárd

Tepliczky István

Bláthy Ottó Villamosipari Szakközépiskola, Miskolc

A CERN kezdeményezésére 2006 januárjában indult a nemzeti nyelven folyó egyhetes részecskefizikai tanárprogramoknak a rendszere. 2006 augusztusában elsőként a magyar fizikatanárok vettek részt ilyen módon szervezett programon. 2007. augusztus 12–19. közt, immáron másodsorra Magyarországról, 39 középiskolai fizikatanár látogathatott el a svájci–francia határra. A CERN részéről az idén is *Mick Storr* biztosította a feltételeket és látta el a házigazda szerepét, a tanulmányút itthoni megszervezését pedig most is *Sükösd Csaba* és *Jarosievič Beáta* vállalták, akik a tavalyi jól bevált szervezési formákat és ötleteket újjal vegyítve és továbbfejlesztve még változatosabb programot biztosítottak számunkra. A tavalyi tanulmányút sikere a fizikatanárok közt gyorsan elterjedt, úgyhogy az idén még nagyobb várakozásokkal indult útjára a csapat. Persze mindenki mást és mást

várt ettől a programtól, más és más motívumok jutatták el Genfbe, vagy éppen a Mont Blanc-hoz. Például *Tepliczky István* erről így vélekedett:

„Régóta bosszant az az emberi tulajdonság (és buktató), hogy aki hangosabb, annak nagyobb valószínűséggel van igaza. Nos, sajnos így van ez évek hosszú sora óta a nukleáris technika, az atomenergia előállítása és felhasználása vonatkozásában hazánkban és talán Európában is. A magam módján és szakterületén igyekszem is tenni ellene, amit tudok. Az egyik vároményem az volt, hogy tapasztalatokat szerezzek, olyan információkat kapok, melyek segítségével érvekkel, konkrét adatokkal bizonyítani tudom a szakmai tudás fontosságát, értékét és becsületét.

Gyerekkorom óta érdekel a csillagászat, azon belül is a kozmológia, a Világegyetem keletkezésének és fejlődésének kérdései. A filozófus most azt mondja ben-

nem, hogy az a kérdés, honnan jöttünk és hová megyünk. Már *Steven Weinberg* 1982-ben kiadott könyvében (*Az első három perc*) azt fejtegeti, hogy az Univerzum keletkezésének kulcsa a mikrovilágban, az elemi részecskék között keresendő. Azt reméltem tehát, hogy új ismereteket szerzek a CERN-beli utazáson kozmológiából is.

Végül – bár az elképzelésemről tudom, hogy naiv – azt reméltem, hogy a látottakat és tapasztaltakat átadhatom elsősorban a diákjaimnak és a kollégáimnak.

Én az a típus vagyok, aki egy-egy nagyobb utazás előtt érdeklődik, tájékozódik, »utána néz« az úti céljának. Ezt tettem most is. Elsősorban az internet volt a forrás, ahol nézegettem a CERN honlapját. Talán elmondhatom, hogy kialakult egy kép, mire is számíthatok Svájc és Franciaország határán. A valóság azonban meghaladta a képzeletemet, őszintén mondom...”

Az alapok

Milyen elméleti ismeretekkel célszerű szemlére indulni egy ilyen kutatóintézetben? Korábbi tudásunkat előadónk (*Horváth Dezső, Vesztergombi György, Fodor Zoltán, Trócsányi Zoltán*) porolták le és hízlalták fel alaposan. Gyönyörűen bontakozott ki az a kép, hogy a világ „ugyan végtelen, de kerek”. Nem a geometriájára gondolunk, hanem a makro- és mikrovilág olyan összefonódására, mely a természettudományos gondolkodó számára a jelenlegi ismereteiben való hitet erősíti. Ha az olyan nagyon nagy dolgok kérdéseiben, mint az Univerzum, nagyon messzire megyünk térben és/vagy időben, akkor megérkezünk a nagyon kis dolgok mélyre vezető világába.

Hogyan is? Kozmológiai ismereteink szerint a jelenlegi Világegyetem egy ősrobbanást követő fejlődés eredménye. A kezdeti pillanatot már a másodperc milliárdod részéig is megközelítettük a jelenségek leírásában, itt azonban elakadtunk. A fizika ismert törvényei a továbbiakban nem alkalmazhatók, az anyag ekkor realizálódó állapota még felderítendő terület. Ugyanakkor az időbeli visszautazás egy bizonyos pontig egyenértékű a térbeli távolra utazással. Az Univerzum 13,7 milliárd fényévnire lévő részéről jövő információk 13,7 milliárd évvel ezelőtti időkről szólnak. Ha tovább tudnánk menni térben, távolabb látnánk időben is. Amit legmesszebb látunk, az az elektromágneses plazma felénk közelebb eső határa, ez a legtávolabbi idő, amelyből tágabb értelemben vett fény juthatott hozzánk. Ez csak pár százezer évre közelíti a kezdetet. Az ennél korábbi, azaz ettől távolabb létező plazma átlátszatlan számunkra, mert benne a fény elnyelődött. Bár nem látunk e fal mögé, mögötte is a részecskék világát sejtjük, a még nyitott kérdésekre a válaszokat a részecskefizikától reméljük. Mi ez, ha nem bizonyíték arra, hogy a világunkról alkotott elképzelésünk egységes rendszert formáz, vagyis az emberi lépték szerint hiteles?

Az elemi részecskék struktúrájának, kölcsönhatásainak tanulmányozása, társaik felfedezése olyan

nagy energiájú ütközésekben lehetséges, melyek az ősrobbanást követő egyre közelebbi állapotot modellezik. Ezek az ütköző részecskék sokfélék lehetnek. Mi részletesebben az elektron–pozitron, és a proton–proton ütközésről hallhattunk, valamint nehézionok nagy energiájú ütközéseiről. Ez utóbbival például olyan állapotot remélnek produkálni, ami akkor lehetett jellemző, amikor a kvarkok szabadon léteztek, az egyensúly nem a hadronok, hanem ezek között volt. Ezt az állapotot a szakirodalom kvark–gluon plazmának (QGP) nevezi.

Az anyag alkotórészekből való felépítettsége ma már természetes gondolkodási alap. Annak elemi szintje azonban az évszázadok során egyre mélyebbre került. Az oszthatatlan (atom) sokszor oszthatónak bizonyult. Az arisztotelészi négy alapelemtől a demokritoszi atomokon, a thomsoni elektronokon át vezetett az út az 1960-as évek sok új részecskéjéig, azok gerjesztett állapotaiig és az őket összekapcsoló három alapvető kölcsönhatásig (elektromágneses-, gyenge- és erős kölcsönhatás). Közben felbukkant, majd ténnyé vált az antianyag létezése, ami az elemi szinten az antirészecskék létét jelenti.

A ma elfogadott, a 70-es években született Standard Modell (SM) pontszerű alkotóelemekről és alapvető szimmetriákról szól. E modell helyességének végső igazolása elsőrendű feladat a részecskefizikában. Ha a most eleminek tekintett részecskék világába bekukkantunk, több száz tagot számlálhatunk. A SM valamennyiről jól számot tud adni, tulajdonságok alapján csoportokba, családokba rendezi őket. A Standard Modell azonban feltételez még egy részecskét, mely viszonylag nehéz, semleges és spin nélküli. Ez a Higgs-bozon. (Valójában egy Higgs-térnek nevezett teret feltételez, amellyel való kölcsönhatásból származik az anyagi részecskék tömege. E tér részecskéje a Higgs-bozon.) Megtalálása az SM helytállóságának bizonyításához elengedhetetlen. Ha ez nem sikerül, akkor a SM elvetendő, s a fizikusoknak alternatív modellt kellene keresnie. A részecskefizikusok többsége rendíthetetlenül hisz a Higgs-bozonban, és abban, hogy csak idő kérdése a megtalálása.

Az eszközök

A megtaláláshoz azonban eszköz kell. Az eszköz egyik alapvető része a gyorsító, ami a keresett részecske létrejöttéhez szükséges esemény feltételeit biztosítja, a másik a detektor, amely észreveszi a részecskét.

A *gyorsítás* töltött részecskéken, elektromos térrel történik. Adott feszültségkülönbségen átjutva a részecske többletenergiára tesz szert. Nagyobb mértékű energianyeréshez nagyobb feszültség, vagy többször ismétlődő gyorsítás szükséges. A nagyobb feszültség határait az átütés veszélye, illetve a nagy hosszúságon történő térkiszóródás korlátozza, tehát marad a többletenergia megoldás. Ha a részecske pályája eközben egyenes, akkor lineáris gyorsítóról beszélünk. Helyta-



Rutherford utca, egyike a sok-sok „fizikus”-utcának

karékosabb azonban, ha a részecskét görbült pályára tereljük, s a gyorsítás valójában ugyanott történik az egyes fázisokban. A mozgó, töltött részecskék terelése a Lorentz-erővel lehetséges, amelynek fellépéséhez mágneses mező kell. A részecskegyorsító elektromos és mágneses mezők nagyon gondosan megtervezett és kivitelezett rendszere.

A gyorsítással elérendő sebesség napjainkban megcélzott mértéke relativisztikus számolásokat igényel. A tömeg–energia ekvivalencia alapján a gyorsított részecske többletenergija a tömeg növekedéseként fogható fel, ami a sebességváltozásban játszott szerepe miatt a terek precíz hangolását igényli. Az ekvivalencia arra is módot ad, hogy bizonyos tömegű energiáról vagy bizonyos energiájú tömegről beszéljenek egymás között a kutatók. Egy sajátos egységrendszert alkalmaznak, mely olykor csak az adott munkacsoportban használatos. Nézzünk egy példát. Ha a h -t (Planck-állandó) és a c fénysebességet dimenzió nélküli egységnek tekintjük, akkor az $E = mc^2$ összefüggés szerint a tömeg energiadimenzióban kapjuk, amit viszont eV-ban, pontosabban GeV-ban mérnek. Egy proton tömege $1,6726 \cdot 10^{-27} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 = 1,5 \cdot 10^{-10}$ J energiával ekvivalens, ez $1,5 \cdot 10^{-10} / 1,6 \cdot 10^{-19} = 9,4 \cdot 10^8$ eV ≈ 1 GeV, azaz a GeV nagyságrendű energiát protontömegben lehet kifejezni. Az $E = pc$ szélsőségesen relativisztikus összefüggés szerint a lendület mértékegységeként szintén GeV adódik, s a Heisenberg-féle határozatlansági elv alapján a távolságdimenzióra $1/\text{GeV}$ -et kapunk.

A *detektorok* nagyon sokfélék lehetnek, felépítésükben, csakúgy mint működési elvükben mégis sok tipikus vonás van. Egy többféle részecskét is érzékelni képes detektor általában henger alakú, benne közel hengerszimmetrikus rétegek épülnek egymásra. E henger tengelyében érkeznek az ütköztetendő részecskék, s erre közel merőlegesen repülnek a keletkezők. A legbelső réteg egy nyomkövető detektor, benne a töltött részecskék hagynak nyomot, a foton nem. Az ezt követő elektromágneses kaloriméterben az elektron és a foton elnyelődik, pályájuk véget érése alapján azonosíthatók. Ezt ölelik körül a hadron-

kamrák, melyekben kvarkok által keltett események észlelhetők. Következik a terelőmágnes, ami a világ legnagyobb szupravezető mágnesei közé kell tartozzon. A mágnesek a Világegyetem dermesztő hidegénél is alacsonyabb hőmérsékleten, 1,9 K-en működnek. Ezt árnyékolás (valamint a mágneses erővonalak terelése) céljából rengeteg vassal veszik körül, melyekbe beékelődnek a müonkamrák. A müonok gyakorlatilag akadálytalanul hagyják el a berendezést, de nyomot hagynak.

Adott tehát egy elmélet: a Standard Modell, és adott az ezzel kapcsolatos feladat: megtalálni a Higgs-részecskét. Adottak a technikai megoldások, azaz a detektorok; ki van fejlesztve az a háttér, amely az adatok feldolgozását lehetővé teszi, ez a GRID. Már csak egy hely kell, ahol mindez összeáll, s egymást támogatva, kiszolgálva eredményre jut. Ez a hely a CERN.

Az első benyomások

A CERN-nel való első felszínes találkozás nem mentes a csalódástól. A Genf melletti Meyrinben a felszíni látvány beton és üvegfalakból, hullámpala és trapézlemez keverékéből, fizikusok nevét viselő, olykor átláthatatlan hálózatba szerveződő utcákból, fűnyíróként alkalmazott, békésen legelésző birkákból, valamint biciklik tömegéből, és menetközben is laptopjukat használó emberekből áll össze. A hely egy nagyipari üzem benyomását kelti. Az, hogy egy nagy energiájú gyorsító környékén járunk, csak abból derül ki, hogy a mára már nem működő ISR gyűrűjét még látni lehet. A figyelmesebb szem az itteni első komoly gyorsító, a szinkrociklotron halmait is észreveheti, de

Táncoló Siva az ATLAS-együttműködés épületénél





A CMS-detektor szelete, a kísérleti fizikus szentélye

A látvány

Először is a méretekről kell szólni. Azt tudtuk, hogy az igen kicsi részecskék megtalálásához, „előállításához” napjainkban egyre nagyobb berendezésekre van szükség. A tapasztaltak azonban azt mondatják velünk, hogy fejleszteni kell még a fantáziánkat. Csak egy adalék: nem gondoltuk, hogy egy 27 km kerületű kör belülről egyenesnek látszik. Ezen a körön szupravezető mágnesek által kijelölt pályán keringenek, gyorsulnak majd a protonok, hogy azután a fénysebesség 99,999%-val ütközzenek egymással mikronos pontossággal. Nos, ebbe igazán talán bele sem gondoltunk. Végül a legszebb az egészben, hogy

erre már végképp ráépültek mindenféle ipari épületek. Szemlátomást az építmények az egyre nagyobb telekínségnek megfelelően épültek, a létező legteljesebb „spártai” stílusban. Nagy csalódás ez annak, aki a CERN-t egyfajta „fizika templomának” tekinti. Aki arra gondolt, hogy a hely nagyszerűsége már az épített környezetben is nyilvánvaló lesz, csalódott. A bravúros építészeti megoldások, szellemesen tervezett épületek, expresszív műalkotások, tudósoknak emléket állító szobrok – mindez hiányzik a CERN-ből. A CERN-ben a külső megjelenést tekintve a puritán célszerűség és a spórolás dominál.

Szobrot csak egyetlen egyet láttunk a CERN területén, az indiai atomenergia hivatal ajándékát, a *Táncoló Siva*, azaz Natarádzsa szobrát. A szobor az egyetlen építészeti igényes helyre, az ATLAS-együtműködés épülete mellé került. Natarádzsának négy karja és két lába van. Felső jobb kezében egy démonűző dobort tart. A balban a tűz van, ami a végső pusztulás jelképe. Alsó jobb kezét védelmet adó helyzetben tartja, az alsó bal kéz pedig a felemelt bal lábára mutat. Jobb lába az Apaszmara nevű demont tapossa: Apaszmara a tudatlanság, a hamis önérzet, amely elfeledteti az élőlényekkel, hogy kik is valójában. A táncoló Siva, Natarádzsa az, aki elpusztítja a hamis önérzetet és tudatlanságot, ahogy a tudomány is teszi ezt a babonassággal és a gonoszszággal. Ez a szobor üzenete. Emelkedett érzés, az egyetlen, amit a CERN-es műalkotás nyújtani tudott. De a CERN-ben az emelkedettség érzését nem így és nem itt kell keresni.

A valódi kutatás, pontosabban a kutatás tárgyát képező események a föld felszíne alatt, 100 m mélyen zajlanak. A hely igazi hangulatát a föld mélye, és az emberi elme rejti. A CERN „katedrálisait” a nagyközönség nem láthatja, azok rejtve maradnak, sajnos.

nemcsak a Large Hadron Collidert láttuk, hanem azokat az „elődöket” is, amelyek a részecskefizika eddigi történetén át elvezettek az emberiség legnagyobb tudományos alkotásához. Bár ez nagyon közhelyesen hangzik, mégis azt kell mondanunk, hogy teljességgel igaz.

A mérőhelyek kiépítése jelenleg még tart, ezért alkalmunk volt betekinteni az alagútba, és szerelés közben megnézni a CMS és az ATLAS detektorát. A detektoroknál attól marad távba az ember szája, hogy az óriási méretű darabok precíz összehangolása micsoda munkát, együttműködést követel. Az általunk látott CMS-detektorszelet tengelyre merőleges metszetének külső átmérője 12 m, a majd belekerülő 1 m szélességű mágnes belső átmérője 6 m, hosszmérete mintegy 13 m. A teljes detektor 16 m átmérőjű, 22 m hosszú és 12 000 t tömegű. Az egyes műonkamrák kazettákként épülnek be. A pixelekre osztott érzékelő felületek tájolása és elektronikája úgy kerül beállításra, hogy a részecskék útja követhető legyen az egyes cellákon keresztül.

Az ATLAS építése már előbbre van: a detektortest már egyben van és többé szét nem szerelhető. Látható 8 olyan mágnes gyűrűjének külső szakasza, melyek a detektor palástja mentén egyenletesen elosztva úgy fogják azt körbe, hogy mindegyikük síkja a henger tengelyére illeszkedik. Hiába hallgattunk meg a látogatás délelőttjén több előadást, néztünk meg filmet róla, az ATLAS-ra nem lehet felkészülni. Hossza 45 méter, tömege nagyjából az Eiffel-toronyéval egyezik meg, pedig Horváth Dezső érdekes megfogalmazása szerint „annyira könnyű, hogy úszna a vízben”. Persze a detektor föld alatti csarnokában állva nem a pixel-detektorok, félvezető és átmeneti detektorok, a kaloriméterek és müonspektrométerek óriási, szendvicszerűen egymásra rakódó rétegei hatnak az emberre.

Az élmény főleg esztétikai. A méret, és ebben a méretben megjelenő rend és intellektuális tartalom az, ami megfogja az embert. Ahogy egy katedrálisban az emberi hit nagyszerű teljesítménye jelenik meg esztétikai formában, úgy ezek az óriásdetektorok az emberi intellektus műalkotásai.

Sok-sok fizikus kitalálta, mit és hogyan kellene megmérni; sok-sok mérnök kifundálta, hogyan lehet realizálni, és megtervezte az eszközt. Sok-sok szakember legyártotta és idehozta a részeket, sok-sok elektrotechnikus, doktorandusz létrehozta a kapcsolatokot a részek között, sok-sok informatikus megírta a feldolgozó programokat. Mindenki biztos benne, hogy működni fog.

Maga a CERN is, mint tudományos kutatóintézet, különös. Számos ország kutatói, diákjai, tudományos munkatársai együtt alkotják meg a 21. század eddigi legnagyobb technikai vívmányát. Bebizonyítják – magyar szemnek szokatlanul –, hogy a tudomány nemzetközi és teljességgel kozmopolita, hogy a kitűzött célt az erők egyesítésével, közös munkával kell elérni, valamint az elért eredményt közösen kell hasznosítani. Ezt kitűnően példázza a Web megszületése, mely egy belső felhasználásból világot behálózó rendszerré, szinte egyeduralgató szolgálatássá vált *Tim Berners-Lee* jóvoltából.

Tanulságok

Mi, résztvevők, javarészt nagyon szerencsés generáció tagjainak vallhatjuk magunkat. Gyerekkorunkban nézhettük a TV-közvetítésében a Holdra szállást, láthattuk az egyetemi tanulmányaink alatt hogyan és honnan „indult” a számítástechnika, és persze azt is (például itt a CERN-ben), hogy hol tart napjainkban. Általános iskolában még éppen csak hallottunk az atomokról, középiskolában a protonról, elektronnal és a neutronról, az egyetemen tanulhattuk már a kvantummechanika alapjait, és most láthattuk a részecskefizika legújabb eredményeit és kutatási területeit. Hallhattunk a Higgs-bozon megtalálását övező várakozásról, értesülhettünk arról, hogy az elemi részecskék kutatása hogyan hasznosul az asztrofizikában és az orvostudományban szinte egyszerre.

Nagy öröm volt látni, hogy a Standard Modell milyen módon igyekszik megteremteni a rendet az elemi részecskék világában, egy kicsit *Mengyelejev* módján, létrehozva az elemi részecskék egyfajta „periódusos rendszerét”. Kicsit azt a párhuzamot is felfedezhettük a Higgs-bozon keresésében, amit a Mengyelejev által megjósolt, ám akkor még hiányzó kémiai elemek felkutatása jelentett.

Bepillantást nyerhettünk a Standard Modell „rejtelmibe”, elkezdttük látni a rendet a részecskék világában, hallhattunk a részecskék generációiról, azok tulajdonságairól és átalakulásairól. Mindez kellő munkát adott ahhoz, hogy a diákjaink által feltett kérdésekre biztosabban tudjunk válaszolni.

Nagy megtiszteltetés volt, hogy a középiskolai tanárok számára vezető magyar kutatók, Vesztergombi György, Horváth Dezső, Fodor Zoltán és Trócsányi Zoltán tartották az előadásokat. Úgy éreztük, hogy fontosak vagyunk abban, hogy közvetítsük mindazt, amit láttunk és hallottunk az út során. Talán nem hihető, de lelkesedést, új lendületet adott ez a tanulmányút tantárgyaink tanításához.

Az nyilvánvaló volt, hogy a számítógépeknek a CERN-ben óriási szerepe lesz. Az, hogy itt született meg a Web, ismert volt. Többen itt hallottunk viszont először a GRID-ről *Debreceni Gergőtől*. Az ATLAS adatai okozták az első sokkot számunkra: a másodpercenkénti 40 millió ütközésből miként választanak ki néhány százat, de ezek is miként termelnek meg évente annyi információt, amelyek 20 km-es tornyot alkotnának CD-kre írva, miként fogja 3000 kétprocesszoros gép a tömegtelen információt és számolási feladatot a világ 240 központjába szétosztani. Büszkeséggel hallottuk, hogy hatodiknak a budapesti RMKI jelentkezett ilyen feladatra.

Szintén melegen érzi a magyar hozzájárulásokról is hallani. Az antiproton lassító meglátogatása során az ATHENA és az ASACUSA mérőhelyét nézhettük meg. Vezetőnk, Horváth Dezső az ASACUSA projekt egyik vezető fizikusa, avatottan beszélt arról, miként vizsgálják a CPT-invarianciát az antianyag segítségével. Hasonló élményt jelentett az NA61 kísérlet meglátogatása Fodor Zoltánnal. Az NA61-et az SPS-gyorsító egyik kivezetésén lévő mérőhelyén alakították ki. (Úgy látszik ennek a kísérletnek nem sikerült olyan szellemes nevet találni, mint a főként japánok által pénzelt ASACUSA-nak: Atomic Spectroscopy And Collisions Using Slow Antiprotons, Atomi spektroszkópia és ütközések lassú antiprotonokkal, Asacusa pedig Tokió templomi negyede is.) Az NA61-ben az SPS nehézion-ütközései révén termelődő hadronokat vizsgálják egy nagy térszögű hadronspektrométerrel. A detektor egyik repülésidő-mérő falát Buda(pest)-falnak nevezték el az RMKI-ra utalva, ahol ez készült. Ezek a példák is mutatják, hogy van jövője a magyar fizikusoknak is, és van esélyük – Vesztergombi György hasonlatával élve –, hogy „megyei bajnokság helyett az olimpiai döntőn” vehessenek részt.

A CERN nyitott, humánus világa

Az, hogy a CERN rendkívüli nyitott intézmény, rögtön az első napon világos lett számunkra: mindenhová bemehettünk, mindenhol fényképezhettünk. Mick Storr, a CERN-beli vezetőnk olyan helyekre is bevitt minket, ahol mindenféle hivatalos és magánjellegű papírok hevertek össze-vissza (pl. az elméleti fizikai részlegen), Horváth Dezső mindent kinyitott előttünk, Fodor Zoltán leállította a gyorsítót, hogy megnézhessük közelről. Szokatlan volt ez számunkra egy csúcstechnológiákat, „tudományos titkokat” rejtő világban. Nyilvánvaló lett, itt nincsenek tudományos, katonai és üzleti titkok. Meg úgy általában, semmilyen titok sincs.



Az elméleti fizikus „szentélye”

Felemelő érzés volt, hogy minket, egyszerű fizika-tanárokat, akik mégiscsak a fizika társadalmának a „végein”, meg úgy Európának is a „végein” vagyunk, mennyire megbecsült partnernek tekintettek. A programunkat gondosan állították össze, a legszakavatottabb előadókat nyerték meg számunkra, akik nem egyszer komoly áldozatot hoztak, hogy nekünk megtarthassák a foglalkozásokat (Trócsányi Zoltán, Vesz-

A Genfi-tó 140 méter magas szökőkútjával



tergombi György). Horváth Dezső és Fodor Zoltán pedig szinte végig velünk tartott. Ezek a kötetlen, félig szakmai, félig baráti beszélgetések igen nagy hatást gyakoroltak ránk. Figyelemre méltó az is, hogy a tervezett programot mennyire pontosan sikerült betartani. A képzés honlapja, a rá felkerülő és onnan letölthető anyagok is példaszzerűek.

A CERN nyitottsága humánus légkörével párosul. A szemetet természetesen szelektíven gyűjtik, a füvet birkák rágják, külön biciklijavító műhely van, az alkalmazott fizikai programok orvosi-biológiai jellegűek. Az izraeli és a palesztin diákok közös búcsúestet rendeztek (!), a focijáték francia és német diákok, tudósok a magyar sofőrt invitálták együttjátékra, az étterem teraszán a turbános hindu együtt kvaterkázott a raszta hajúval és a rőt északival.

Horváth Dezső nyitó előadásában a CERN-nel kapcsolatban a bábeli nyelvzavart emlegette, hiszen itt 80 ország tudósai és vendégei fordulnak meg. Nyelvzavar azonban nincs, részint az angol nyelv általánossága, részint pedig a szellemiség egyöntetősége miatt: a tudomány, a fizika hozza testvéri táborba a különböző embereket. A CERN mindennél ékeesebben mutatja azt a régi, szinte közhelyszerű igazságot, hogy a tudomány, a fizika szeretete képes áthidalni a nyelvi és kulturális különbségeket. Ez pedig létszükséglet is egyben, hiszen olyan programok indulnak, amelyek nem egyszer 2000 tudós együttműködését feltételezik.

A közeg

Meghatározó élmény volt, hogy egymástól is tanulunk. A tanári csoport tagjai egymás közötti beszélgetéseikben is érdeklődésükről, szakmaszeretetükről tettek tanúbizonyságot. Bármelyik vitázó, beszélgető társasághoz csatlakozva új és újabb ismeretekhez juthattunk, új megközelítéseket hallhattunk. Segítette ezt az a tény, hogy előre összeállt csoportoknak mérési, kísérletezési feladata volt. A konkrét helymeghatározás és a radonkoncentráció időbeli változásának kimérése ugyan nem valósult meg teljeskörűen – rajtunk kívül álló okok miatt –, de a háttérsugárzás és a víz forráspontjának többszöri mérésével, valamint a Torricelli-kísérlet többszöri végrehajtásával saját kezűleg is letettük áldozatunkat a kísérleti fizika oltárára. A mérések során kapott tanácsok, a megélt, megfogalmazott tapasztalatok, az értékeléshez kapcsolódó viták, gondolatok konkrét szakmai segítséget jelentenek mindennapi tanári munkánkban.

A hatalmas mennyiségű és intenzív találással kapott élmény és ismeret úgy vált befogadhatóvá számunkra, hogy aktív tevékenységgel töltött regenerálódási lehetőséget is biztosítottak a szervezők. A Genf megismerését célzó, csoportban végrehajtott kincsvadászat technikáját osztályfőnökként szívesen hasznosítjuk majd. Az Európa tetején, 3842 m-es magasságban érzett légszomj hiteles tapasztalat a nyomás változására, függetlenül attól, hogy ennek a programnak nem ez



„Mint a Montblanc csucsán a jég...”

volt az elsődleges célja. Az ott elvégzett Torricelli-féle mérés legemlékezetesebb momentuma, hogy magyarok ott is voltak, s ezek a magyarok érdeklődtek, sőt, tudták, mi történik, s ezek a magyarok szidták a magyar oktatást, benne a fizikatanárokat, akik nem így tanítják a fizikát. Mi, magyar fizikatanárok pedig hallgattunk, és elgondolkoztunk mindezen.

Epilógus

Kirsch Éva: „A leírtak mutatják, hogy nagyon gazdag hetünk volt. Ez idő alatt részecske voltam, melyet az előadók és a többiek gyorsítottak azzal, hogy energiát kaptam tőlük. Szeptemberben beindult a nagy tanár-diák ütköztető, s ha Higgs-bozon nem is, de néhány érdekes fizikaóra biztosan születik.”

Tepliczky István: „Jól demonstrálta a tanulmányút, hogy miközben a részecskék világáról hallottunk előadásokat, aközben megemlékezhattünk *Torricelliről*, *Pascalról*, láthattuk, hogy a fizikusokról utcák „szólnak” a CERN-ben. Megerősítette bennem, hogy a fizika történetének ismerete és ismertetése fontos a tanítás folyamatában. Méltó emléket csak annak állíthatunk, élményszerűen csak arról beszélhetünk, amihez és akikkel személyes indítatások fűznek. Egy ilyen momentuma lett életemnek a CERN és mindaz, amit ott átélhettem.”

Elblinger Ferenc: „Mindezeket túl azonban az egész hétnek volt egy nagyon nehezen megfogalmazható »spirituális tartalma« is. Ez főként abból táplálkozott, hogy a CERN-nel kapcsolatos viszonyom szinte a »vallásos alázatra« emlékeztető tartalmakat kapott. Mindenfajta vallási élmény egyik alapja az Isten nagyszerűségének megtapasztalása, és az ezt követő alázat, amely után az ember elhelyezi magát az Univerzumban, a nagy műben. A CERN-ben a »végső dolgok« kutatása zajlik, olyan dolgoké, amelyek mérhetetlen távolságban vannak a hétköznapi létünkötől, időben, méretben és energiában. Akárcsak az Isten. Az Istenhez való közeledés színhelye a templom, a közvetítők pedig a papok. A CERN-ben pedig a templom a gyorsító a detektorokkal, a papok, a közvetítők a fizikusok. Az egyik a misztika útját járja a transzcendenciával, a másik az empíria útját az intuitív racionalizmussal. Nem véletlen, hogy egyfajta zarándoklatnak fogtam fel az utat, mint aki megszentelt helyre jut el, mint egy mohamedán Mekkába, vagy egy keresztény Jeruzsálembe. Nem is okozott csalódást a CERN, hitemben és érzéseimben megerősödve tértem haza, úgy, mint aki részese lehetett annak egy röpké pillanatig, milyen az, amikor valaki a »végső dolgokra« pillant.”

AZ ORSZÁGOS SZILÁRD LEÓ FIZIKAVERSENY MEGHIRDETÉSE A 2007/2008. TANÉVRE

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, a Szilárd Leó Tehetséggondozó Alapítvány és a paksi Energetikai Szakközépiskola és Kollégium a 2007/2008. tanévre meghirdeti az Országos Szilárd Leó Fizikaversenyt az általános és a középiskolák tanulói számára.

A versenyre az I. kategóriában a középiskolák 11–12. osztályos tanulói, míg a 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 a www.szilardverseny.hu honlapon vagy levélben az Eötvös Loránd Fizikai Társulat titkárságán (1027 Budapest, Fő u. 68. Tel./fax: 1-201-8682) jelentkezhetnek a versenyzők kategóriánkénti létszámának, valamint az iskolai kapcsolattartó fizikatanár elérhetőségeinek (név, postai cím, telefonszám, e-mailcím) megadásával.

A verseny kétfordulós.

Az első forduló időpontja 2008. február 25. 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, könyvek és zsebszámológépek) használhatnak.

Az első forduló dolgozatait a szaktanárok javítják, és a ponthatárt elért dolgozatokat legkésőbb 2008. február 29-ig postázzák a Budapesti Műszaki Egyetem Nukleáris Technikai Intézete (1521 Budapest, Műegyetem rkp. 9.) címére.

Ponthatárok: I. kategória: a maximális pontszám 60%-a, II. kategória: a maximális pontszám 40%-a.

A versenybizottság a beküldött dolgozatokat ellenőrzi, majd az első forduló eredményéről az értesített legkésőbb 2008. március 22-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 2008. április 18–20. között kerül megrendezésre az Energetikai Szakközépiskola és Kollégiumban, Pakson.

A 2. fordulóban a tanulók elméleti, mérési és számítógépes feladatokat oldanak meg.

A versenyzők és a kísérőtanárok szállásköltségét a szervezők fedezik.

A verseny ismeretanyaga

A verseny a középiskolás tananyag modern fizikai – elsősorban magfizikai-sugárvédelmi – fejezeteinek alkalmazási szintű tudását és környezetvédelmi alapismereteket kér számon.

A kijelölt témakörök a következők:

Mikrorészecskék leírásának alapjai, az anyag kettős természete.

Hőmérsékleti sugárzás törvényei, fotonok, fény-elektromos jelenség, Compton-jelenség.

De Broglie összefüggés, elektronok interferenciája. 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 alfa-bomlás.

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

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

Részecskegyorsítók működési elvei.

Környezetvédelmi alapismeretek: például CO₂ és az üvegházhatás, ózonlyuk, radonprobléma, radioaktív hulladék elhelyezése.

A felkészülésre javasolt segédanyagok:

Országos Szilárd Leó Fizikaverseny feladatai és megoldásai 1998–2004

Marx György: *Atommagközelben*

Marx György: *Éltrevaló atomok*

Marx György: *Atomközelben*

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 honlapon.

Díjazás

Az országos döntőbe bejutott tanulók könyvjutalomban részesülnek. Kategóriánként az 1–3. helyezettet a Szilárd Leó Tehetség gondozó Alapítvány egyszeri ösztöndíjban részesíti.

A szervezők elérhetősége

A versenybizottság vezetője: *Sükösd Csaba* tanszékvezető egyetemi docens, BME Nukleáris Technika Tanszék. Címe: 1521 Budapest, Műegyetem rkp. 9. E-mail: sukosd@reak.bme.hu. Tel.: 1-463-2523, fax: 1-463-1954.

A verseny felelőse *Csajági Sándor*, az Energetikai Szakközépiskola és Kollégium tanára. Címe: 7030 Paks, Dózsa Gy. u. 95. E-mail: csajagi@eszi.hu. Tel.: 75/519-326, fax: 75/414-282.

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

HELYREIGAZÍTÁS

Folyóiratunk 2007. novemberi számának 384. oldalán, a Teller-pályázat felhívásában hibásan jelent meg a jelentkezési cím, a Magyar Nukleáris Társaság főtítkárnak postai címe. A hibát korigálendő közöljük a helyes címet és a további elérhetőséget.

Silye Judit MNT főtítkár, Országos Atomenergia Hivatal Nukleáris Biztonsági Igazgatóság (OAH NBI), 1539 Budapest, Pf. 676. Telefon: (1) 436-4917, fax: (1) 436-4909, e-mail: mnt@reak.bme.hu

Olvasóinktól a hibáért elnézést kérünk.

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 egyszámlán.
Megjelenik havonta, egyes szám ára: 750.- Ft + postaköltség.

HU ISSN 0015-3257

A TUDOMÁNY SZÍNRE LÉP – SCIENCE ON STAGE

Részvételi felhívás a hazai válogató versenyre

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat ismét megszervezi a *Science on Stage* (SonS) konferencia magyarországi válogatóját. Részvételre hívjuk az újító kedvű, kreatív, kísérletező fizika-, kémia- és biológiatanárokat, hogy mutassák be új módszereiket, kísérleteiket, eszközeiket, oktatási programjaikat. A részvétellel a Németországban, *Berlinben 2008. október 23. és 26.* között tartandó nemzetközi konferenciára lehet benevezni.

A nemzetközi konferenciát a Német Fizikai Társulat szervezi az EIROforum és az ISC támogatásával, a német tanárok mellett 100 külföldi (európai) tanárt is meghívunk rá. Ennek alapján négy magyar résztvevő is kaphat meghívást. A rendezők a *kiutazó tanárok szállását és ottani étkezését, a kirándulásokat, programokat fedezik*, az utazás költségeit a résztvevőknek kell állniuk.

Az eddigiektől eltérően nem külön rendezvényen történik a válogatás, hanem a 2008. évi Középiskolai Fizikatanári Ankét során lehet a németországi részvételre pályázni. Az Ankét Békéscsabán lesz, *2008. március 26-tól 30-ig*. Az Ankét programjában a SonS-válogatás időpontja: előreláthatóan március 29. szombat délelőtt 10:30. Ez még a jelentkezők számának függvényében módosulhat.

A németországi rendezvény programjában műhelyek, kiállítás és színpadi programok szerepelnek, ezeken való részvételre lehet pályázni a válogatóverseny során is.

Minden olyan kolléga pályázatát várjuk, akinek jó ötletei vannak! Valamilyen idegen nyelven (német, angol) történő kommunikációs képesség előny, de nem előfeltétel. Az Ankéton történő válogatás során a pályázók legfeljebb 20 perces előadás (kísérleti vagy színházi bemutató) keretében bemutatják a zsűri és a közönség előtt pályamunkájukat. Jó, ha a 20 perc első 5 percében angol vagy német nyelven is ismertetik röviden a programjukat. A pályázók közül azt a négy személyt nevezzük be a németországi Science On Stage konferenciára, akik a zsűri szerint legszínvonalasabban tudják képviselni a magyar természettudományos oktatást.

Jelentkezési határidő: 2008. március 1.

Jelentkezési lap pdf-formátumban letölthető a Társulat www.elft.hu honlapjáról.

A jelentkezéseket és a program rövid, 20 soros ki-vonatát *Ujvári Sándor* (8000 Székesfehérvár, Sütő utca 38. II. 12., telefon: (22) 326-954, mobil: (30) 913-2470, e-mail: ujvari@datatrans.hu) címére kérjük.

Egyben kérjük, *Sükösd Csabának* is küldjék el a másolatokat elektronikusan a sukosd@reak.bme.hu e-mailcímre.

Szeretettel várunk minden jelentkezőt

Sükösd Csaba
a SOnS Magyar Szervezőbizottságának
elnöke

KÖNYVESPOLC

Hraskó Péter: ELMÉLETI FIZIKA

A Pécsi Egyetemen fizikatanár szakos hallgatóknak tartott elméleti fizikai előadásai anyagát tette közzé jegyzetek formájában *Hraskó Péter*. A kontinuummechanikán kívül minden fontos nagy fejezetet lefedő sorozat jól érthető, tömör, egyedi és eredeti megközelítéseket tartalmaz. Sok helyen találunk fizikatörténeti utalásokat. A tanulást a fő szöveghez közvetlenül illeszkedő feladatok könnyítik, melyek többségének megoldása is olvasható.

Az *Elméleti mechanika* a koordinátarendszerek és a Newton-egyenlet bevezetése után rögtön bemutatja, hogy az inerciarendszer, az inerciaidő és az erő fogalma a Newton-egyenlettel összefüggésben értel-

mezendő. Az itt tapasztalható korai és gondos előkészítése egy későbbi témakörnek az egész sorozatra jellemző. A mozgásegyenletre vonatkozó példák közül számos a töltött részecskék dinamikájával kapcsolatos, a dipóltér már a potenciál fogalma kapcsán megjelenik. A Lagrange-függvény és a Lagrange-egyenletek már a 27. oldalon bevezetésre kerülnek. Származtatásuk valamivel később, a hatáselv kapcsán történik. Ez után rögtön a szimmetriák és a megmaradási tételek következnek, majd a kényszermozgások. A csatolt rezgések és a normálmódusok viszonylag nagy hangsúllyal szerepelnek. A kanonikus egyenletek és a fázistér bevezetése után az adiabatikus inva-

riánsok tárgyalása következik. Az anyag a merev testek és a pörgettyű (Euler-szögek) mozgásának leírásával zárul. A Naprendszerre történő hangsúlyos kitekintés (árapály, káosz, földgolyó precessziója) végigvonul a kötetben.

Az *Elektrodinamika* az induktív felépítést követi. Az elektrosztatikában nagy szerepet kap a dipólnyomaték, majd a dielektrikumok világa. A mágneses teret a szerző az áram által átjárt vezetők közötti erőhatás kapcsán vezeti be. A polarizálható közegek magnetosztatikáját az elektromos esettel való hasonlóságra alapozza, de kimutatja, hogy az elsődleges fizikai mennyiségek az E és B terek, míg D és H segédmenyiségek. Az eltolási áram létezése, *Maxwellt* követve, a töltésmegmaradás kényszerének következtében válik nyilvánvalóvá. A Maxwell-egyenletek felírása után az elektromágneses hullámok részletes tárgyalását kapjuk, beleértve, a közegebeli terjedés kapcsán, a diszperzió és a csoportsebesség fogalmát. A térenergia és térimpulzus ismeretében a sugárzási tér leírása következik a dipólsugárzás alapos vizsgálatával.

A relativitáselmélet témakörébe Hraskó Péter úgy vezet át, hogy megfogalmaz általános követelményeket az inerciarendszerek közötti transzformációkra, s megmutatja, hogy az egyidejűség invarianciája helyett a fénysebesség invarianciáját érdemes elfogadni. A kötet a relativitáselmélet alapjainak egyedi tárgyalásával és a Maxwell-egyenletek invarianciájának kimutatásával zárul.

A *Kvantummechanika* néhány, a klasszikus elméleteknek ellentmondó alapjelenség (pl. a hőmérsékleti sugárzás spektruma) bemutatása után a Bohr-modell, majd az adiabatikus invariánsokra épülő Bohr-Sommerfeld-modell tárgyalásával kezdődik, s ennek keretén belül, a 16. oldalig, eljut a hidrogénatom spektrumáig és a Zeemann-effektusig. Ez után a vektor- és Hilbert-terek, majd az operátorok, mint fizikai mennyiségek bevezetése következik. A harmonikus oszcillátor problémáját a szerző a keltő és eltüntető operátorok segítségével mutatja be. A mérési posztulátumok után következik a bizonytalansági reláció, majd a dinamikai egyenlet tárgyalása, s ezek után az időfüggetlen Schrödinger-egyenlet, egydimenziós problémákra alkalmazva. Hangsúlyosan szerepelnek a de Broglie-hullámok és interferenciájuk egy neutronnyalábos interferenciakísérlet bemutatása kapcsán. Részletesen kerül tárgyalásra az impulzusnyomaték, a forgatások és ábrázolásaik problémája (az utóbbiban ismét az Euler-szögek), majd a spin bevezetése. Ez után következik a pontrendszerek kvantummechanikája, a független és korrelált részecskék problémája. Ennek során mutatja be Hraskó Péter finom logikával a Bell-tételt, vagyis a mikrofizikai szeparálhatatlanságot. A fermionok és bozonok tárgyalása, valamint a periódusos rendszer rövid elemzése zárja a kötetet.

A *Termodinamika és statisztikus fizika* az entrópia fogalmát helyezi a középpontba. A termodinamikai rész az entrópia létezését posztulálja, s megmutatja, hogy alkalmas formában fundamentális egyenlet. Meg-

különbözteti a lassú folyamatokat a kvázisztatikus folyamatoktól, s megfogalmazza, hogy csak a zárt rendszer teljes entrópiája az, amely spontán folyamatokban nő, a részrendszerek entrópiája eközben csökkenhet is. A szerző élvezetes stílusban elemzi a másodfajú perpetuum mobile és a fluktuációk problémáját. A termodinamika tárgyalása a különböző potenciálok bevezetésével zárul.

A statisztikus fizikába történő átmenetet az entrópia és az információ kapcsolata motiválja. Hraskó Péter a mikrokanonikus eloszlást a maximális információhiány elve alapján határozza meg. A kvantumstatisztikákra történő áttérést a Gibbs-faktoriális kritikája előzi meg. A Fermi- és Bose-gáz után, a hőmérsékleti sugárzás részletes vizsgálatával teljeseedik ki a *Kvantummechanika* kötet anyagával való kapcsolat. A statisztikus fizikai rész a Nernst-tétel és az adiabatikus demágnesezés elvének bemutatásával végződik.

Az egész sorozatra jellemző, hogy az elméleti fizikát egységes rendszerként mutatja be, nagy kérdéseire, a fontos fogalmak megalapozására helyezve a hangsúlyt. Mindezt egyedi módon, rendkívül tiszta logikával. A kötetek jól olvashatóak, de megértésük alapos odafigyelést igényel. Formai megjelenésük külön előnye, hogy átlagosan 150 oldal terjedelműek, azaz méretük nem elriasztó.

Az elméleti fizika tanárok számára történő oktatásának újragondolását különösen aktuálissá teszi az a szomorú tény, hogy a BSc-képzés keretében a tárgy óraszám a felére(!) csökkent. Nem reménykedhetünk abban sem, hogy a hiány az MSc-képzés keretében bepótolható, mert ott a főtárgy (fizika) négy félév alatt csak mintegy 15 dupla oktatási órát (előadás, labor, oktatási gyakorlat, 30 kredit) kap, 50 kredit a második tanári szaké, 40 kreditet pedig az általános didaktikai, pszichológia tárgyak adnak, melyek 10 kreditet már a BSc-időszakból is megszereztek.

A Hraskó-féle *Elméleti fizika* sorozat a 90-es években megjelent nyomtatásban a Janus Pannonius Egyetem kiadásában, de már régen elfogyott. A felújított változat megtalálható viszont Hraskó Péter honlapján, a <http://www.hrasko.com/peter/> címen, és ingyenesen letölthető!

A honlapon, ráadásul, találunk sok minden mást is. A tanárképzés kapcsán a legfontosabb a *Relativitáselmélet alapjai* című előadássorozat fizikatanárok számára. Ez az idén elkészült jegyzet kiegészíti az *Elektrodinamika* kötetet, nem fed át vele. A speciális relativitáselmélet ugyanis egy egészen új gondolatmenettel kerül bevezetésre. A Doppler-effektus alapján mindössze a koordinátarendszerek egyenértékűsége és a fénysebesség állandósága elvének felhasználásával vezeti le Hraskó Péter a idődilatació jelenséget, majd ennek alapján a mozgásegyenletet. A nyugalmi energia fogalmát *Einstein* egy eredeti gondolatmenete kapcsán ismerhetjük meg. Csak ezután következik a Lorentz-transzformáció.

A jegyzet elemi módon tárgyalja az általános relativitáselmélet alapkérdéseit is, és eljut egészen a NASA GP-B kísérletéig.

A honlap más kiadványokat is tartalmaz, így például egy ugyancsak idei *Általános relativitáselmélet és kozmológia* jegyzetet, de Hraskó Péter áltudománnyal foglalkozó írásait és az utóbbi időben elhangzott előadásainak anyagait is, melyek mind letehetőek.

Hraskó Péter honlapja tehát valóságos elméleti fizikai kincsesbánya, melyből nemcsak a hallgatók, ha-

nem a kutatók is új, hasznos ismereteket szerezhetnek. Az ismertetés szerzője csodálattal látja, hogy ez a hatalmas ismeretanyag, egy valóságos „magánegyetem”, a szerző önzetlensége folytán mindenki számára hozzáférhető, s így nagy érték a hazai fizika szempontjából. Csak annyit írhat:

Köszönjük szépen, Péter!

Tél Tamás

Simon Singh: A NAGY BUMM

Fordította: Szécsényi-Nagy Gábor. Park Könyvkiadó, Budapest 2006.

Minden idők legfontosabb tudományos felfedezésének története – szól a könyv alcíme. És, tesszük hozzá, miért is kell tudnunk róla? Mert az Univerzum „ kozmikus ősrobbanásban” megvalósult kezdetének fizikai–csillagászati elmélete és azok a megfigyelések, amelyeket a tudományos közvélemény tapasztalati bizonyítékoknak tekint, minden bizonnyal a 20. század nagy összegező vívmányai, amely tényleg megérdemel egy közel 600 oldalas könyvet. Nem is akármilyen könyvet, mert a kötet már megjárta a nyugati könyvpiacokat, és nyilván az ottani sikerek híre győzte meg a kiadót a magyar kiadás szükségességéről vagy üzletéről is.

Először pár mondatot a szerzőről. *Simon Singh* 1964-ben született Angliában, Cambridge-ben szerezte fizikus oklevelét, a PhD-fokozatot részecskefizikából kapta. A BBC-nél kezdett dolgozni, majd hamarosan sajátos ismeretterjesztőként szerzett hírnevet. Ebben fő szerepet játszott *A nagy Fermat-sejtés* című könyve, amely témáról 1996-ben dokumentumfilm is rendezett.

A Nagy Bumm című könyve tulajdonképpen egy zseniális témaválasztás, zseniális hangszerelésű, úgy szólván lehetetlen (hiába 600 oldalas) mű. Témaválasztása azért zseniális, mert a kozmikus ősrobbanás csaknem minden országban – ahova a könyv már eljutott – tabutémát, vagy legalábbis nagy és éles vitát kavart kérdést boncol. Zseniális a könyv hangszerelése, mert igazából amolyan félig ismeretterjesztő (ponyva), félig (óvatosan válogatott) tudományos-tudománytörténeti fejtegetés, ami kényesen egyensúlyoz a tudományos ismeretközlés igénye és az állandó, mégis regényszerű mese között. Ez az egyensúlyozás irigylésre méltóan sikerült!

Egyedüli gondunk a 142. oldalon van azzal, hogy az angol hajóhad nem 1666-ban, hanem 1588-ban verte meg a spanyol Nagy Armadát, ha ugyanarra a nagy szennációra gondolunk, mint a szerző. Az „annus mirabilis” – a csodálatos év – amelyben annyi fontos esemény történt, ettől még lehet 1666, mindenek előtt *Newton* felfedezéseinek (többek között a klasszikus mechanika, optika, gravitáció területén) köszönhetően.

Visszatérve az ősrobbanás elméletének bemutatására, valóban egyetértünk a történeti bevezetővel, meg azzal is, hogy a Nagy Bumm fogalomkörének története

– a szó szoros értelmében – mégis *Einstein* (és persze *Friedmann*) táguló Univerzumból szóló modelljével kezdődik. Még akkor is, ha előbb *Einstein* visszatért a statikus univerzummodellre, mert még nem volt komoly csillagászati tapasztalat a táguló Univerzumban. *Edwin Hubble* kutatásainak bemutatásával folytatja a tárgyalást. Közben lelkiismeretesen kitér arra a modellre is, amellyel *Fred Hoyle*, *Hermann Bondi* és *Thomas Gold* próbálkoztak: az állandó állapotú világmodellre (amelynek kis szépséghibája a folyamatos, bár kicsiny méretű anyagkeletkezés). A szerző részletesen ismerteti *Hoyle* küzdelmeit az elemek keletkezésének asztrofizikai magyarázatáért, majd azt a csodálatos alkotást, amelyben *Willy Fowler* és a *Burbidge*-házaspár közösen megfejtette az elemgyakoróság kozmikus csodáját. *Singh* bemutatja a *Jansky*-féle rádiócsillagászat „kirobbanását” (1930 körül), ami elvezetett pár évtized után ahhoz, hogy *Arno Penzias* és *Robert Wilson* a Bell Laboratóriumok kürtantennájával 1964-ben kimutathassa a kozmikus háttérsugárzást. A szerző ez után vonja le a következtetést a Nagy Bumm modelljének helyességéről, miközben részletezi a mai napig tartó küzdelmeket a háttérsugárzás intenzitásterképének felvételére, ami már 1992-ben elegendő megbízhatósággal mutatta ki a galaxisok kialakulásának kezdetét. Ehhez el kellett érni azt, hogy az intenzitás ingadozásterképét egyezreduális pontossággal lehessen kimérni! Ezekre az eredményekre alapozva lehet remélni azt, hogy a 21. században hamarosan mód lesz olyan kozmikus űrrepülési programra is, mely lehetőséget nyújt ennél még nagyobb finomságú (!) mérések véghezvitelére is.

A könyv időszerűségét nagyszerűen illusztrálja az a körülmény, hogy 2006-ban a Nagy Bumm kozmológiáját alátámasztó felfedezéséért kapta *John C. Mather* és *George F. Smoot* a fizikai Nobel-díjat.

Csak hálásak lehetünk a Park Könyvkiadónak, hogy ezt az aktuális tudományos (ismeretterjesztő) művet a magyar olvasóközönség számára biztosította. Minden elismerésünk *Szécsényi-Nagy Gábor* doktor gondos és lendületes magyar fordításáért. Örömmel és lelkesen ajánljuk ezt a könyvet a modern csillagászatról – és persze a modern fizikáról – mind kollégáinknak, mind tanítványainknak!

Abonyi Iván

HÍREK ITTHONRÓL

Fizika Tanösvény az Eötvös Egyetemen

Az ELTE TTK Fizikai Intézete új Tanösvényt alakított ki a Lágymányosi Tömb északi épületében. A programot elsősorban középiskolás osztályoknak ajánljuk, akik a hagyományos oktatási keretek közül kilépve egy új perspektívából kaphatnak rálátást a fizika sokszínűségére. A Tanösvény mintegy 10 állomásból áll majd, mely stációk egy-egy különálló kísérleti laboratóriumot jelentenek. A bemutatók a fizika számos területét ölelik fel, így többek között a biológiai fizika, a 3 dimenziós megjelenítés, az optika, az atomfizika, az áramlások fizikája, a környezetfizika, az elektromosságtan, az energia átalakítása, a kozmikus sugárzás és a holdkőzetek vizsgálata témaköreit. A középiskolás diákok testközelből figyelhetik meg a berendezéseket, illetve maguk is részt vehetnek a kísérletekben, amelyekre a tanórákon nincs lehetőség.

Jelenleg a következő állomások látogathatók:

- Demonstrációs Laboratórium
- Fluoreszcens mikroszkóp
- Holdkőzetek vizsgálata

Fizikai demonstrációk: a holnap kísérletei

Bemutató

A fizika demonstrációs laboratóriumunkban megismerheted a fizika számos területét: a mechanikától a biológiai fizikáig, a 3D-s megjelenítéstől a kozmikus sugárzásig. A bemutatók során megismerheted a fizika sokszínűségét, és részt vehetsz a kísérletekben.

A Tanösvény keretében tartott bemutatók

Középiskolás diákoknak ajánljuk a fizika tanösvény keretében tartott bemutatókat. A bemutatók során megismerheted a fizika sokszínűségét, és részt vehetsz a kísérletekben.

A bemutatók időtartama: 30-45 perc.

Bemutatók a 4.70-es ajtón.

Kármán Környezeti Áramlások Laboratórium

Bemutató

Az ELTE TTK Fizikai Intézete új Tanösvényt alakított ki a Lágymányosi Tömb északi épületében. A programot elsősorban középiskolás osztályoknak ajánljuk, akik a hagyományos oktatási keretek közül kilépve egy új perspektívából kaphatnak rálátást a fizika sokszínűségére.

A bemutatók időtartama: 30-45 perc.

Bemutatók a 2.133-as ajtón.

- Kármán Laboratórium
- Kozmikus részecskék
- Röntgenfluoreszcencia
- Tudományos vizualizáció

Közülük alkalmanként 3, esetleg 4 stációt előre kiválaszthatnak, majd megtekinthetnek. Egy állomás megtekintése 20–30 perc, a helyszínek pontos elérhetőségéről térkép ad felvilágosítást. Minden pénteken délelőtt várjuk – kizárólag előzetes bejelentkezés után – az érdeklődő csoportokat. Az első turnust 9 órától, a másodikat 10:30-tól fogadjuk a körülbelül 90 perces programra. Esetenként ettől eltérő időpontban is várjuk az érdeklődőket (Tudomány Hete, Föld Napja, érettségi szünet stb.)

Cím: 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/a. (III. bejárat, a Duna felől)

Kapcsolattartó:

Bérczi Szaniszló, egyetemi docens, telefon: 209-0555/6786 vagy 372-2986 (közvetlen) és 209-0555/6445 (titkárság) e-mail: bercziszani@ludens.elte.hu, honlap: <http://fizika-tanosveny.elte.hu/>

HÍREK A NAGYVILÁGBÓL

„Európai top” egyetemek Magyarországon

Az európai egyetemek kutatási teljesítmény szerinti második, úgynevezett *top* csoportjába került az Eötvös Loránd Tudományegyetem matematikából és fizikából, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem és a Szegedi Tudományegyetem pedig kémiaiából a CHE (Centre for Higher Education Development) felsőoktatási kutatóintézet ranglistáján.

A Németországban működő CHE négy minőségszempont alapján végzett előszelekciót (publikációk, hivatkozások, magas hivatkozási számú szerzők, Marie Curie-projektek) biológiából, fizikából, kémiaiából és

matematikából. A vizsgálatok majdnem teljesen lefedik Európát. A magyar egyetemek közül az ELTE, a BME és a Szegedi Tudományegyetem neve fordul elő az értékelésekben. Az *excellence* csoportba nem került magyar egyetem egyik vizsgált tudományterületről sem.

Az *Identifying the Best: The CHE Ranking of Excellent European Graduate Programmes in the Natural Sciences and Mathematics* című részletes értékelés teljes terjedelmében megtalálható a CHE honlapján.

www.mta.hu

Új életre kel a LINAC

Több mint négy évtizedes sikeres működés után teljességgel megújul a Stanford Linear Accelerator. Bár néhány feladat még hátravan, a lineáris gyorsító átalakításának eredményeképpen a Linac Coherent Light Source (LCLS) már majdnem teljesen elkészült. A SLAC kétmérföldes lineáris gyorsítójáról évtizedeken keresztül csak szuperlatívuszokban beszéltek. Most az eddigi szerepe kiegészül azzal, hogy a berendezés injektorként szolgál majd a világ legnagyobb intenzitású, a kemény röntgensugárzási tartományban működő szabadelektron-lézeréhez. Az injektor építése tavaly áprilisban kezdődött el, és mostanra mind a részecskenyaláb minősége, mind az elektroninjektorrendszer intenzitása megfelel a várakozásoknak.

Bár a berendezés továbbra is szolgáltat majd elektronnyalábot részecskefizikai kísérletekhez, az átépítés során képessé tették ultragyors, ultrarövid impulzusok létrehozására, amely a nagy energiájú (2-20 keV) röntgensugárzás keltéséhez szükséges.



Most, hogy az LCLS hardware nagy része már a helyén van a gyorsító mellett, a várakozások szerint 2009 elején üzembe állhat az új sugárforrás.

<http://today.slac.stanford.edu>

Szuper-víztesztítő anyag

Az Oak Ridge Nemzeti Laboratóriumban új víztesztítő anyagot fejlesztettek ki, amelynek számos ipari és kereskedelmi alkalmazása lehet. A szuperhidrofób anyagot könnyű előállítani, és igen olcsó alapanyagokból készül. Kifejlesztője *John Simpson*. Az anyag szabadalmaztatása folyamatban van, és víztesztítő tulajdonságú termékek, mint például szélvédő üvegek, szemüvegek, ruházat, építőanyagok, útfelületek, hajótestek, valamint öntisztító bevonatok egy új családja megjelenésének alapja lehet. Az esetleges alkalmazások száma szinte korlátlan.

Az új, nanoszerkezetű anyag egy mikroszkopikus méretű levegőréteget képez a tárgy és a víz határfelületén, amelynek köszönhetően gyakorlatilag minden vizes oldat lepereg a bevont felületről. Az anyag

speciálisan kezelt, „örölt” bór-szilikát üvegből készül. A kezelésnek köszönhetően porózus lesz, és szerkezeti tulajdonságai miatt megnöveli a víz felületi feszültségének a hatását, ettől „megnedvesíthetlenné” válik.

A bevonatnak egy másik előnye a kiváló hőszigetelés. A bevonat porszemcséibe nem képes a víz bejutni a hidrofób tulajdonság miatt, ezért a felületen egy száraz, szigetelő levegőréteg alakul ki. Mivel a por majdnem teljesen amorf szilíciumból áll, ezért nagyon jó elektromos szigetelő is. A bevont felület és a víz közötti levegőréteg miatt az anyagnak a víz okozta korróziója nagymértékben csökken vagy teljesen meg is szűnik.

www.ornl.gov

Indiai föld alatti laboratórium neutrínó kutatásra

A neutrínó kutatása már évek óta nagy intenzitással folyik, azonban az Indiai Atomenergia Hivatal csak most adta meg az engedélyt egy föld alatti laboratórium megépítésére. A beruházás összköltsége 170 millió dollár, a laboratórium a tervek szerint 2012-ben kezdi meg működését. A tervezett *India-based Neutrino Observatory* (INO) Bangalore-tól 250 kilométerre délre, a Nilgiri hegység legmagasabb csúcsa alatt 2 kilométer mélységben fog megépülni. A laboratórium feletti sziklaréteg árnyékolja majd le az obszervatóriumot a méréseket zavaró kozmikus sugárzástól.

A laboratóriumban a Föld légkörében a kozmikus sugárzás által keltett neutrínókat akarják detektálni, és az INO az első, erre a célra létrehozott nagyszabású kísérleti berendezés. Az INO egy 50 000 tonna tömegű mágnesezett vas kalorimétert fog használni a neutrínó

kölcsönhatásakor keletkezett müonok detektálására. Mivel a detektor képes a müonok töltésállapotát is regisztrálni, mód nyílik a három fajta neutrínó tömegére vonatkozóan is információt nyerni, valamint a neutrínó-oszcillációt is tanulmányozni.

Korábban India déli részén, Kolar mellett egy aranybányában végeztek kutatásokat, amelyek során atmoszférikus neutrínókat vizsgáltak, de a létesítményt 1992-ben bezárták, és a kutatók nagy része külföldre távozott. India most ezzel az új létesítménnyel kívánja életre kelteni a neutrínófizikai kutatásokat. Az INO együttműködésben 18 indiai intézetből valamint a Hawii Egyetemről jelenleg mintegy 100 kutató vesz részt. A tervek szerint az együttműködéshez csatlakoznak majd amerikai, olasz és japán kutatók is.

www.nature.com

Felfedezték ${}^7\text{H}$ -et, a hidrogén eddigi legnehezebb izotópját

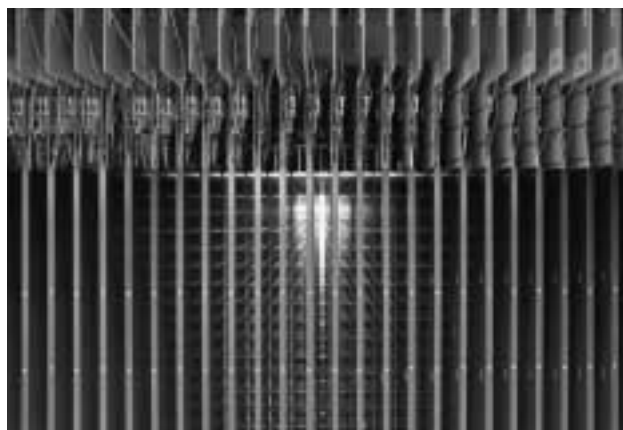
A GANIL-nál (Grand Accélérateur National d'Ions Lourds), a nagy francia nehézion-gyorsító berendezésnél egy nyolc európai kutatóintézet munkatársai közül álló nemzetközi kutatócsoportnak sikerült a kísérletekben azonosítani a ${}^7\text{H}$ atommagot, a hidrogén eddigi legnehezebb izotópját. A hidrogén nehéz izotópjainak keresése több mint 40 éve folyik, és korábbi kísérletek már bizonyították a ${}^4\text{H}$, ${}^5\text{H}$ és ${}^6\text{H}$ mag létezését. Az egy protonból és hat neutronból álló, külö-

nösen nagy neutronfelesleggel rendelkező rendszert protontranszfer-reakció segítségével hozták létre a kutatók. 15,4 MeV energiájú radioaktív ${}^8\text{He}$ nyalábbal ${}^{12}\text{C}$ gáz targetet bombáztak, és egy bonyolult detektorrendszer segítségével hét olyan eseményt azonosítottak, amelyben a reakció során ${}^7\text{H}$ keletkezett egy ${}^3\text{H} + 4n$ küszöb feletti rezonanciaállapotban. A rezonancia energiája 0,57 MeV, szélessége pedig 0,09 MeV.

<http://www.in2p3.fr>

A CERN-ből küldött neutrínókat 730 kilométeres utazás után a Gran Sasso Laboratóriumban detektálták

2007. október 2-án, délután 5:04-kor a svájci CERN kutatóközpont CNGS projektje által létrehozott neutrínót detektáltak az Olasz Atommagkutató Intézet (INFN) Gran Sasso-ban lévő föld alatti laboratóriumában az OPERA-detektorral, 730 kilométerre a keletkezés helyétől. Ezt a távolságot a fénysebességgel utazó neutrínó 2,4 ezred másodperc alatt tették meg. Az OPERA-detektor eddig már 300 neutrínóeseményt regisztrált, azonban a detektorrendszer folyamatos fejlesztése révén egyre több részlet tudható meg ezekről a neutrínóeseményekről. A kísérlet célja olyan eseményeket keresni, amelyekben az úgynevezett tau-neutrínók vesznek részt. A CERN-ben keletkezett neutrínók a hagyományosabb típusú müon-neutrínók, amelyek a neutrínó-oszcilláció néven ismert folyamat révén átalakulhatnak más típusú neutrínóvá. Ennek a folyamatnak a közvetlen megfigyelése a bonyolult kísérletek fő feladata. Az OPERA-detektort egy nagy nemzetközi kutatócsoport tervezte és hozta létre a tau-neutrínó direkt keletkezésének megfigyelésére. Az október 2-án megfigyelt első



Az OPERA-detektor

eseményt még 10 követte a következő napokban. Az eseményeket rögzítő felvételeket az együttműködő országok laboratóriumaiban értékelik ki.

<http://www.infn.it>

Szuperszámítógépek a Brookhaven Nemzeti Laboratóriumban

2007. november 10. és 15. között rendezték meg az SC2007 (Supercomputing) Konferenciát a New York állambeli Uptonban a Reno-Sparks Convention Centerben. A konferencián bemutatásra került a világ második leggyorsabb szuperszámítógépe, a New York Blue, egy IBM Blue Gene/L nagy teljesítményű, párhuzamos processzorú számítógép, amely a Brookhaven Nemzeti Laboratóriumban (BNL) dolgozik, és a New York Center for Computational Sciences (NYCCS) központi gépe. A gép beszerzését New York állam támogatta, és az állam intézményei és kutatói számára megfelelő számítástechnikai kapacitást teremt. A New York Blue gép csúcsebessége 103,22 teraflop (trillió lebegőpontos művelet másodpercenként), és a biológia, az orvostudomány, anyagtudomány, nanotechnológia, klímakutatás, valamint a gazdaság és a műszaki fejlesztés számára biztosít minden eddiginél hatékonyabb számítástechnikai hátteret. A gép mellett hamarosan csatasorba áll egy 28 teraflopos Blue Gene/P gép is. *Jim Davenport*, a Brookhaven Computational Sciences Center igazgatója szerint „ez a két gép a már itt dolgozó QCDOC [quantum chromo-dynamics on a chip] szuperszámítógépével együtt Brookhavent a világ egyik legnagyobb teljesítményű számítóközpontjává avatja”.

A kvantum-színdinamikai (quantum chromodynamics, QCD) kutatások terén Brookhaven egyike a világ legnagyobb központjainak. Ez az az elmélet, mely leírja a szubatomi részecskék kölcsönhatását, az en-



A New York Blue

nek alapján végzett bonyolult számítások nélkülözhetetlenek a brookhaveni Relativistic Heavy Ion Collider berendezéssel (RHIC, relativisztikus nehézion ütköztető) végzett kísérletek értelmezéséhez.

A konferencián az is bemutatásra került, hogy a szuperszámítógépek milyen fontosak a fehérjék szerkezetének modellezésében, a cinkoxid nanocsövek geometriai szerkezetének vizsgálatában, új atomreaktor-konstrukciók hidrodinamikai vizsgálatában, valamint az aeroszolok szerepének modellezésében a globális klímaváltozás tanulmányozásánál.

www.bnl.gov

Bolygókutatás: Ikerbolygók

A csillagászok felfedeztek egy csillagot, amely a Napéhoz nagyon hasonló tulajdonságokkal rendelkezik. Két perui csillagász, *Jorge Meléndez*, az Australian National University és *Iván Ramírez*, a University of Texas, Austin, McDonald Obszervatóriumának kutatója közzétette a HIP 56948 jelű égitest adatait, amely egyike annak a négy ikerbolygónak, amely a Nap „ikertestvérének” tekinthető.

Ez a csillag, amely a Draco konstellációban található 200 fényév távolságban, a Naphoz hasonlóan igen alacsony lítiumtartalommal rendelkezik, továbbá nincs neki egy közeli pályán keringő „forró Jupiter” bolygója. Ezek az ikerbolygók igen hasznosak kalibrációs célokra, és a földön kívüli intelligencia kutatásában is segítséget jelenthetnek.

www.journals.uchicago.edu/APJ

Kína célbavette a Holdat

2007. október 24-én a Kínai Nemzeti Űrkutatási Ügynökség holdszondát bocsátott fel a dél-kínai Szecsuan tartomány Xichang űrközpontjában. A szonda november 5-én lépett Hold körüli pályára. A Chang'e-1 szondának négy feladatot kell végrehajtania. Az első feladat háromdimenziós képek közvetítése a Hold felszínéről, valamint a pólusok környezetéről. A szonda továbbá 14 kémiai elem előfordulását vizsgálja, meghatározza a felszín talajvastagságát, tanulmányozza a Föld és Hold közötti térség időjárás viszonyait.

A 190 millió dollár költségű szonda nagy méretű, tömege 2350 kg, és a Hold felszíne felett 200 km magasságban kering. A tervek szerint egy teljes évig fog méréseket végezni.

Ez a misszió az első lépése annak a programnak, amelynek keretében 2020 után a kínaiak űrhajósokat kívánnak a Holdra juttatni. A Chang'e-2 szonda 2012-ig holdjáró modult juttat majd a Holdra. A Chang'e-3 misszió keretében holdkőzeteket fognak gyűjteni és a Földre visszajuttatni.

www.nature.com

Szerződés az IBM-mel új szuperkomputer építésére?

A National Science Foundation azt tervezi, hogy megbízza az IBM-et a világ leggyorsabb szuperszámítógépe megépítésére az Illinois Egyetemen, derül ki a dokumentumokból, amelyeket egy rövid időre tévedésből kitétek az internetre, a szövetségi kormány honlapjára.

A 200 millió dollár építési költségű és öt évre több mint 400 millió dollár működési költségű szuperszámítógép körül nagy a vita. Az új gép az első lesz, amely képes lesz másodpercenként ezer billió műveletre (1 petaflop). Az új szuperszámítógépet nagy számítógépes projektek céljaira hozzák létre – ilyen például a globális klímaváltozás számítógépes modellezése. *Jack Dongarra*, a Tennessee Egyetem kutatója

szerint „ez egy különleges gép lesz, jelentőségét tekintve olyan, mint a Hubble űrteleszkóp”. A döntést a National Science Boardnak kell ratifikálnia, de erről még nem érkezett jelentés.

2004-ig a világ leggyorsabb számítógépe a japán *Earth Simulator* volt, amelynek sebessége 35 teraflop. 2002-ben építették, költsége 350–400 millió dollár volt, működtetése további 500–1000 millió dollár. Ezt a címet hódította el az IBM BlueGene/L gépe. A japánok nem adták fel a versenyt, és egy új gépet terveznek, amely 2011-re el fogja érni a 10 petaflop sebességet.

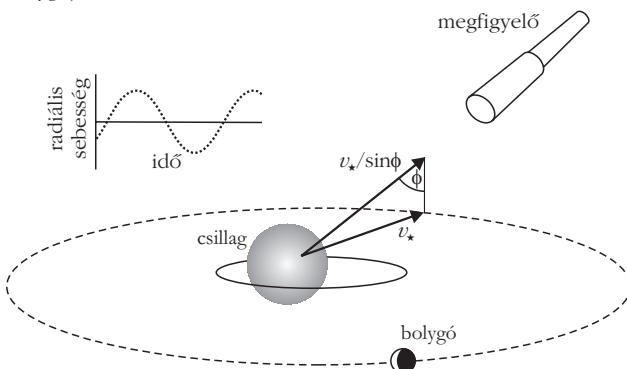
www.newyorktimes.com

MINDENTUDÁS AZ ISKOLÁBAN

BOLYGÓK MINDENÜTT

1995 óta egy új, izgalmas szakterület rohamosan fejlődik: a más csillagok körüli bolygók vizsgálata. A megfigyelési technika immár lehetővé teszi, hogy a tőlünk több tíz vagy száz fényévre lévő csillagok bolygóit, az extraszoláris vagy exobolygókat felfedezzük. Közvetlenül, direkt módon nagyon nehéz kimutatni a halvány bolygót a sok-sok nagyságrenddel fényesebb csillaga mellett. Az esetek döntő többségében a közvetett módszerek jártak sikerrel, amikor a bolygónak a csillagára gyakorolt gravitációs hatását lehetett megfigyelni. A két égitest ugyanis a közös tömegközéppont körül kering, s így a csillag színeképeben – a mozgása miatt, a Doppler-effektus következtében – periodikusan eltolódnak a színekvonalak. Ezekből kiszámítható a csillag látóirányú sebességének változása, abból pedig – a csillag becsült tömegét felhasználva – a sötét kísérő minimális tömege meghatározható (1. ábra). Ha ez a tömeg a bolygók tartományá-

1. ábra. Egy csillag és bolygója a közös tömegközéppont körül kering, így a csillag látóirányú (radiális) sebessége változik, ha van bolygója.

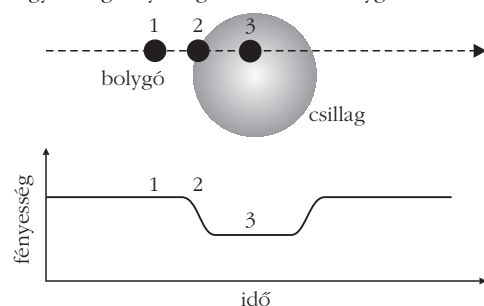


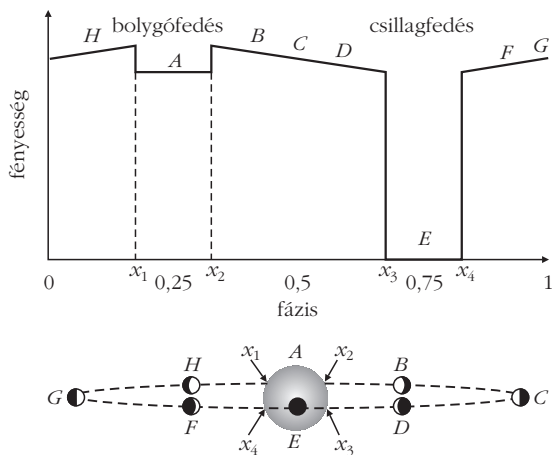
ba esik (kisebb, mint 13 Jupiter-tömeg), akkor a csillag körüli objektum planéta. Ha ennél nagyobb, de 75 Jupiter-tömegnél kisebb, akkor valószínűleg „barna törpe”, a legnagyobb óriásbolygók és a legkisebb tömegű vörös törpe csillagok közé eső égitest.

Az eddig felfedezett mintegy 250 exobolygó többségét az előbb említett spektroszkópiai módszerrel találták. Sok olyan csillag van (25), amely körül 2, 3 sőt 4 bolygó kering. Erre abból következtetnek, hogy a csillag látóirányú sebessége csak több periodikus függvény összegével írható le, azaz több égitest „rán-gatja” a csillagot.

Egy másik sikeres módszer a bolygó kimutatására az, amikor a csillag fényességének kismértékű, többszöri (ciklikus) elhalványodását figyeljük meg amiatt, hogy a bolygója elhalad előtte, eltakar belőle (2. és 3. ábra). Persze ehhez az kell, hogy a bolygó csillag körüli keringési síkja közel essen a látóirányunkhoz. Ilyen fedés vagy „tranzit” esetén (eddig 24) a csillag becsült mérete és a bolygópálya adatainak ismeretében az exobolygó mérete is meghatározható (4. ábra). A tömeg és a sugár ismeretében a sűrűség kiszá-

2. ábra. Egy csillag fényességcsökkenése a bolygó átvonulása során.





3. ábra. Az összfényesség akkor is lecsökken egy kicsit (főleg infravörösben), ha a bolygót takarja el a csillag. A fénygörbe alakját a bolygó tőlünk látható fázisai is befolyásolják.

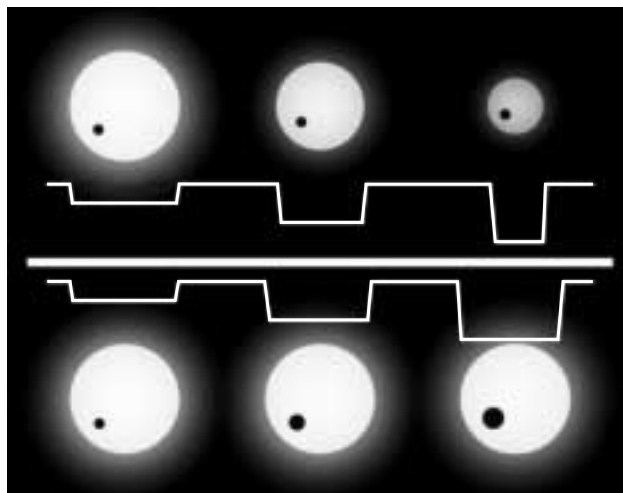
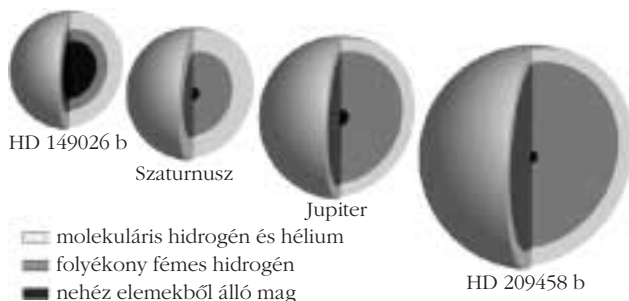
molható és a bolygó belső felépítése is modellezhető (5. ábra). Sőt! A bolygó esetleges légkörére is információt kaphatunk. Amikor a bolygó elhalad a csillaga előtt, annak fénye áthalad a bolygó légkörén, és ez utóbbi színképe hozzáadódik a csillag színképéhez. Ezt összehasonlítva a csillag akkori színképével, amikor a bolygó nincs előtte, meghatározható a bolygó-légkör spektruma, és a színképvonalak alapján annak kémiai összetétele. Ha jelentős mennyiségű oxigén van a légkörben, akkor valószínűsíthető fotoszintetizáló növényzet a felszínen. Ugyancsak erre utalhat, ha az infravörös tartományban nagy a bolygó fényvisszaverő képessége.

Az itt említett két felfedezési módszer mellett több más – kevésbé hatékony – eljárás is létezik, ezekről az irodalomban felsorolt forrásokban olvashatunk.

A bolygó felszíni hőmérsékletét is megbecsülhetjük a csillag felszíni hőmérséklete és sugara, valamint a bolygópálya fél nagytengelye és a bolygó fényvisszaverő képessége, az albedó (a Jupiterre kb. 0,35) ismeretében. A HD 209458 jelű csillag bolygója mintegy 1100 fokos: egy felfújódott forró, ritka gázgömb! A Hubble-űrtávcsővel egy bolygóátvonulás során felvették a rendszer színképét. Megállapították, hogy a bolygó légköre a vártnál kevesebb nátriumot tartalmaz.

Az ismert exobolygók mind nagyobbak a Földnél, általában Jupiter típusúak lehetnek. A spektroszkópiai és fotometriai megfigyelések még nem elég érzéke-

5. ábra. Két naprendszerbeli és két extraszoláris óriásbolygó méretarányos belső szerkezeti modellje. Jelentős különbségek vannak a szilárd mag, a folyékony köpeny és az atmoszféra arányaiban.

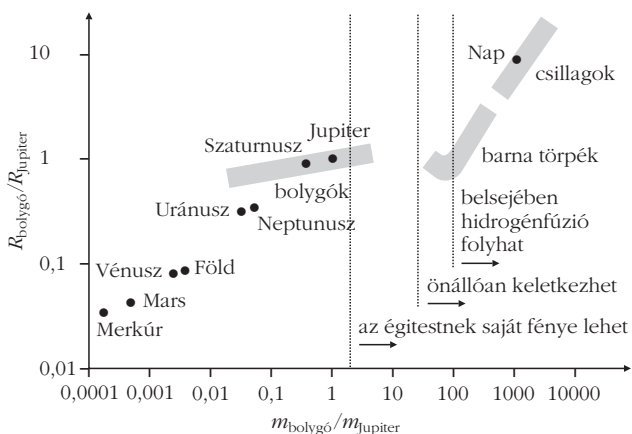


4. ábra. A fedési fényességsökkenés mértéke és időtartama a csillag típusától, és a csillag/bolygó méretaránytól is függ.

nyek ahhoz, hogy a Földhöz hasonló bolygókat fedezzünk fel (6. ábra). A következő néhány évben indítandó speciális űrtávcsövek azonban már ezt is lehetővé teszik. Igazán izgalmas eredmény lesz a Föld típusú bolygók megtalálása, hiszen az élet kialakulása, a civilizáció létrejötte az ilyen égitesteken valószínűbb. Számos elméleti vizsgálatot végeztek arra, hogy egy adott típusú csillag körül hol van az a lakható vagy lakhatósági zóna, ahol a bolygón a víz folyékony állapotban lehet. Ez a zóna egy vörös törpe körül a csillaghoz közel helyezkedik el és keskeny, a forróbb csillagok körül pedig távolabbi és szélesebb. Persze egy bolygón az élet kialakulásának esélyeit nemcsak a csillagtól való távolság határozza meg, hanem sok más körülmény is. Az éghajlatot befolyásolja a bolygó légkörének vastagsága, összetétele, fényvisszaverő képessége; a pálya lapultsága, a forgástengely helyzete stb. is. A csillagról érkező fény mellett hóforrás lehet a bolygó anyagában végbemenő radioaktív bomlás, vagy egy másik közeli égitest (például nagy hold) által okozott árapályfűtés.

Az infravörös tartományban érzékelő Spitzer-űrtávcsővel a közelmúltban acetilén- és cianhidrogén-molekulák nyomaira bukkantak egy fiatal csillag körüli

6. ábra. Az égitestek tömeg-sugar diagramja a bolygóktól a csillagokig.



A FIZIKAI SZEMLE LVII. ÉVFOLYAMÁNAK TARTALOMJEGYZÉKE

<p>A renormcsoportról, a kvantumtérelméleti végtelenekről és a kvantummechanika értelmezéséről – két beszélgetés Polónyi Jánossal, az MTA külső tagjával (<i>Hajdú János</i>) 109</p> <p><i>Abonyi Iván</i>: Emlékezés az ELTE TTK Elméleti Fizikai Tanszékének egykori tanáira 197</p> <p><i>Almár Iván</i>: Az úrkorszak első félszázada 289</p> <p><i>Balázs Béla Árpád</i>: A fizikusok továbbtűnő szent grálja: a „világképlet” 51</p> <p><i>Balogh Éva, Angeli István</i>: A fizikus szerepe a daganatos betegek gyógyításában 191</p> <p><i>Bérczi Alajos</i>: Elektronmozgás fehérvékben 320</p> <p><i>Bérczi Szaniszló</i>: A Naprendszer égitestjeinek fejlődése – a kisbolygók 88</p> <p><i>Bérczi Szaniszló</i>: A Hold fejlődéstörténete közetminták alapján 151</p> <p><i>Bérczi Szaniszló</i>: A Mars közei a marsi meteoritok alapján 260</p> <p><i>Borbély Éva</i>: A számítógépek építésének fizikai korlátai 54</p> <p><i>Börzsönyi Tamás</i>: Lejtőn lefolyó szemcsés anyag dinamikája: instabilitások, lavinák 217</p> <p><i>Csabai István, Purger Norbert, Dobos László, Szalay Sándor, Budavári Tamás</i>: Az Univerzum szerkezete 385</p> <p><i>Dombrádi Zsolt</i>: A héjszerkezet átrendeződése egzotikus atommagokban 221</p> <p>Ferenci díj, 2006 (<i>Osváth Zoltán, Radnóci György Zoltán</i>) 59</p> <p><i>Finta Viktória</i>: Milyen hatásai vannak a környezetünkben lévő nem ionizáló elektromágneses sugárzásoknak? 349</p> <p><i>Forgács P., C. Hoenselaers, P. Tod, Fodor Gy., Vasúth M., Gergely Á.L.</i>: In memoriam Perjes Zoltán (1943–2004) 14</p> <p><i>Fülöp Zsolt</i>: Magreakciók és a nukleáris asztrifikáció 196</p> <p><i>Gergely György, Gurbán Sándor, Sulyok Attila, Menyhárd Miklós</i>: Elektrontranszport-paraméterek meghatározása 299</p> <p><i>Geszti Tamás</i>: Rezgő tükrök a kvantumvilág határán 401</p> <p><i>Geszti Tamás</i>: Tisza László és a szuperfolyékonyság elmélete 408</p> <p><i>Gündischné Gajzágó Mária</i>: Mit tanított Bolyai Farkas a gravitációról? 266</p> <p><i>Gyulai József</i>: Egyesült anyagtudomány 296</p> <p><i>Hartmann Ervin</i>: Biró Gábor (1925–2007) 162</p> <p><i>Horváth Dezső</i>: Szimmetriák és sértésük a részecskék világában – a paritásváltás 50 éve 47</p> <p><i>Horváth Dezső</i>: Kedvenc mértékegységeim 127</p> <p><i>Hraskó Péter</i>: A GP-B kísérlet 181</p> <p><i>Jubász Zoltán</i>: Népzenei összehasonlító elemzések mesterséges intelligenciákkal 183</p> <p>Keszthelyi Lajos 80 éves (<i>Ormos Pál, Szőkefalvi-Nagy Zoltán</i>) 57</p> <p><i>Király Péter</i>: A 100 éves Eötvös–Pekár–Fekete kísérletek és maig tartó hatásuk 1</p> <p><i>Kiss Ádám</i>: A gyorsítók szerepe a fejlett társadalmakban a XXI. század elején 145</p> <p><i>Kocsy Gábor</i>: Az egyszerű radioaktív bomlás statisztikája 264</p> <p><i>Kollár János</i>: Fémek felületi struktúráinak kvantummechanikája 42</p> <p><i>Krasznaborkay Attila</i>: Egzotikus atommagok 357</p> <p><i>Kroó Norbert</i>: Fényes új világ: egy új típusú fény és alkalmazásai 37</p> <p>Kutatás – versenyszerűen (<i>Kádár György, Bársony István</i>) 295</p> <p><i>Láng Róbert</i>: Tudósok fasora 331</p> <p><i>Lobner Tivadar, Gergely György, Petrik Péter, Fried Miklós</i>: Az ellipszometria alkalmazása félvezető-fizikai kutatásokban 310</p> <p><i>Márk Géza István, Bálint Zsolt, Kertész Krisztián, Vértessy Zsófia, Biró László Péter</i>: A biológiai eredetű fotonikus kristályok csodái 116</p> <p><i>Nagy Mihály</i>: Százötven éve hullott a világhírű kaba-debreceni lebkő 395</p> <p><i>Nagy Norbert, Pap Andrea Edit, Deák András, Horváth Enikő, Hörvölgyi Zoltán, Bársony István</i>: Periodikus nanostruktúrák makroszkopikusan nagy felületeken 314</p> <p><i>Nemecz Ernő</i>: A Föld eredete 6</p> <p><i>Pozsgai Imre</i>: Fizika a szilárdfázisú gyógyszerek fejlesztésében és gyártásában 156</p> <p><i>Rácz Béla</i>: Búcsú Ketskemény István professzortól 161</p> <p><i>Radnai Gyula</i>: Wigner Jenő iskolás évei 62</p> <p><i>Rajkóvits Zsuzsanna</i>: Szerkezeti színek az élővilágban 121</p> <p><i>Rajta István</i>: Protonnyalábos mikromegmunkálás: egy új, direkt írásos, 3-dimenziós litográfiás eljárás 187</p>	<p><i>Slíz Judit, Rajnai Renáta</i>: Kövesligethy Radó és a testek hőmérsékleti sugárzása – egy tudománytörténeti érdekesség 225</p> <p><i>Sós Katalin</i>: Építőanyagok radioaktív sugárzása 83</p> <p><i>Szabó Levente</i>: Liftterek és a Biefeld–Brown-effektus 228</p> <p><i>Szergényi István</i>: A kollektív előkészítés, az oktatás, a tudomány és a technológiafejlesztés szerepe az energiapolitikában 325</p> <p>Szerzőink figyelmébe 72</p> <p><i>Tanczikó Ferenc, Major Márton, Nagy Dénes Lajos</i>: Molekulanyaláb-epitaxia berendezés az MTA KFKI Részecske- és Magfizikai Kutatóintézetben 78</p> <p>Tisza László, 1907–. (<i>T. K.</i>) 195</p> <p><i>Tóth L. Viktor</i>: Szél hozott, szél visz el 392</p> <p><i>Trócsányi Zoltán</i>: A kvantum-szindinamika szerepe nagyenergiájú részecskeutközések értelmezésében 73</p> <p><i>Trócsányi Zoltán</i>: A Standard Modell Higgs-bozonja nyomában az LHC-nál 253</p> <p><i>Ungár Tamás</i>: A deformációs anizotrópia diszlokációs modellje 403</p> <p><i>Vértessy Gábor, Pardaviné Horváth Márta</i>: Mikroméretű monodomén részecskék mágneses viselkedése 302</p> <p><i>Zolnai Zsolt, N.Q. Khabb, Battistig Gábor</i>: A csatornahatás szerepe ionsugaras analitikai és ionimplantációs kísérletekben 305</p> <p>ATOMOKTÓL A CSILLAGOKIG</p> <p><i>Czirók András</i>: Sejték önszerveződésének fizikája 201</p> <p><i>Jubász András</i>: Mindennapok fizikája 273</p> <p><i>Kiss Ádám</i>: Fizika a környezettudományban 232</p> <p><i>Lendvai János</i>: Új rovat a Fizikai Szemlemben: »ATOMOKTÓL A CSILLAGOKIG« 164</p> <p><i>Patkós András</i>: Részecskék az Univerzumban 165</p> <p><i>Tasnádi Péter</i>: Mitől függ az időjárás? 362</p> <p><i>Vattay Gábor</i>: Az internet fizikája 411</p> <p>A FIZIKA TANÍTÁSA</p> <p>A 2006. évi Eötvös-verseny ünnepélyes eredményhirdetése és díjkiosztója (<i>Geffert András</i>) 25</p> <p>Az ELTE Fizika Doktori Iskolája „A fizika tanítása” címmel (<i>Jubász András</i>) 333</p> <p>Az Országos Szilárd Leó Fizikaverseny meghirdetése a 2007/2008. tanévre 424</p> <p>Csodák pedig vannak – és terjednek (<i>Papp Katalin</i>) 177</p> <p><i>Halász Gábor</i>: Vasmagos tekercs önindukciós egyúthatója 239</p> <p>Hírveses iskola – 450, kiváló tanár – 75, versenyző diákok – 25 (<i>Kovács László</i>) 378</p> <p>Jubileumi Középiskolai Fizikatanári Anket és Eszközbeutató (<i>Mester András</i>) 67</p> <p><i>Károlyházy Frigyes</i>: Az öcskös felesége 367</p> <p><i>Kirsch Éva, Elblinger Ferenc, Tepliczky István</i>: Élményrészecskék a részecske-élményeinkből 418</p> <p>Kis Atlasz sorozat a Naprendszerről (<i>Bérczi Szaniszló</i>) 95</p> <p><i>Lang Ágota, Czupy Judit</i>: Fizikátúra – avagy hogyan mozgassuk meg diákjainkat fizikailag? 96</p> <p><i>Papp Katalin, Nagy Anett</i>: Public relation és a fizikatanítás – avagy hogyan tegyük vonzóvá a fizika tantárgyat 18</p> <p><i>Radnai Gyula, Tichy Géza</i>: Perdületes paradoxonok, (a)vagy: paradoxonok a perdületre 244</p> <p>Rocard-jelentés – elsőkézből (<i>Szilágyi Zsuzsa</i> interjúja <i>Csermely Péterrel</i>) 340</p> <p>Ronyecz József, 1928–2007 (<i>Tbeisz György</i>) 381</p> <p><i>Sükösd Csaba</i>: A X. Szilárd Leó Nukleáris Tanulmányi Verseny – beszámoló, I–II. rész 373, 413</p> <p><i>Székely Tibor, Papp Katalin</i>: Digitális fényképezőgép alkalmazása a fizika tanításában 205</p> <p><i>Szász Ágota, Neda Zoltán</i>: Hálózati ping-pong, avagy a fény sebességének számítógépes mérése 132</p> <p><i>Szondy György</i>: Nyugalmi vs. relativisztikus tömeg 275</p> <p><i>Teiermayer Attila</i>: Fizika szakkör a Karolina Gimnáziumban 236</p> <p>Tíz éves a Csodák Palotája! (<i>Egyed László</i>) 135</p> <p>Varga István, 1952–2007 (<i>Nagy Márton</i>) 382</p> <p><i>Zátonyi Sándor</i>: A motiváció és környezetünk fizikája 169</p>
---	---

MINDENTUDÁS AZ ISKOLÁBAN	
A fekete lyukak (<i>Németh Judit</i>)	180
Bolygók mindenütt (<i>Szatmáry Károly</i>)	433
Hallhatatlan hangok (<i>Mester András</i>)	288
Hálózatok mindenütt (<i>Farkas Illés</i>)	216
Mitől színes az élővilág? (<i>Rajkóvits Zsuzsanna</i>)	142
Nanotudomány, nanotechnológia (<i>Gyulai József</i>)	71
Polariméter a szemben, polarizációs iránytű és napóra az égen, vízen és vízben (<i>Hegedűs Ramón, Horváth Gábor</i>)	34
Szén nanocsövek (<i>Kürti Jenő</i>)	106

VÉLEMÉNYEK

<i>Kamarás Katalin</i> : Ófalu és Újfalu	27
--	----

KÖNYVESPOLC

Bódizs Dénes: Atommagsugárzások mérés technikái (<i>Deme Sándor</i>)	101
Erostyák János, Kürti Jenő, Raics Péter, Sükösd Csaba: Fizika III. (<i>Abonyi Iván</i>)	280
Gesztli Tamás: Kvantummechanika (<i>Hajdu János</i>)	279
Hargittai István: Az öt világformáló marslakó (<i>Kovács László</i>)	139
Hraskó Péter: Elméleti fizika (<i>Tél Tamás</i>)	426
Icke, Vincent: Christian Huygens – jövő a múltban (<i>Berényi Dénes</i>)	249
Inzelt György: Vegyianyagjában szintén megteszi (<i>Berényi Dénes</i>)	248
Kaku, Michio: Hipertér (<i>Berényi Dénes</i>)	68
Korom Erzsébet: Fogalmi fejlődés és fogalmi váltás (<i>Papp Katalin</i>)	102
Némethné Papp Kornélia: Rátz lászló tanár úr (<i>Ujvári Sándor</i>)	179
Singh, Simon: A Nagy Bumm (<i>Abonyi Iván</i>)	428
Szabó Árpád: A fizika története (<i>Berényi Dénes</i>)	208
Zsúdel László: Biofizika (<i>Ujvári Sándor</i>)	209

PÁLYÁZATOK

A 2007. évi Öveges József díj pályázati felhívása	100
A tudomány színre lép – Science on Stage	426
Pályázat kísérleti fizikából	343
Pályázat Teller Ede születése 100. évfordulójának megünneplésére	383

HÍREK – ESEMÉNYEK

50 éves az úrkorszak – vetélkedő diákoknak	180
51. Országos Középiskolai Fizikatanári Ankét és Eszközbemutató	284
A 2006. évi Eötvös-verseny ünnepélyes eredményhirdetése és díjkiosztója	25
A CERN-ből küldött neutrínókat 730 kilométeres utazás után a Gran Sasso Laboratóriumban detektálták	431
A D0 és CDF együttműködés új bariont talált	286
A Dirac-érem kitüntetettjei 2007-ben	287
A dohány természetes radioaktivitása sokkal nagyobb, mint a csernobili faleveleké	252
A kék Mars	186
A Kongresszus támogatja a kutatások költségvetésének megduplázását	287
A Merkúr bolygónak folyékony magja van	252
A német részecskefizika több pénzhez jut	287
A neutron 75. születésnapjára titkos iratok hoztak nyilvánosságra	252
A világ legnagyobb szupravezető mágnes	33
Akadémiai Ifjúsági Díj	104
Alap kutatások az OTKA támogatásával	281
Amerika világrekorddal szerezte vissza vezető szerepét	344
Anyagtudományi őszi iskola	251
Atomerőmű-bemutató az Akadémián	104
Atomí vastagságú széntranzisztor lehet a szilíciumtranzisztor utóda	106
Atomoktól a Csillagokig – 2007 őszi program	163
Az Eötvös Társulat Tisztújító Küldöttközgyűlése, 2007	87
Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat Közhasznúsági jelentése a 2006. évről	213
Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat Tisztújító Küldöttközgyűlése	250
Befektetés a tudásba, befektetés a jövőbe	344
Bolygókutatás: Ikerbolygók	432
CoRoT Űrtávcső: út a csillagok belsejébe és új világok felé	140

Egy korszaknak vége, kikapcsolták a HERA berendezést	384
Egyhetes továbbképzés fizikatanároknak magyar nyelven a CERN-ben, 2007-ben is	215
ELFT klubdelután a Fizika Doktori Iskoláról (2006. december 22.)	29
Elhunyt Kai Siegbahn, az ESCA módszer feltalálója	286
Elhunyt Wolfgang K.H. Panofsky	384
ERC – sikeres hazai pályázók	282
„Európai top” egyetemek Magyarországon	430
Felavatták az új mexikói távcsövet	33
Felfedezték ³ H-et, a hidrogén eddigi legnehezebb izotópját	431
Felfedezték az eddigi legnehezebb szilíciumizotópot	344
Felhívás	105
Felhívás a határainkon kívül élő, magyarul tudó fizikusokhoz, fizikatanárokhöz és fizikát tanuló egyetemistákhoz	70
Felhívás a Magyar Tudomány Ünnepe 2007. évi megrendezésére	103, 281
Felhívás fizikatanároknak	344
Felhívás javaslattételre	31
Fellőtték a Dawn űrszondát	384
Fém amely elpusztítja a szuper-baktériumokat	142
Film az űrkutatásról	216
Fizika Tanösvény az Eötvös Egyetemen	429
Fizikus Vándorgyűlés – 2007. augusztus 22–24., Eger	282
Friss	61
Héliumhiány veszélyezteti a kutatást és az ipart	252
Huszonnyolc új bolygót fedeztek fel távoli naprendszerben	287
India vonzóvá szándékozik tenni a tudományos életpályát a fiatalok számára	431
Indiai föld alatti laboratórium neutrínókutatásra	180
Indul az LHC! – Elméleti Fizikai Iskola	105
IV. Budapesti Szkeptikus Konferencia	33
Japán fejleszti magfizikai kutatásait	24
Jubileumi Középiskolai Fizikatanári Ankét és Eszközbemutató	250
Kezdeményezés akadémiai tévécsatorna indítására	432
Kína célbavette a Holdat	131, 210, 286
Kitüntetés	34
Kozmikus sugárzás szupernóva-maradványokból	216
Marx György emlékelőadás, 2007	70
Méhekkel a bombák ellen	285
Molekuláris Bionika	285
Molekulától az agykutatásig	34
Naperőmű Kínában	344
Nemzetközi konzorcium távcsőépítésre	180
Nukleáris szaktábor középiskolásoknak	252
„Nukleáris tél” – elavult kifejezésnek hangzik, de még nincs vége a veszélynek	344
Nyilvánosságra hozták az ötszáz leggyorsabb számítógép listáját	69, 211
Örökifjú, megújuló fizika! – Fizikus Vándorgyűlés 2007	384
Részecskefizikai detektor figyelmeztet az erdőtüzekre	281
Simonyi Károly Tudományos Emlékülés 2007	104
Statistikus fizikai nap	433
Szerződés az IBM-mel új szuperkomputer építésére?	430
Szuper-vízvezető anyag	432
Szuperszámítógépek a Brookhaven Nemzeti Laboratóriumban	32
Tanártovábbképzés a CERN-ben	286
Tarnóczy Tamás (1915–2007)	32
Telházás karácsonyi koncert Szegeden	141
Tervek az aszteroidák elleni védekezésre	70
Tiszteletbeli tagság	32
Tudományos ülés az Akadémián	384
Tudományos ülés Teller Ede születésének 100. évfordulója alkalmából	211
Új akadémikusok	384
Új egyetemi képzés: Molekuláris Bionika	430
Új életre kel a LINAC	344
Új műszer veszélyes vegyi anyagok titkos észlelésére	71
Új röntgenmikroszkóp-technika nanométeres skálán	190
Új szerkezeti anyagok lítium akkumulátorok számára	285
Új tudományos ismeretterjesztő filmek	288
Újabb kísérlet a relativitáselmélet igazolására	140
Újra várja látogatóit a TIT Uránia Bemutató Csillagvizsgáló	141
Vízajtású autó, de most komolyan?	

anyagkorongban, a Föld típusú bolygók keletkezési zónájában. Vizes környezetben ezekből kémiai reakciók során a fehérjék és a DNS alapvető építőkövei jöhetnek létre!

A csillagászok alaposan meglepődtek azon, hogy az exobolygók nagy része „forró Jupiter” típusú, nagyon közel kering a csillagához, néhány napos keringési idővel. A legtöbb rendszer nem olyan felépítésű, mint Naprendszerünk. Újra kell gondolni a kialakulási elméleteket. A számítógépes szimulációk arra utalnak, hogy az óriásbolygók a csillaguktól távolabb jönnek létre, de az anyagkorongban keringve fékeződnek, és fokozatosan beljebb kerülnek (migráció). Vajon mi lesz a sorsuk? Stabilizálódnak a pályájuk, vagy belezuhannak a csillagba? Van-e mód, hogy magát a becsapódást vagy következményét (például a csillag forgásában bekövetkező változást) kimutassuk?

Az exobolygók kutatásában szép magyar sikerek is születtek. *Bakos Gáspár* és munkatársai (Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics) – az MTA KTM Csillagászati Kutatóintézetével együttműködve – kis méretű, automatizált távcsövekkel (HATNet: Hungarian Automated Telescope Network) készítenek képeket az ég nagy részéről, exobolygófedések miatti fényváltozásokat keresve. Eddig 4 csillagnál fedeztek fel planétát, ezzel ők az egyik legsikeresebb bolygóvadász csoport. Ráadásul felfedezéseik mindegyike különösen érdekes valamilyen szempontból. A HATNet első bolygója az eddig talált egyik legkisebb sűrűségű fedési exobolygó. A kutatócsoport második felfedezése, a HAT-P-2b a leglapultabb ellipszispályán keringő, egyben a legnagyobb fedési planéta az eddig találtak közül. A TrES (Trans-atlantic Exoplanet Survey) projekttel közösen vizsgált TrES-3 elnevezésű planéta pedig mindössze 31 órás keringési periódussal járja körbe csillagát, azaz egy év a bolygón alig hosszabb egy földi napnál. A HAT-P-3b különlegessége, hogy fémekben meglehetősen gazdag. A közel 0,6 Jupiter-tömegű óriás sugara 0,9-szerese a Jupiter sugarának, így a forró Jupiterek között a tömegéhez képest viszonylag kis méretű. Ez alapján úgy gondolják, hogy a bolygó harmadát nehéz elemek alkotják.

Naprendszerünkben a Jupiternek és a Szaturnusz-nak több mint 60 ismert holdja van, közülük a legnagyobbak Merkúr méretűek. Az óriási exobolygók körül akár Föld méretű holdak is keringhetnek. A holdak kimutatása azonban nagyon nehéz, eddig még egyet sem sikerült felfedezni. A Szegedi Tudományegyetemen csillagász oktatók és hallgatók egy csoportja vizsgálatokat kezdett arra vonatkozóan, hogy egy exobolygó esetleges holdját milyen hatásai alapján lehetne kimutatni. Az egyik legesélyesebb módszer a fedések elemzése lenne. Egy eléggé nagy hold ugyanis modulációkat, hullámokat okozhat a bolygó

átvonulása során a fényességcsökkenés görbéjén. Egy másik lehetőség azon alapul, hogy a bolygó és holdja közös tömegközéppont körül kering, és ennek a ket-tős rendszernek a tömegközéppontja mozog Kepler-pályán a csillag körül. A bolygó fedéseinek az idő-pontja tehát kis mértékben ingadozik, hiszen attól is függ, hogy a bolygó és a hold az adott időben éppen hogyan helyezkedik el egymáshoz képest. Ha pedig egy exobolygó sugárzása közvetlenül is kimutatható, akkor a holdja által okozott esetleges fedések közvetlenül is mérhetőek lennének. Az itt felsorolt kicsiny hatások kimutatásához persze a csillag–bolygó–hold hármas rendszernek hosszabb időn át stabilnak kell lennie. Erre, valamint az exobolygórendszerek dinamikájára vonatkozó számításokat az ELTE Csillagászati Tanszékének égi mechanikával foglalkozó munkatársai is végezték.

Nézzük meg, hogy a fizika mely területeit érinti ez a témakör. A megfigyelések, felfedezési módszerek az optikához tartoznak, de a hullámtan és az atomfizika is előkerül a színeképelemzés kapcsán. A bolygópályáknál a Kepler-törvényeket, a lakható zóna helyének megállapításánál, a bolygók hőmérsékletének becslésénél, és légkörük, esetleges felszíni tengerek jellemzésénél hőtani ismereteket használunk. A bolygókon uralkodó körülmények meghatározásához a tömegből és a sugárból a felszíni gravitációs gyorsulást és a szökési sebességet számolhatjuk ki. Feltéve, hogy a bolygó forog, az ebből származó centrifugális és Coriolis-erő nagyságára tehetünk becsléseket. Ha van légkör és mágneses tér is, akkor a csillagról érkező töltött részecskék sarki fényt is okozhatnak. A holdak árapályhatását is érdemes végiggondolni. Ha van a rendszerben törmelékgyűrű vagy kisbolygóövezet, a bolygóra való becsapódások gyakoriságára is tehetünk becslést. Mindezekhez kell egy kis földtudomány és kémia is. Ami pedig az exobolygókon lehetséges élet kialakulását és formáit illeti, az már (exo)-biológia. Az exobolygók izgalmas témaköre kiváló lehetőséget ad a természettudományos komplex szemlélet fejlesztésére. Remélhetőleg az alábbi cikkek és honlapok segítenek a tájékozódásban.

Szatmáry Károly
Szegedi Tudományegyetem,
Kísérleti Fizikai Tanszék

Irodalom és lapok az interneten

1. Szatmáry K.: Exobolygók. *Magyar Tudomány* 2006. augusztus, 968. o. <http://www.matud.iif.hu/06aug/08.html>
2. Kereszturi Á., Simon T.: Asztrobiológia. *Meteor csillagászati évkönyv* 2005, 190. o.
3. A Szegedi Csillagvizsgáló lapjai <http://astro.u-szeged.hu/ismeret/exo/extrasol.html>
4. A Magyar Csillagászati Egyesület hírportálja: <http://hirek.csillagaszat.hu/exobolygok.html>
5. Extrasolar Planets Encyclopaedia: <http://exoplanet.eu>

Fizikai Szemle
MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

megjelenését anyagilag támogatják:



Az Univerzum története

– az első 13,7 milliárd év –



sötét energia által
gyorsított tágulás

galaxisok,
csillagok,
bolygók stb.
kialakulása

az első csillagok
kialakulása körülbelül
400 millió év elteltével

sötét kor

utófény mintázata
400 000 év elteltével

felfúvódás

kvantumfluktuációk

