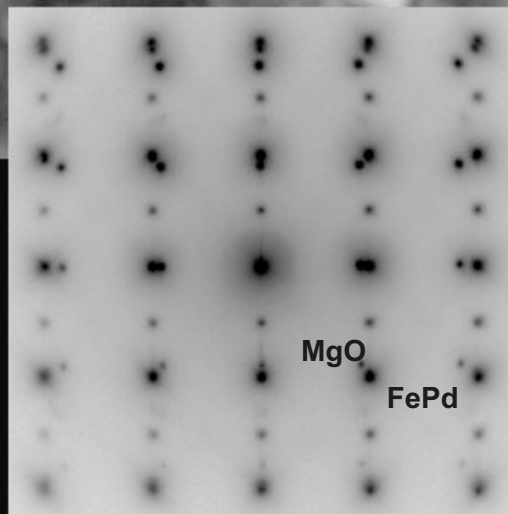
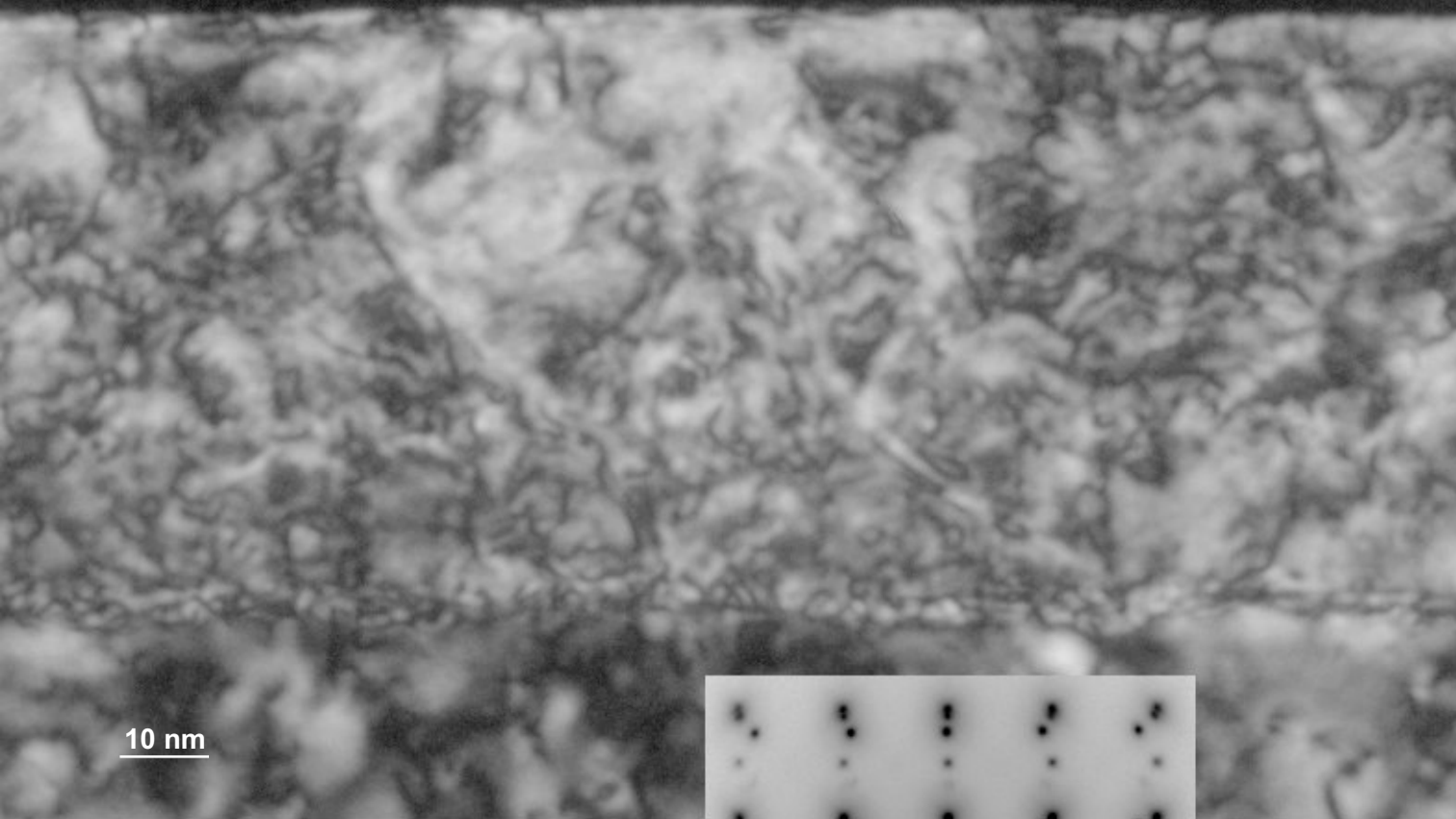


# fizikai szemle



2007/3

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

Főszerkesztő:

Németh Judit

Szerkesztőbizottság:

Beke Dezső, Bencze Gyula,  
Czitrovsky Aladár, Faigel Gyula,  
Gyulai József, Horváth Dezső,  
Iglói Ferenc, Kiss Ádám, Lendvai János,  
Ormos Pál, Papp Katalin, Simon Péter,  
Sükösd Csaba, Szabados László,  
Szabó Gábor, 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:

A KFKI RMKI MBE berendezésén  
növesztett  $[\text{FePd}/^{57}\text{FePd}]_{10}$   
multirétegen, az RMKI NIK  
implanterén történt  $5 \cdot 10^{16}$  atom/cm<sup>2</sup>  
He<sup>+</sup>-besugárzás után Kovács András  
(MTA MFA, Osakai Egyetem) által  
készített TEM-felvétel. A minta  
epitaxiális, lásd diffrakciós kép,  
a sötét tartományok a besugárzásokor  
keletkező hibáktól származnak.

A hátsó borítón:

Kisbolygók Bérczi Szaniszló írásához.

## TARTALOM

<i>Trócsányi Zoltán:</i> A kvantum-szindinamika szerepe nagyenergiájú részecskeütközések értelmezésében	73
<i>Tanczikó Ferenc, Major Márton, Nagy Dénes Lajos:</i> Molekulanyaláb-epitaxia berendezés az MTA KFKI Részecske- és Magfizikai Kutatóintézetben	78
<i>Sós Katalin:</i> Építőanyagok radioaktív sugárzása	83
<i>Bérczi Szaniszló:</i> A Naprendszer égitestjeinek fejlődése – a kisbolygók	88
<b>A FIZIKA TANÍTÁSA</b>	
Kis Atlasz sorozat a Naprendszerről ( <i>Bérczi Szaniszló</i> )	95
<i>Lang Ágota, Czupy Judit:</i> Fizikátúra – avagy hogyan mozgassuk meg diákjainkat fizikailag?	96
<b>PÁLYÁZATOK</b>	100
<b>KÖNYVESPOLC</b>	101
<b>HÍREK – ESEMÉNYEK</b>	87, 103
<b>MINDENTUDÁS AZ ISKOLÁBAN</b>	
Szén nanocsövek ( <i>Kürti Jenő</i> )	106
<i>Z. Trócsányi:</i> QCD as a help in the interpretation of high energy particle collisions	
<i>F. Tanczikó, M. Major, D.L. Nagy:</i> The molecular beam epitaxy assembly in the MTA KFKI Research Institute for Particle and Nuclear Physics	
<i>K. Sós:</i> The radioactivity of house-building materials	
<i>Sz. Bérczi:</i> The evolution of the smaller planets in the Solar System	
<b>TEACHING PHYSICS</b>	
A series of small maps of the Solar System ( <i>Sz. Bérczi</i> )	
<i>Á. Lang, J. Czupy:</i> Making physics attractive as an aim of specially organized “excursions”	
<b>TENDERS, BOOKS, EVENTS</b>	
<b>SCIENCE IN BITS FOR THE SCHOOL</b>	
Carbon nanotubes ( <i>E. Kürti</i> )	
<i>Z. Trócsányi:</i> Die Rolle der QCD bei der Interpretation von Stoßprozessen hochenergetischer Teilchen	
<i>F. Tanczikó, M. Major, D.L. Nagy:</i> Die Anlage für Molekularstrahl-Epitaxie im MTA KFKI Forschungsinstitut für Elementarteilchen- und Kernphysik	
<i>K. Sós:</i> Die Radioaktivität von Baumaterialien	
<i>Sz. Bérczi:</i> Die Entwicklung der kleineren Planeten des Solarsystems	
<b>PHYSIKUNTERRICHT</b>	
Eine Serie kleiner Atlanten des Solarsystems ( <i>Sz. Bérczi</i> )	
<i>Á. Lang, J. Czupy:</i> Interesse an der Physik als Zielsetzung von zu diesem Zweck organisierten „Ausflügen“	
<b>AUSSCHREIBUNGEN, BÜCHER, EREIGNISSE</b>	
<b>WISSENSWERTES FÜR DIE SCHULE</b>	
Kohlenstoff-Nanoröhren ( <i>E. Kürti</i> )	
<i>З. Троцани:</i> Роль квантовой хромодинамики в интерпретации столкновений высокоэнергетических частиц	
<i>Ф. Танцико, М. Майор, Д.Л. Надь:</i> Установка для молекулярной эпитаксии в Институте МТА КФКИ для Исследований Физики Элементарных Частиц и Ядер	
<i>К. Шос:</i> Радиоактивность строительных материалов	
<i>С. Берци:</i> Эволюция малых планет солнечной системы	
<b>ОБУЧЕНИЕ ФИЗИКЕ</b>	
Серия маленьких атласов солнечной системы ( <i>С. Берци</i> )	
<i>А. Ланг, Ю. Цупи:</i> Обучение физике в рамках специальных «экскурсий»	
<b>ОБЪЯВЛЕНИЯ-КОНКУРСЫ, КНИГИ, ПРОИСХОДЯЩИЕ СОБЫТИЯ</b>	
<b>НАУЧНЫЕ ОБЗОРЫ ДЛЯ ШКОЛ</b>	
Углеродные нанотрубки ( <i>Э. Кюртти</i> )	

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

# Fizikai Szemle

## MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

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

LVII. évfolyam

3. szám

2007. március

## A KVANTUM-SZÍNDINAMIKA SZEREPE NAGYENERGIÁJÚ RÉSZECSKEÜTKÖZÉSEK ÉRTELMEZÉSÉBEN

Trócsányi Zoltán

Debreceni Egyetem és MTA Atommagkutató Intézete

*Az élelítés alapja a jó felbontás.*

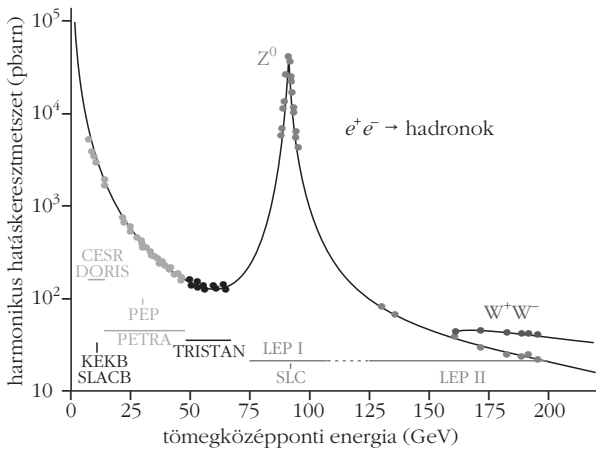
Minden ember késztetést érez, hogy ismereteket szerezzen a közvetlenül nem észlelt világról, például a természetben előforduló, de szabad szemmel nem látható mintázatokról. Ennek hagyományos eszköze a fénymikroszkóp, amelynek azonban természetes korlátai vannak, és hagyományos fajtáival mikrométernél kisebb méreteket nem lehet feloldani.

A kvantummechanika hőskorának eredménye az a felismerés, hogy a részecskék hullámtermészetet is mutatnak, és minél nagyobb a részecskék energiája, annál rövidebb a hullámhossza. Így elegendően nagy energiára gyorsított részecskékkel a látható fény hullámhosszánál kisebb méretű tárgyak szerkezetét is fel lehet deríteni. Ezen alapszik az elektronmikroszkóp működése, amellyel például a szemünk retinájának nagy felbontású képét is megtekinthetjük. Az elektronok gyorsításának csak a technika szab határt, és a múlt század utolsó harmadának elején már az a mérés célkitűzés fogalmazódott meg, hogy nagyenergiájú elektronokkal bombázott protonok szerkezetét a szóródó elektronok szórási képének elemzésével kellene felderíteni. Az ötlet megvalósítóinak Nobel-díjat hozó „SLAC-MIT” kísérletből tudjuk, hogy a protonnak szerkezete van, az elektron a protonban található és jelenleg pontszerűnek ismert alkotórészek (kvarkokon és gluonokon, összefoglaló néven partonokon) szóródik. Az ilyen mélyen rugalmatlan elektron-proton szórás kicsit felületesen a legnagyobb felbontású mikroszkópnak tekinthető.

Valójában a SLAC-MIT kísérletben nem közvetlenül az elektron, hanem az általa kibocsátott nagy energiájú foton került a partonokkal közvetlen kölcsönhatásba. Már ez is mutatta, hogy a mikroszkóp felbontásának a részecskeenergia növelésével való fokozása szintén természetes korlátba ütközik, ugyanis elegendően nagy energia kis térrészre való sűrítésével új részecskéket lehet előállítani *Einstein* híres felismerése, a tömeg és az energia egyenértékűsége következtében. Az ilyen folyamatok végállapotainak értelmezése teljesen újszerű megközelítést igényel. A részecskék kölcsönhatásait leíró matematikai modell segítségével a lehetséges végállapotok valószínűségeit tudjuk megjósolni és összevetni a tapasztalattal, ezáltal megerősítve vagy kizárva a modellt. A részecske-kölcsönhatások ma ismert legpontosabb modellje, a Standard Modell, háromféle kölcsönhatást, a gyenge, az elektromágneses és az erős kölcsönhatást írja le. Ez a sorrend egyben a kölcsönhatások erősségének a sorrendje is: a mai kísérleteket jellemző energiákon a harmadik mintegy 15-ször erősebb a másik kettőnél. Ennek megfelelően a részecskék ütközésekor az erős kölcsönhatás által vezérelt folyamatok egy nagyságrenddel gyakoribbak, mint az elektromágneses folyamatok, és így a kísérletek értelmezésének legfontosabb része az erős kölcsönhatás minél pontosabb leírása.

A Standard Modell anyagi részecskéi a három fermion részecskecsalád tagjai. Egy család két kvarkból és két leptonból (valamint ezek antirészecskéiből) áll. Például a legkönnyebb családba tartozik a protont és neutron felépítő  $u$  és  $d$  kvark ( $p = uud$ ,  $n = udd$ ), az

Elhangzott 2006. december 13-án az MTA Fizikai Osztálya tudományos ülésén.

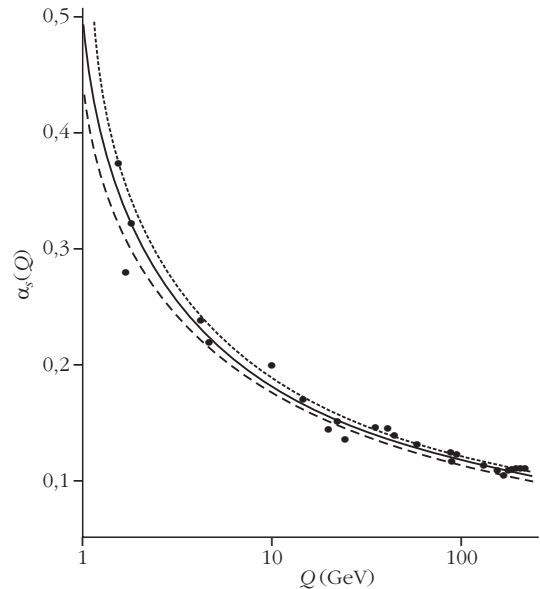


1. ábra. Elektron–pozitron hadronokba történő szétsugárzásának teljes hatáskeresztmetszete a tömegközépponti energia függvényében.

elektron és neutrínója. A másik két család felépítése hasonló, csak az egyes tagok tömege sokkal nagyobb. A fermionok között bozonok közvetítik a kölcsönhatást: a gyengét a nagy tömegű töltött és semleges gyenge bozonok, az elektromágnesest a semleges foton, az erőset az elektromosan szintén semleges, de színtöltéssel rendelkező nyolc gluon.

A korszerű részecskegyorsítók építésének elsősorban az a célja, hogy minél nagyobb energiára gyorsítsuk a részecskéket, és azok ütköztetésével a lehető legnagyobb energiasűrűséget érjük el kis térfogatban, hogy új, a természetben jelenleg nem található részecskéket állítsunk elő és tanulmányozzuk tulajdonságaikat. Az ilyen kísérletek legszebb példái a múlt század utolsó évtizedében működtetett LEP-gyorsító kísérletei. A LEP-gyorsítón elektron–pozitron ütközéseket végeztek eleinte 91,2 GeV tömegközépponti energián, majd nagyobb energiákon, elérve a 209 GeV-et is. A 91,2 GeV aról nevezetes, hogy ez az álló  $Z^0$  részecske energiája. Mintegy 17 millió  $Z^0$  előállítására révén nagy pontossággal sikerült igazolni a Standard Modell elméleti jóslatait. Például az elektron–pozitron szétsugárzás teljes hatáskeresztmetszetének elméleti jóslata meggyőzően egyezik a különböző kísérletekben mért értékekkel (1. ábra).

A kísérletek egyik központi kérdésköre volt az erős kölcsönhatás elméleti modelljének, a kvantum-színdinamikának (QCD) a kísérleti ellenőrzése. A QCD nem-ábeli,  $SU(N)$ , mértékelmélet. (Emlékeztetőül: az elektrodinamika ábeli,  $U(1)$ , mértékelmélet.) Az ilyen elméletek egyik érdekes jóslata, hogy a részecskék közötti kölcsönhatás erősségét szabályozó csatolási paraméter nem állandó. A QCD csatolása annál kisebb, minél nagyobb az ütközésben résztvevő részecskék energiája. Ennek az aszimptotikus szabadságnak nevezett jelenségnek 1973-ban történt felismeréséért kapta Gross, Wilczek és Politzer a 2004. évi fizikai Nobel-díjat. Azért éppen 2004-ben, mert a jelenség

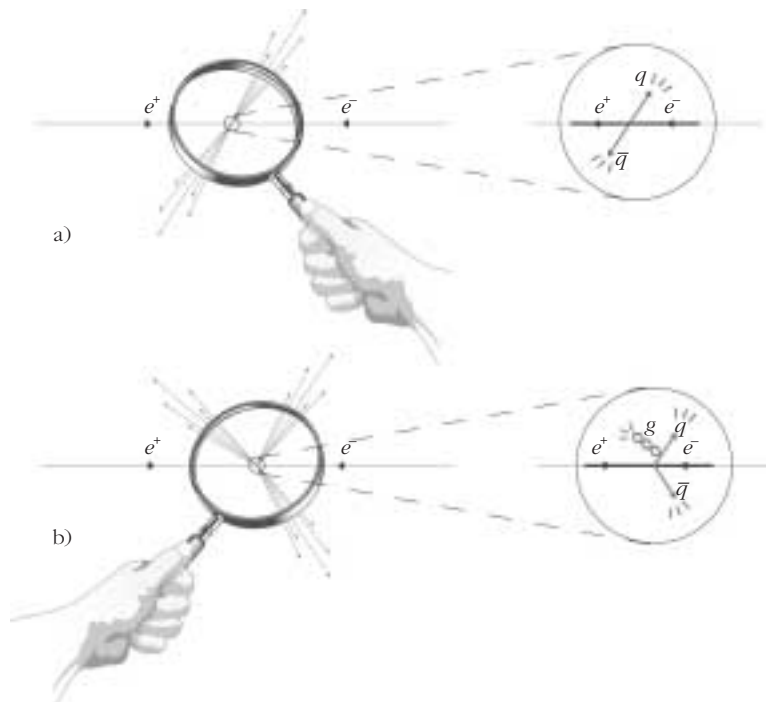


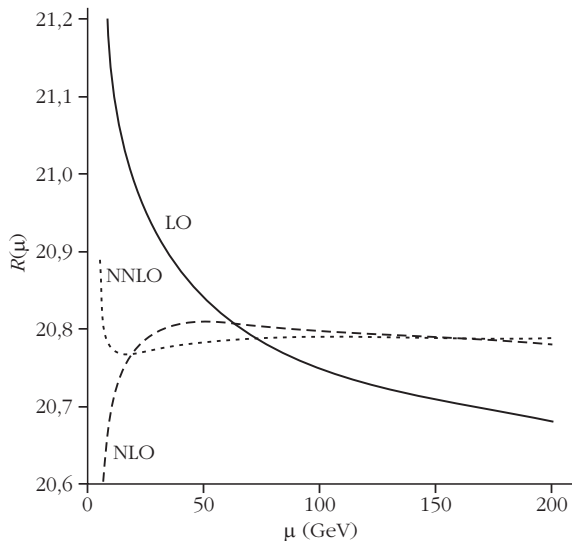
2. ábra. Az erős csatolás energiafüggése.

kísérleti igazolására akkorra gyűlt össze elegendően meggyőző kísérleti tapasztalat (2. ábra).

Az aszimptotikus szabadság lehetővé teszi, hogy perturbatív leírásmódot használjunk, amelyben a kölcsönhatást a csatolás szerinti sorfejtés segítségével vesszük figyelembe. A perturbációszámítás része az egyetemi bevezető kvantummechanika tananyagának, és aki azt jól megtanulta úgy gondolhatja, hogy ez egy jól megértett, „lezárt” témakör. Nos a QCD esetében ez távolról sincs így. Hogy miért nem, a nagyenergiájú elektron–pozitron ütközések példáján mutatom be.

3. ábra. a) Elektron–pozitron két hadronzáporba történő szétsugárzása és annak elemi folyamata:  $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$ . b) Elektron–pozitron három hadronzáporba történő szétsugárzása és annak elemi folyamata:  $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}g$ .





4. ábra. Elektron–pozitron hadronokba történő szétsugárzása teljes hatáskeresztmetszetének skálafüggése a perturbációs számítás első három rendjében. A hatáskeresztmetszetet a müonpárba való szétsugárzás hatáskeresztmetszetével normáltuk.

A  $Z^0$  részecske tömegének megfelelő tömegközépponti energián működő LEP-en az elektron és pozitron ütközése során nagy valószínűséggel  $Z^0$  keletkezik. Hamar elbomlik, fermionpár keletkezik belőle, az esetek 60%-ában kvark–antikvark pár. A kvarkok egymáshoz nagyon közel, nagy energiával keletkeznek, és így aszimptotikusan szabadon mozognak – használható a folyamat leírására a perturbatív QCD. Igaz ugyan, hogy az egymástól távolodó kvarkok között egyre nagyobb „szín”-erő hat, és az így felhalmozódó térenergia ahhoz vezet, hogy új részecskék keletkeznek, az észlelő-berendezésekben már nem az eredeti két kvarkot látjuk, hanem részecskék záporát (hadronzáport). A folyamat azonban emlékét őrzi a kezdeti két kvark által szállított lendületnek és perturbációs számítással meg lehet jósolni a két hadronzáport tartalmazó események valószínűségét. Találtak három hadronzáport tartalmazó eseményeket is, amelyeket úgy lehet értelmezni, hogy a kezdeti két kvarkkal együtt egy gluon is keletkezett (3. ábra).

A QCD-ben a perturbatív leírás első bonyodalma éppen a csatolás változása. Ha a végállapotokat nem osztályozzuk a hadronzáporok száma szerint, csupán leszámoljuk a hadronikus végállapotokat, akkor a teljes hadronikus hatáskeresztmetszetet mérhetjük meg. A perturbációs számítással kiszámított teljes hatáskeresztmetszet tükrözi a csatolás változását, a jóslat függ attól, mekkora energián vesszük a csatolást. Igen ám, csak hogy ez az energia nem mérhető, ezért a jóslatunk nem használható jóslat. A nemfizikai paramétertől való függést nevezük renormálási skálafüggésnek. Szerencsére a perturbációs számítás egy másik tulajdonsága segítségünkre siet. Belátható, hogy a perturbációs számítás egyes rendjeiben a  $\mu$  renormálási skálától való függés eggyel mindig magasabb rendű, mint a számítás adott rendje. Például, ha az  $R$  fizikai mennyiséget a perturbáció nagyságát jellemző  $\alpha_s$  csatolás

$m$ -edik rendjében számítjuk ki, akkor a skálafüggés nagyságrendje  $m+1$ -edrendű:

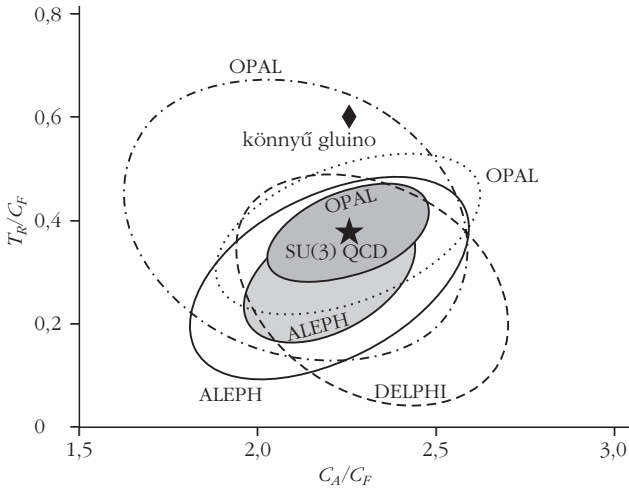
$$\frac{dR}{d\mu^2} = O(\alpha_s^{m+1}).$$

Így minél tovább megyünk a perturbációs sor kiszámításában, annál kisebb a skálafüggés (4. ábra). A QCD-ben tehát elengedhetetlen a sugárzási korrekciók figyelembevétele, ha mennyiségileg értelmes jóslatot akarunk tenni.

A második bonyodalommal a sugárzási korrekciók számításakor találkozunk. A Lagrange-sűrűségből meghatározott szabályok szerint ki lehet számítani a mátrixelemeket, a hatáskeresztmetszet pedig a mátrixelemek négyzetével arányos. Born-közelítésben a teljesen differenciális hatáskeresztmetszetnek a fázistér feletti integrálja véges. A mátrixelem négyzetéhez kétfajta elsőrendű korrekciót találunk. Az egyik esetben egy valódi részecske jelenik meg a végállapotban, a másikban egy virtuális részecskefluktuáció történik (hurokkorrekció). Mindkét járulék önmagában végtelen, azonban az összegük véges, ha infravörös véges fizikai mennyiség hatáskeresztmetszetét jósoljuk. Az infravörös végesség minőségileg azt jelenti, hogy egy feloldatlan, nem megfigyelhető részecske megjelenése a végállapotban nem változtatja meg a mennyiség értékét. Például a hadronzáporok száma attól nem változik, ha az egyik végállapotú részecske egy párhuzamosan tovarepülő részecskepárra bomlik, vagy keletkezik egy lágy (nagyon kicsi energiájú) részecske. Így, ha meghatározott számú hadronzápor keletkezésének hatáskeresztmetszetét számítjuk, akkor a valós és virtuális korrekció összege véges. A véges eredményt azonban nem könnyű megkapni, ugyanis a kétféle járulékot más fázistér felett kell integrálni, ezért az összegzés az integrandus szintjén nem lehetséges.

Ma már az irodalomban léteznek általános eljárások arra, hogyan lehet folyamattól és fizikai mennyiségtől függetlenül a számításokat úgy szervezni, hogy a véges korrekciót megkapjuk, és ismerjük számos alapvető folyamat esetén a QCD sugárzási korrekciót. Ezek egyik szép példája az elektron–pozitron hadronokba történő szétsugárzásában négy hadronzápor keletkezése, amely a QCD LEP-en történő pontos ellenőrzésének lehetőségét nyújtja. A négy hadronzáporos végállapotok ugyanis számszerűleg a csatolás nagyságától, geometriai szerkezetüket tekintve pedig a QCD színtöltéseitől is függenek. A színtöltések a mértékcsoportot meghatározó algebra kvadratikus Casimir-operátorának értékei az alap és adjungált ábrázolásban. (A perdület operátoralgebrája  $SU(2)$ , amelynek kvadratikus Casimirja a perdület négyzete,  $J^2$ . Ennek sajátértéke  $C_F^{(2)} = j(j+1)$ . Alapábrázolásban  $j = 1/2$ , ezért  $C_F^{(2)} = 3/4$ , adjungált ábrázolásban  $C_A^{(2)} = 2$ . A megfelelő értékek QCD-ben ( $SU(3)$ )  $C_F^{(2)} = 4/3$ ,  $C_A^{(2)} = 3$ .) Így a hadronzáporok gyakorisága és térbeli elhelyezkedésének mennyiségi jellemzése alapján a csatolás és a színtöltések egyszerre mérhetőek. Ilyen méréseket a LEP együttmű-



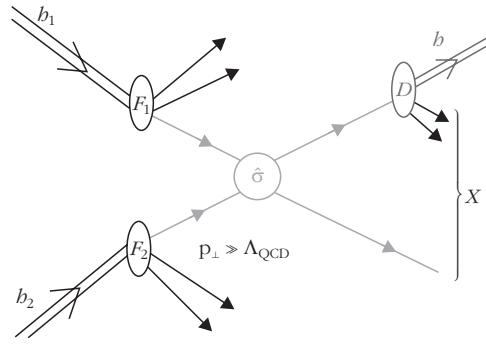


5. ábra. A színtöltések egyidejű mérése a LEP-kísérletekben ( $T_R = 1/2$ ). Az ellipszisek a mérések 68%-os konfidenciaszintjét jelölik.

ködéseiben többször is végeztek. Az eredmények összefoglalását találjuk a 5. ábrán. A mérések nagyon pontosan megerősítik a QCD-értékeket.

A LEP kísérleti eredményeit a Standard Modellel nagy pontossággal lehet leírni. Mégsem mondhatjuk, hogy sikerült a LEP-en a Standard Modellt egyértelműen igazolni. A Standard Modell ugyanis olyan lokális mértékelméletre alapul, amelyet a Lagrange-sűrűségben szereplő, a terek négyzetével arányos tömegtagok sértenének, ezért azok a kiindulási elméletben nem szerepelnek (például a QCD Lagrange-sűrűségében sem). Ugyanakkor tapasztalatból tudjuk, hogy a részecskének van tömegük, amiről az elméletnek számot kell adni. A Standard Modellel ez a Higgs-mechanizmus eredménye, aminek lényege, hogy az *elemi* részecskék egy egyelőre csak feltételezett skálártérrel, a Higgs-térrel való kölcsönhatás eredményeként nyerik tömegüket. (Az összetett részecskék, mint például az anyagot felépítő proton és neutron, tömegének túlnyomó részéért a QCD felelős – egyelőre nem tudjuk milyen módon.) Ha a Higgs-tér létezik, akkor elő lehet állítani elemi gerjesztését, a nulla spinű Higgs-részecskét, ha elegendő energiasűrűséget sikerül előállítani a laboratóriumban. A LEP kísérletei Higgs-részecskét nem találtak (bár „gyanús” eseményekre akadtak).

A jelenleg épülő LHC-gyorsító elsődleges célja a Higgs-részecske laboratóriumi előállítása. Protonok fognak ütközni 14 TeV tömegközépponti energián. Ahogy említettem a protonok összetett részecskék, nagyenergiájú ütközéseik során az elemi kölcsönhatás a bennük található kvarkok és gluonok között játszódik le. Ahhoz, hogy ezeket az eseményeket egyáltalán értelmezni lehessen szintén a QCD-re van szükség. A QCD-ben a nagyenergiájú részecskeütközések leírásának leglényegesebb eszköze a faktorizációs tétel (6. ábra). Eszerint a protonban található partonok közül egy vesz részt az elemi kölcsönhatásban, amelynek hatáskeresztmetszetét a perturbatív QCD szabályai szerint számolhatjuk. A parton a proton (négyes)lendületének egy bizonyos hányadát viszi az ütközésbe, amelyet a partonsűrűség-függvény ad meg. A parton-



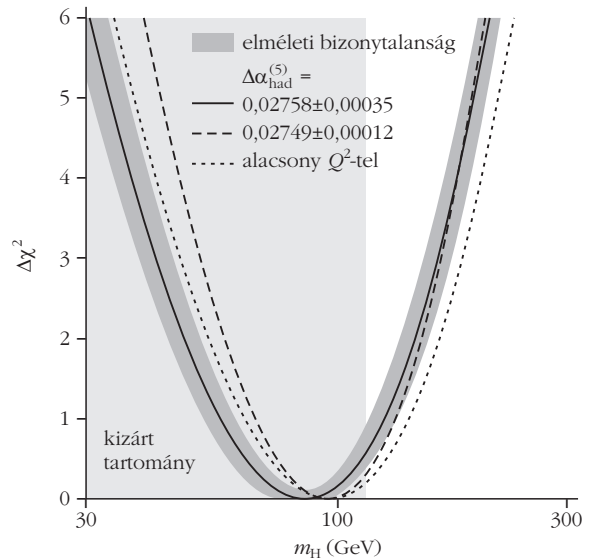
6. ábra. A faktorizációs tétel vázlatos képe. A bejövő  $b_1$  hadron négyeslendületének az  $F_1$  partonsűrűség-függvény által meghatározott hányadát viszi el az egyik és a bejövő  $b_2$  hadron négyeslendületének az  $F_2$  partonsűrűség-függvény által meghatározott hányadát viszi el a másik parton, amelyek a  $\hat{\sigma}$  hatáskeresztmetszetű elemi szórásfolyamatban részt vesznek. Az elemi szórást nagy transzverzális lendület ( $p_{\perp} \gg \Lambda_{\text{QCD}}$ ) jellemzi. A végállapotban keletkező partonok  $b$  hadronokká alakulnak, amit a  $D$  fragmentációs függvény ír le.

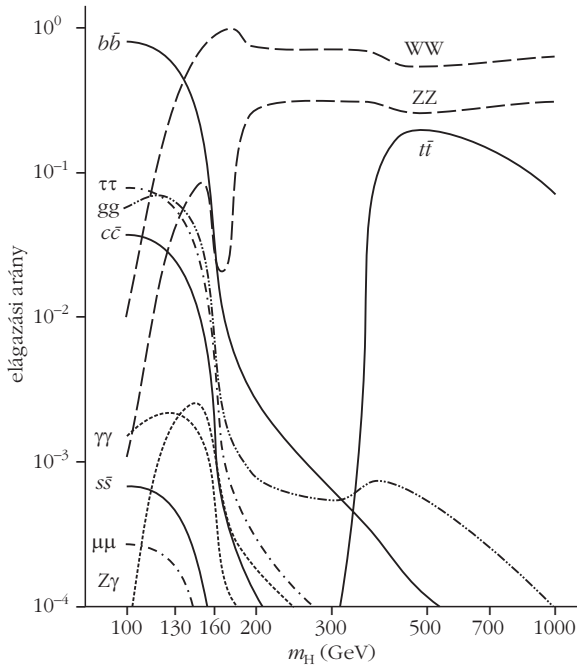
sűrűség-függvény perturbatív módon nem számolható, azonban folyamattól független, ezért egy folyamatban megmérve más folyamatban már használható a fizikai hatáskeresztmetszet kiszámításához. Az egyes szórási kísérletek persze különböző energián történhetnek, ezért szükség van az  $f_i$  partonsűrűség-függvény energiafüggésének ismeretére is, ami azonban perturbatív módon ismét csak megadható  $f_i$  és a  $P_{ij}$  Altarelli–Parisi-függvények konvolúciójaként,

$$\frac{df_i}{d\mu^2} = \frac{\alpha_s}{2\pi} \sum_j f_j \otimes P_{ij}.$$

(Az Altarelli–Parisi-függvények írják le az elemi partonbomlás valószínűségét.) A partonsűrűség-függvény pontos mérése megköveteli, hogy a méréshez használt szórási folyamat elemi hatáskeresztmetszetét pontosan ismerjük, amihez elengedhetetlen a sugárzási korrekciók ismerete az adott folyamathoz.

7. ábra. A LEP mérési eredményeknek a Standard Modell jóslatától való eltéréseinek egy szabadsági fokra eső  $\chi^2$ -e a standard Higgs-részecske tömegének függvényében. A 115 GeV/c<sup>2</sup> alatti tartományt a közvetlen észlelés hiánya alapján kizárták.

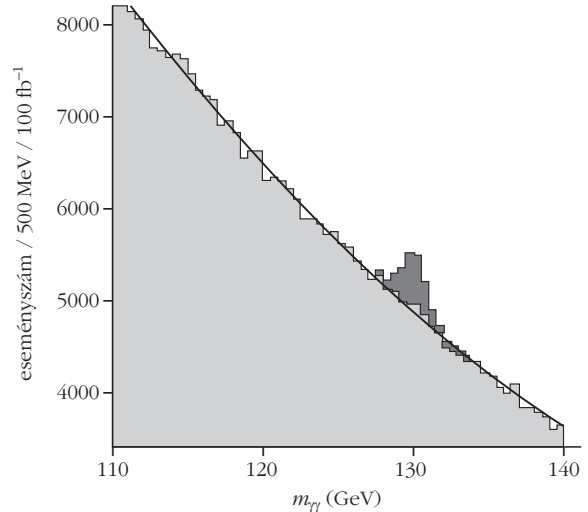




8. ábra. A standard Higgs-részecske elágazási aránya a különböző részecskékre.

A 7. ábra szerint a LEP-kísélet eredményeinek kiértékelése azt mutatja, hogy a Higgs-részecske tömege nagy valószínűséggel 100–200 GeV/c<sup>2</sup> közé esik (amennyiben létezik). Az LHC-n történő ütközésekben ekkora energiájú részecskét könnyedén elő lehet majd állítani. Az észleléshez azonban nem elegendő az előállítás. A Higgs-részecske ugyanis rövid élettartamú, előszeretettel nehéz részecskékre bomlik, adott részecskével való kölcsönhatásának erőssége ugyanis a részecske tömegével arányos (8. ábra). A keletkező egyéb, Standard Modellbeli nehéz részecskék szintén tovább bomlanak elsősorban az erős kölcsönhatás révén, így a végállapotok többsége ugyanúgy sok hadront tartalmaz, mint egy egyszerű QCD-esemény, amelyben nem keletkezett Higgs-részecske, tehát e jel nem válik ki a háttérből. A LEP által legvalószínűbbnek tartott Higgs-tömeg esetén érdekes módon a két fotonba való bomlás vezet olyan végállapothoz, ahol a jel/háttér hányados a legkedvezőbb a felfedezéshez.

A kétfoton spektrumban a Higgs-rezonancia jól látható (9. ábra), felfedezése nem okoz elvi gondot, „csupán” kemény kísérleti munkát igényel. Azonban egyáltalán nem bizonyos, hogy a felfedezett rezonancia a Standard Modell Higgs-részecskéjét jelzi. A standard Higgs esetében a QCD-korrekciók jelentősen befolyásolják a csúcs magasságára vonatkozó elméleti jóslatot. A Higgs-jel kétfotonos csatornája esetén például az első sugárzási korrekció kétszeresére növeli a vezető rendben számolt hozamot, míg az arra következő (második) korrekció további 15%-os növekedést jelent. Ugyanígy az elképzelések a Standard Modellen túli fizikáról, például a szuperszimmetrikus részecskék létezése, nagyban befolyásolhatja a csúcs magasságát. Egy csúcs észlelése tehát önmagában kevés, szükséges a lehetséges elméleti értelmezéseket olyan pontosan megadni, hogy



9. ábra. 130 GeV/c<sup>2</sup> tömegű Higgs-részecske keletkezésének rezonanciája a kétfoton spektrumban.

a mért jellemzők alapján ki lehessen választani azt a modellt, amely összeegyeztethető a méréssel.

A felfedezés első öröme után pedig rögtön jön az új részecske tulajdonságainak meghatározása. Ezek a kísérleti analízisek akkor sikeresek, ha pontosak. A mérések pontos kiértékelése akkor lehetséges, ha minél pontosabban ismerjük

- a keltési hatáskeresztmetszetet és a bomlási arányokat,
- az erős csatolás értékét,
- a partonsűrűség-függvényeket,
- az ütköző partonok luminozitását.

Mindezek a jelenlegi ismereteinknél pontosabb elméleti leírást igényelnek, bizonyos folyamatok esetén nagy szükség lenne a második sugárzási korrekciók ismeretére. Az elmúlt évtizedben jelentős erőfeszítések árán fontos eredmények jelentek meg az irodalomban egy olyan általános eljárás kidolgozása végett, amellyel folyamattól és fizikai mennyiségtől függetlenül a véges másodrendű korrekciót megkapjuk, azonban még további nehéz feladatok várnak megoldásra.

A QCD csodálatos elmélet. Hitünk szerint a fél oldalon leírható Lagrange-függvénye minden lehetséges ismeretet tartalmaz az elemi részek erős kölcsönhatásának fizikájáról. Eddigi tapasztalatunk ezt a hitet megerősíti. A tömör Lagrange-függvény rendkívül gazdag szerkezettel rendelkező elméletet takar. Már több mint 30 éve kutatók százai foglalkoznak az elméletből kibontható, a kísérletekkel összevethető jóslatok kikutatásával, aminek egyik legfontosabb eszköze a perturbatív térelmélet. Leginkább a szobrászathoz tudnánk e tevékenységet hasonlítani. Ahogy egy szép darab márványban a szobrász meglátja a belőle kifaragható, szemet gyönyörködtető szobrot, úgy próbáljuk a QCD Lagrange-függvényében rejlő gyönyörű matematikai összefüggéseket kibontani. A cél azonban nem elsősorban szép képletek gyártása, a „faragás” sikerét nem csupán az esztétikum dönti el. A sugárzási korrekciók számszerű meghatározása az elemi részecskék szórási folyamataiban a kísérletekkel való egyre pontosabb összehasonlítás, tehát az éleslátás elengedhetetlen eszköze.

# MOLEKULANYALÁB-EPITAXIA BERENDEZÉS AZ MTA KFKI RÉSZECSCKE- ÉS MAGFIZIKAI KUTATÓINTÉZETBEN

Tanczikó Ferenc, Major Márton, Nagy Dénes Lajos  
KFKI Részecske- és Magfizikai Kutatóintézet, Budapest

2003 végén állt üzembe és egy kétéves beüzemelési időszak után 2006 eleje óta működik teljes kapacitással Magyarország első molekulanyaláb-epitaxia (Molecular Beam Epitaxy, MBE) rendszere. Az „epitaxia” a vékonyrétegek növekedésének olyan módját jelenti, amelynek során az egyes – általában kémiaiilag egymástól különböző – rétegek kristályrácsai egymásra illeszkednek, ezért egykristályból készült hordozóra – mint berendezésünkben is – egykristályminták növeszthetők. A kísérleti berendezést a KFKI RMKI szervezte be az Oktatási Minisztérium és a Magyar Tudományos Akadémia anyagi, valamint a vékonyrétegek fizikájával, kémiájával és anyagtudományával foglalkozó magyar kutatóhelyek erkölcsi támogatásával. Az MBE-berendezés beszerzésével Magyarországon jelentősen javultak a felület- és vékonyréteg-kutatások kísérleti lehetőségei, hiszen megfelelő szervezéssel számos kutatócsoport „mintaéhségét” elégítheti ki ez a minta-előállító eszköz. Az RMKI MBE-berendezésének specialitása egy  $^{57}\text{Fe}$  forrás, amely lehetővé teszi Mössbauer-vizsgálatokra alkalmas rétegek előállítását. Az egyetemi oktatás szempontjából sem lebecsülendő, hogy az érdeklődő hallgatók egy csúcstechnológias berendezésen tanulmányozhatják az ultranagyvákuum-technika szépségeit és ismerkedhetnek meg a mintakészítés rejtelmeivel. Az MBE-berendezés így módon hatékonyan bővíti a hazai felületfizika és vékonyréteg-kutatás már rendelkezésre álló mintakészítési eszköztárát.

Mielőtt rátérnénk az MBE részletes ismertetésre, pár szót kell szólnunk magáról a felületfizikáról. Különböző környezetekben más és más a fogalom jelentése. Ipari alkalmazásoknál a felületükön módosított anyagok (pl. nagy hőállóságú turbinalapátok, motoralkatrészek) vizsgálatát jelenti, míg a másik véglet szerint a felületfizikai kutatás tárgya a tömbi anyagok néhány nm-es felső tartománya, ahol az atomok elhelyezkedése és az elektronszerkezet lényegesen különbözik a tömbi anyagétól. Az MBE felületértelmezése az alapkutatáshoz áll közelebb, hiszen a megvalósítható mintavastagság a 0,01–1000 nm tartományba esik. Itt nem is mindig magán a felületen, hanem a vékony, ezért a megszokott tömbi anyagokétól eltérő tulajdonságú filmek, szerkezetek előállításán van a hangsúly; helyesebb is ilyenkor felületfizika helyett vékonyréteg-fizikáról beszélni. MBE-berendezéseket a gyakorlatban főleg kutatási részlegeknél találunk; ipari alkalmazásra inkább olcsóbb, ám kevésbé precíz módszereket használnak.

A felületfizika, mint különálló tudományág születése az 1960-as évekre tehető. A terület azóta is tartó terebélyesedése többek között a nagyvákuum-techno-

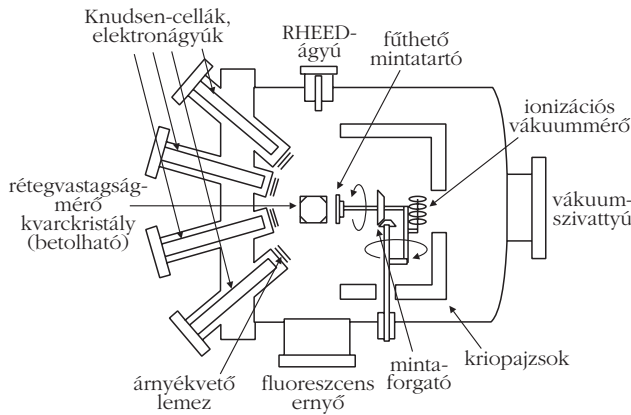
lógia és a számítástechnika fejlődésének, valamint az újabb és újabb kísérleti módszerek megjelenésének köszönhető. Nem véletlen, hogy az ultranagyvákuum (UHV) a felületkutatás leggyakrabban használt környezete. UHV nélkül lehetetlen tiszta felületeket előállítani, illetve a felület állandóságát biztosítani.

## Az MBE-módszer

A molekulanyaláb-epitaxia egy olyan mintanövesztési módszer, amelynek lényege, hogy a hordozóra ultranagyvákuumban párologtatjuk fel az atomokat, illetve a molekulákat. Az ultranagyvákuum biztosítja, hogy csak az általunk kívánt atomok jussanak a hordozóra, és az ne szennyeződjék maradékgáz-molekulákkal. A „molekulanyaláb” jelző a párologtatás módjára utal. Ellentétben a legtöbb módszerrel, ahol nagyobb anyagcsomókat („klasztereket”) visznek fel egy lépésben, az MBE-nél ténylegesen egyedi atomok, molekulák találhatók a forrástól érkező nyálábban. Az UHV teszi azt is lehetővé, hogy a rétegeket lassan és nagy pontossággal növezzük. A „nanotechnológia” kifejezés itt szó szerint értendő, hiszen nem probléma a nanométer alatti pontosság elérése, sőt atomi rétegvastagság alatti átlagos lefedettséget is meg lehet valósítani. Az RMKI MBE-berendezésének specifikáció szerinti növesztési sebességtartománya a 0,001–0,1 nm/s tartományba esik. Az alsó határ meglepően alacsonynak tűnhet, hiszen az atomok méretének 0,1 nm-es nagyságrendjét figyelembe véve ez azt jelenti, hogy a réteg 1–2 perces párologtatás után vastagodik egy atomnyit. Ezt természetesen nem úgy kell érteni, hogy ennél rövidebb párologtatási idő esetén „atomdarabokat” növesztünk, hanem ilyenkor átlagos lefedettségről van szó (pl. a felület 1%-án vannak atomok). A mérőfej felülete néhány  $\text{mm}^2$ , ami atomi méretekben óriási, ezért nem alakul ki azonnal egy teljes atomnyi vastagságú réteg. A későbbiekben látni fogjuk, hogy a növesztés sebessége tetszőlegesen kicsi lehet, a növesztési idő növelésének csak az ultranagyvákuum minősége szab határt.

Az 1. ábrán egy MBE növesztési kamra vázlatos rajza látható. Az MBE berendezéseknek több típusa létezik a bennük előállított minták anyagfajtai szerint. Leggyakrabban a *félvezető MBE*-t használják, ami a félvezetők kutatásában és gyártásában kerül alkalmazásra. Ilyenkor rendkívül fontos a környezet pormenetsége (tisztaszoba) és a belső rendszer tisztasága. Félvezetők adalékolási szintjeinek pontos beállítása lehetetlen egy „fémmegezett” berendezésen. Az RMKI-ban üzembe állított MBE típusa, a *fém MBE*-t





1. ábra. Egy MBE növesztő kamra vázlatos, nem méretarányos rajza; a főbb egységeket és azok szerepét a cikk második felében részletesen bemutatjuk.

általában az alap kutatásban használják, és az – nevének megfelelően – főleg fémes rendszerek növesztésére szolgál. Ebben az esetben a külső tisztaságra vonatkozó feltételek nem olyan szigorúak, és nem okoznak gondot az MBE-kamra falára párologtatott különféle fémrétegek sem. A különbség tehát alapvetően nem az MBE elvében, hanem az alkalmazott környezeti feltételekben van.

## Vákuumkövetelmények

Amint már említettük, a legfontosabb a jó vákuum biztosítása. Erre egyrészt azért van szükség, hogy a forrásból elpárolgó molekulák egyenes vonalban érjék el a hordozót, másrészt, hogy a szennyező atomok lerakódása lassabb legyen, mint a növesztendő atomoké. Nem elhanyagolható szempont, hogy a már elkészült felületek se szennyeződjenek a mérés alatt. Az ideális eset a nulla szennyező lenne, de ezt természetesen lehetetlen elérni. A szabad úthosszra vonatkozó feltétel már a  $10^{-4}$  mbar nyomástartományban teljesül, míg a szennyezőkoncentráció leszorításához tovább kell mennünk. Ha egynek vesszük a felületet érő molekulák megtapadási valószínűségét, akkor jó közelítésben  $10^{-9}$  mbar nyomás esetén nő egy atomi (vagy

molekula) réteg szennyező a minta felületére egy óra alatt. A  $10^{-9}$  mbar-nál jobb vákuumot nevezzük ultranagyvákuumnak. A vákuumtechnikában a mai napig több mértékegység van forgalomban. A legrégebben és ma is gyakran használt a torr (vagy Hgmm, 1 torr = 133 Pa), utána következik a mbar (1 mbar = 100 Pa), és lassan terjed az SI-ben hivatalos Pa.

Egy pillanatra érdemes még elidőzni a vákuumfelvételeknél. Az egyetemes gáztörvényből és a kinetikus gázelméletből kapható az egységnyi síkfelületen áthaladó atomok  $I$  fluxusa (Hertz–Knudsen-formula):

$$I = \frac{p(T)}{\sqrt{2\pi m k_B T}},$$

ahol  $p$  a gáz vagy gőz nyomása,  $m$  az atomok tömege,  $k_B$  a Boltzmann-állandó ( $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K) és  $T$  a gáz abszolút hőmérséklete. Az egységnyi térfogatban lévő atomok  $n$  számát az egyetemes gáztörvényből kapjuk:

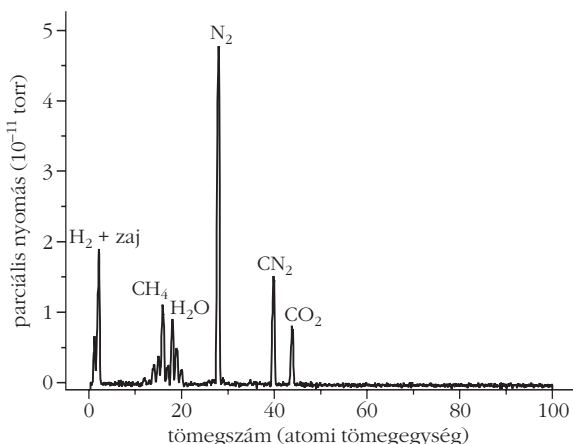
$$n = \frac{p}{k_B T}.$$

Nitrogénmolekulákra, mint a légkör fő alkotójára számolva légköri nyomáson körülbelül  $2 \cdot 10^{19}$  molekula található köbcentiméterenként, és másodpercenként  $3 \cdot 10^{23}$  érkezik belőlük egy négyzetcentiméterre.  $10^{-9}$  torr nyomáson, ami a normál nyomásnál 12 nagyságrenddel alacsonyabb, még mindig körülbelül  $2 \cdot 10^7$  molekulát találunk köbcentiméterenként, azaz még messze nem üres a térfogat. Az UHV-feltételek megteremtése mégis nagy körültekintést igényel, mert nemcsak a légkört kell kizárni, hanem az UHV-edényben lévő szilárd anyagok párologását is minimalizálni kell. Szerencsére a fejlődés a vákuumtechnológia terén is töretlen, például a KFKI RMKI növesztő rendszerének alapvákuuma  $10^{-10}$  mbar nagyságrendű (2. ábra).

Az UHV biztosításához nélkülözhetetlen, hogy csak alacsony gőznyomású és kihevíthető anyagokból építkezzünk. Kamrát rozsdamentes acélból, tömítéseket oxigénmentes rézből, elektromos szigetelőket kerámiából készítenek. Az ablakok anyaga speciális üveg. Az alacsony nyomás eléréséhez kerülni kell a levegő-zsákok, gázcsapdák beépítését is. Olaj sem kerülhet az UHV-térbe, ezért az elővákuum-szivattyúk kenését speciális (UHV-kompatibilis) zsírokkal végzik. Az UHV-környezet tisztán tartása a megfelelő anyagkiválasztáson túl magas szintű munkafegyelmet is követel. A kamrába bekerülő mintákat, alkatrészeket csak egyszer használatos gumikesztyűben szabad megfogni, hogy elkerüljük a rendszer zsírosodását.

Az MBE-berendezés leszívása több lépcsőben történik. A mai modern rendszerekben rotációs szivattyúk és turbomolekuláris („turbó”) szivattyúk csökkentik a nyomást az ionszivattyúk (vagy iongetter-szivattyúk) által elfogadható ( $\sim 10^{-5}$  mbar) szintre. Az ionszivattyúk az esetleges kisegítő szublimációs szivattyúkkal már átfogják a szükséges munkatartományt. A növesztési kamrában az alapvákuumon kívül fontos, hogy mintanövesztéskor a lehető legkevesebb szenny-

2. ábra. Egy tipikus tömegspektrum az alapvákuumról



nyező legyen jelen, illetve, hogy a nem a mintára jutott növesztendő atomok se szennyezzék a következő rétegeket. Ezt egy kriopajzs segítségével érhetjük el, ami nem más, mint egy belső edény, amelyet folyékony nitrogénnel töltünk meg. A bélésnek ütköző molekulák nagy valószínűséggel adszorbeálódnak a hideg felületen, akár egy nagyságrenddel is javítva a vákuumot.

Normál üzemben a rendszert csak a mintaszilipeknél kell megnyitni (légköri nyomásra hozni), azonban időnként javítani kell, illetve új anyagokat kell tölteni a forrásokba. Ekkor fontos, hogy száraz nitrogénnel töltsük fel az UHV-tereket, mert a vízgőz nagyon makacs szennyező. A túl gyakori nyitás azért is hátrányos, mert az ion- és szublimációs szivattyúk élettartama fordítva arányos a nyomással.

## Párolgatói technikák

Az RMKI-ba telepített berendezés fémes MBE, így főleg fémgőzők előállítására a cél. Fém párolgatót a szilárd elem melegítésével lehet. Ez történhet ellenállásfűtéssel; ilyenkor (pl. wolfram esetén) maga a növesztendő anyag is adhatja a fűtőszálát, az azonban többnyire az elpárologtatandó anyagot, illetve az azt tartó csónakot veszi körbe. A párolgató történhet közvetlen elektronbombázással is; ez az elektronnyalós párolgató, vagy elektronágyú. A legtöbb MBE-ben mindkét módszert alkalmazzák. A két eljárás két teljesen különböző párolgató forrás tartozik, melyek függetlenül működnek, de több anyag egyszerre történő párolgatója esetén egyidejűleg is használhatók.

A tégelyből való párolgató egyik legrégebbi formája a Knudsen-cella, elterjedt jelöléssel K-cella. A K-cella az effúziós cellák egy speciális formája. Az eredeti effúziós cella egy, a térfogatához viszonyítva apró lyukkal ellátott edény, amelynek a belsejében található a forrás. A forrás melegítésével kialakul a cellában az adott hőmérsékletre jellemző egyensúlyi gőznyomás, amit elhanyagolható mértékben módosítanak a nyíláson át távozó atomok. A cellából kilépő atomok szögeloszlása  $\cos\varphi$ -vel arányos, ahol  $\varphi$  a nyílás normálisával bezárt szög. Az intenzitás egyenesen arányos továbbá a gőznyomással és a lyuk méretével is. A ma használt cellák alakja általában cső vagy kis nyílásszögű tölcsér. A kilépő nyaláb szögeloszlását a fűtőszálak elhelyezkedése és a forrást tartó tégely alakja határozza meg.

Az elektronágyú esetében a nagyfeszültségű katódról kilépő elektronokat mágneses térrel térítjük el a forrás felszínére. Az elektronbombázás hatására az elpárologtatandó anyag, ami egy réz csészében foglal helyet, megolvad. A csésze része a vízűtéssel ellátott réz tartótömbnek; az állandó hűtés hatására csak a forrás teteje párolog, a többi anyag kibéleli a csészt, ezért a csésze anyaga nem szennyezi a forrást. Az elektronágyú másik előnye a dinamikus állítható növesztési sebesség. Míg az effúziós cellák nagyon

stabilak, de növesztési sebességük lassan változtatható, addig az elektronágyú rendkívül jól szabályozható, viszont a párolgás (olvadás) instabilitásai miatt nehezebb vezérelni. Az effúziós cellának elég egyszer felvenni a cellahőmérséklet-növesztési sebesség görbét, ezzel szemben az elektronágyú állandó szabályozást igényel. Másik hátránya, hogy a párolgás szabad felületről történik, így a horizont fölötti térszében minden irányban ugyanakkora az anyagáram. A számunkra szükséges irányok kiválaszthatóak ugyan az ágyú fölé helyezett hűtött védőpajzson lévő nyílásokkal, azonban az anyag nagy része a védőpajzsról nő rá. Ez a „pazarlás” csak drága anyagoknál jelent gondot. Ugyanakkor az elektronágyú több tégelyt is tartalmazhat egyszerre, melyek válthatók. Ezáltal a vákuumszisztéma megbontása nélkül lehet cserélni a növesztendő anyagot; erre a K-cella esetén nincs mód.

## A növesztési sebesség mérése

A legáltalánosabban használt eszköz a kvarc oszcillátor [1]. Ez a nanoméretűt használja ki, hogy a kvarckristály sajátrezgéseinek elhangolódása arányos a kvarcra növesztett tömeggel. Az RMKI-ban működő MBE-berendezés esetében a 6 MHz-cel rezgő kvarc 0,03 Hz-es frekvenciaváltozása is mérhető, ami 0,375 ng/cm<sup>2</sup> pontosságot tesz lehetővé. Ez megfelel például 1,4 pm (!) alumíniumnak, vagyis a növesztésnek gyakorlatilag nincs alsó sebességhatára. (Az atomméret alatti rétegvastagság ebben az esetben is részleges lefedettséget jelent.)

A főleg maradékgáz-analízisre (2. ábra) használt kvadrupól tömegspektrométer (residual gas analyser: RGA, vagy más néven quadrupole mass spectrometer: QMS) is használható a növekedési ráta mérésére. A tömegspektrométer elektronok segítségével ionizálja a mérőnyíláson áthaladó atomokat, molekulákat, majd tömeg/töltés szerint osztályozza őket. Mivel az egyszerű ionizáció a leggyakoribb, ezért mondhatjuk, hogy az atomok tömegét mérjük. Az egyes atomokra, molekulákra azok ionizációs hajlama szerint érzékeny. A tömegspektrométert nyomás mértékegységben kalibrálják, mivel maradékgáz-analízisnél az összetétel mellett az alkotó gázok parciális nyomása is fontos információt jelent. Az RMKI MBE-berendezésében használt HIDDEN tömegspektrométer alsó mérési határa a 10<sup>-13</sup> mbar nagyságrendbe esik. Az MBE-berendezés egyik első kalibrálása során megmutattuk, hogy például molibdén esetén már 1 pm/s növesztési ráta is kimutatható. Ennél alacsonyabb növesztési sebesség is tisztán látszik a QMS-spektrumon, ami nem meglepő, ha tudjuk, hogy az előző rátához 10<sup>-11</sup> mbar parciális nyomás tartozik.

A sebességmérés utolsó tisztázandó kérdése a mérés helye. Ideális esetben a mintán, illetve annak helyén mérjük a vastagságokat. Az előbb részletezett méréseknél vagy a minta helyén mérünk, de akkor nem tudunk növesztetni, vagy máshol mérünk, de akkor geometriai faktorokat és bizonytalansági ténye-

zőket kell figyelembe vennünk. Utóbbi esetben a mért értékeket a geometriai faktorok figyelembe vételével számoljuk át mintanövekedési sebességgé.

## A növesztési folyamat

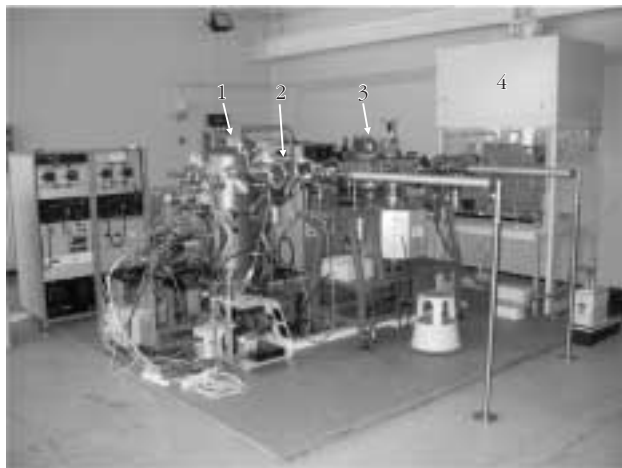
A növesztési környezet készen áll, jöhet a minta, azaz a tiszta felület. A hordozó tisztítása, vagyis a szennyezőmentes felület előállítása történhet kémiai és fizikai tisztítással. A savfürdő, az ultrahangos mosás és a hordozó UHV-ban történő kifűtése mind általánosan használt segédeszközök a tiszta, szennyező- és hibamentes atomi felület előállítása érdekében. Hasítható kristályok esetében az UHV-ban történő hasítás adja a legtisztább, ugyanakkor nem a legsimább felületet. Szintén a vákuumon belül alkalmazható az ionbombázás, amely eltávolítja a szennyezőket, de a hordozó kristályszerkezetét is roncsolhatja. A keletkezett hibák többszörös kifűtéssel helyrehozhatóak.

Maga a növesztési folyamat a forrásból elpárolgó atomok kondenzációja a hordozó felületén. A felületre érkező atomok első lépésben fiziszorbeálódnak, azaz kezdeti kinetikus energiájukat elvesztve már csak a felületen tudnak elmozdulni. Ezt követi a kemisorpció, melynek során a beérkező atom véglegesen kémiai kötésbe lép a felülettel. Az MBE-növesztés atomos (molekuláris) jellege és lassú párologtatási sebessége lehetővé teszi, hogy a felületre érkező és ott megtapadó atomok szabályos kristályszerkezetet alkossanak. Túl nagy sebesség, vagy túl alacsony hőmérséklet esetén ugyanis nincs az atomoknak idejük megkeresni az energiaminimumnak megfelelő pozíciót; ilyenkor amorf réteget kaphatunk. Megfelelően választott elemi cellájú egykristály-hordozó esetén a növekvő réteg illeszkedik a hordozó atomszerkezetéhez; az atomrácsok mintegy „folytatják egymást”. Ilyenkor beszélünk epitaxiális filmről. Az epitaxia több, egymásra párologtatott réteget tartalmazó szerkezeteknél (multirétegeknél) is megvalósítható; ezek a szuperrácsok.

## A KFKI RMKI MBE-berendezése

A 3. ábrán látható a KFKI RMKI MBE berendezése. A rendszert a francia MECA 2000 cég szállította. Specifikációja szerint maximum 2 hüvelykes minták növesztésére alkalmas. Az UHV-berendezés négy, egymástól hermetikusan elzárható egységből és egy hordozható UHV-mintatartóból áll. Az egységek: a mintazsilip, az előkészítő kamra, a növesztő kamra és az őket összekötő cső (3. ábra).

A zsilip pormentességét a köré kiépített lamináris fülke biztosítja. A hordozókat rögzítő 2 hüvelyk átmérőjű molibdéntömböt (mintatartót, „moliblokkot”) egy mágnesesen mozgatható vasút segítségével juttatjuk a mintazsilipből a kamrákat összekötő csőszakaszba. A csövön lévő manipulátorkarokkal lehet a mintatartót az előkészítő és a növesztő kamrába juttatni. Az elő-



3. ábra. A KFKI RMKI MBE-rendszere: növesztő kamra (1), összekötő cső (2), előkészítő kamra (3), lamináris fülke (4)

készítő kamrában fűthetők ki a hordozók maximum 1100 °C-on. Ide csatlakozik a hordozható mintatartó is. A hordozható tartóban egy moliblokk helyezhető UHV-környezetbe és szállítható más mérésekhez. Az akkumulátoros ionszivattyú 36 órán át biztosítja a  $2 \cdot 10^{-9}$  mbar-nál jobb vákuumot.

A vonatra visszahelyezett minták a mágnesekkel a főkamráig húzhatók, ahonnan a mintatartó a merőleges manipulátorkar segítségével a növesztőkamrába helyezhető. A hordozó hőmérséklete itt is szabályozható, éspedig szobahőmérséklettől 900 °C-ig. Legfeljebb 5 percig és mintaforgatás nélkül 1250 °C-ot is el lehet érni. A minta forgatható, ami elősegíti a homogén növesztést. A homogenitás geometriailag is biztosított, hiszen a források körülbelül 40 cm-re vannak a hordozótól. Beépítésre került egy lineárisan mozgatható retesz is, ami megengedi, hogy azonos UHV-körülmények között mintasorozatokat készítsünk egy-egy paraméter (pl. rétegvastagság, rétegsorrend) módosításával, illetve lehetővé teszi „ékes”, vagyis olyan minták előállítását, amelyekben egy-egy réteg vastagsága a minta síkjában egy adott tengely mentén helyről-helyre folyamatosan változik. A források és kvarckristályok előtt pneumatikus reteszek találhatók, a növesztett mintákban így biztosítható a különböző anyagrétegek közötti éles átmenet.

Az MBE-berendezést kezdettől fogva igyekeztünk a legszélesebb körű felhasználásra alkalmassá tenni. Ennek megfelelően két, egyenként négy csészét tartalmazó elektronágyú került beépítésre. A négy effúziós cellával így összesen tizenkét különböző anyag lehet a rendszerben, amiből öt együttesen is növeszthető. Az egyik effúziós cella speciális, kettősfalú, hidegajkú, Al növesztésére, a másik hárommal jelenleg Au, Ag és  $^{57}\text{Fe}$  párologtatható. Az UHV-edényben még egy effúziós forrás és egy gázforrás (pl. oxigénforrás) számára van hely. Jelenleg az egyik elektronágyúban Gd, Si, Cr és Pd, a másikban Mo, Cu, Co és Fe foglal helyet. A rendszeren kívül pillanatnyilag Ti, W, Ni, Nb, Pt, Ge és V áll rendelkezésünkre, de a legtöbb fém elektronágyús növesztése nem okoz problémát. A mintanövesztés specifikált sebességartománya 10–

100 pm/s, kivéve a kis térfogatú Au és  $^{57}\text{Fe}$  cellákat, ahol a források ára miatt kisebb (max. 15 pm/s) rátát írtunk elő.

A növesztési sebességet kvarc oszcillátor és kvadrupól tömegspektrométer méri. Az effúziós cellák sebességét egy, a minták helyére betolható kvarckristály méri, míg az elektronágyúkat két, az ágyúk közelében lévő kvarckristály szabályozza, és a szintén mozgatható kvadrupól tömegspektrométer monitorozza. A tömegspektrométer a két ágyúra merőleges vonalon mozog, és mérőnyílásai úgy vannak beállítva, hogy mindkét ágyút egyszerre lássa.

Megfelelő *in situ* felületi minőségellenőrzés nélkül az MBE-berendezés „vak”. A nagyenergiájú, kisszögű elektrondiffrakciót (Reflection High-Energy Electron Diffraction, RHEED) használjuk a mintanövesztés ellenőrzésére. A 10–50 keV-es elektronok a kis beesési szög miatt csak a minta felső néhány atomi rétegébe jutnak be, és onnan szóródva főleg a legfelső atomrétegről, a felületről adnak információt. Megmutatják a síkbeli kristályszimmetriát, az elemi cella élhosszait és a növesztett réteg minőségét. Segítségükkel különbséget lehet tenni amorf és egykristályszerkezet között, és általuk a felület érdekessége is vizsgálható. Megfelelő vékonyrétegrendszerek esetében a RHEED-intenzitás oszcillációjából meghatározható egy-egy atomsík elkészülte. A RHEED-képet az elektronok foszforeszkáló anyaggal bevont ernyőre vetítik. Az RMKI MBE-berendezésében 12 keV-es STAIB gyártmányú RHEED-ágyú üzemel.

## Az elkészült minták minősítése

Az elkészült minták vizsgálata történhet UHV-ben, illetve *ex situ*, légköri nyomáson. Jelenleg az RMKI MBE-berendezéséből a minták a különféle mérőhelyekre hordozható UHV-kamrában juttathatók el. A hosszútávú tervekben szerepel az MBE-rendszer bővítése is, például CEMS (konverziós elektron Mössbauer-spektroszkópiái) és alagútmikroszkópiái mérőkamrák UHV-illesztésével. Nem minden rendszer és vizsgálat követeli meg a nagyvákuum-feltételeket. Jó minőségű, ámbár nem atomi felbontású atomerőmikroszkóp-felvételek készülhetnek például légköri nyomáson, mágneses vizsgálatok során pedig legtöbbször nem az atomi felület vizsgálata a cél. Az MBE-berendezésben gyártott vékonyrétegek minősítésére rendkívül hasznosak az ionnyaláb-analitika különféle módszerei, például a Rutherford-visszaszórás (Rutherford Backscattering, RBS). RBS-sel megmérhető az elemeloszlás mélységprofilja, így lényegében az egyes rétegfajták, vagy – kedvező esetben – külön-külön az egyes rétegek tényleges vastagsága. A csatornahatással kombinált RBS a minta epitaxiális jellegéről ad felvilágosítást. További fontos minősítési eljárás a röntgenszórás. Nagyszögű röntgendiffrakcióval a minta kristályszerkezetéről nyerhetünk információt. A surólóbeeséses röntgenszórás a felső atomi rétegekre érzékeny, kiválóan alkalmas a multirétegek, mint fil-

mek tulajdonságainak meghatározására. A röntgenreflektometria – az RBS-hez hasonlóan – az elemeloszlás mélységprofiljáról ad (az RBS-től eltérő jellegű) információt; a két módszer igen jól kiegészíti egymást.

## Alkalmazási területek

Az MBE-vel kapcsolatban nemcsak az atomi felületekről beszélhetünk, hanem legalább ugyanilyen súllyal kell szólnunk a vékonyréteg-kutatásról is [2]. A vékonyrétegeknél a tömbi hordozóra párologtatott filmek, szerkezetek legalább olyan érdekesek, mint maguk a felületek. Tömbi formában nem stabil kristályszerkezetek, nemegyensúlyi fázisok, tetszőleges sorrendben növesztett, atomi rétegek tárnak fel újabb és újabb felfedezendő világokat. A háromdimenziós világból legalább az egyik dimenzió tekintetében átlépünk a nanovilágba. Az MBE-módszerrel készült filmek tovább strukturálhatók; például elektronmaratással eljuthatunk a nanohuzalokig, nanopöttyökig, amivel lehetővé válik a kvantummechanika kísérleti tanulmányozása. Az MBE-berendezésben növesztett rétegeknél a fizikai törvények határain belül csak képzeletünk szab határt a növesztett rendszer paramétereinek megválasztásában. Egyesíthetők például előnyös optikai, szerkezeti és mágneses tulajdonságok. Lehetetlen felsorolni az összes MBE adta lehetőséget, azt azonban kijelenthetjük, hogy a nanotechnológia az alapkutatástól a gyártósorokig egyre fontosabb szerepet tölt be az élet minden területén. Kiragadott példaként egy jelenséget és az ahhoz kapcsolódó kutatásainkat említjük.

Az atomi mágnesség jelenségköre régóta foglalkoztatja a kutatókat. A nanotechnológia ebben is tudott újat mutatni. Sikerült például az atomi antiferromágneses rend mintájára mágneses vékonyfilmek rétegeit is egymással antiferromágnesesen csatolni. Az antiferromágneses beállítás külső mágneses térrel megszüntethető, és – mint kiderült – a mágneses állapot megváltozásával együtt jár a minta nagymértékű ellenállás-változása. A jelenséget óriás mágneses ellenállásnak (Giant Magnetoresistance, GMR) keresztelték, megkülönböztetésül a mágnesesen indukált ellenállás-változás korábban ismert fajtáitól. A GMR jelenséget 1989-ben fedezték fel, és azóta eljutott a legkülönbözőbb alkalmazásokig.

Az antiferromágneses beállást Fe/Cr vékonyrétegeknél mutatták ki először, és napjainkban nagyon sok különböző mágnesesen csatolt rendszer és különféle mágneses rendek kutatása zajlik. Viszonylag kevesen foglalkoznak ugyanakkor az antiferromágnesesen erősen csatolt multirétegek doménszerkezetével. Az ok egyszerű: az egymás fölött elhelyezkedő ferromágneses filmek adott helyen lévő mágneses doménjeinek eredő mágnesezettsége az antiferromágneses csatolás következtében zérus. Ahhoz, hogy a doménszerkezetet megismerjük, speciális mérés technikai eljárásokra van szükség. Az antiferromágneses domének fázisátmeneteit sikerült megfigyelniünk szinkro-

ron Mössbauer-reflektometriával [3], MBE-módszerrel növesztett,  $^{57}\text{Fe}$  izotópot tartalmazó Fe/Cr mintával. Kihasználtuk a minta epitaxiális voltát és a kristályszerkezetből adódó mágneses anizotrópiákat.

## Összefoglalás

Az RMKI MBE-berendezésének segítségével Magyarországon is készülhetnek a vékonyréteg-kutatáshoz nélkülözhetetlen, megfelelő minőségű minták. A berendezés fémes rétegek tetszőleges kivitelben való készítésére alkalmas, legfeljebb 2 hüvelykes ( $d = 5,08$  cm) mintaméretig és ésszerű mintavastagságig (legfeljebb  $1 \mu\text{m}$

ig). Csoportunk alkalmazott magfizikai irányultságának megfelelően a készülék egy  $^{57}\text{Fe}$  forrást is tartalmaz, amely lehetővé teszi Mössbauer-érzékeny filmek készítését. A minták UHV-transzportjára hordozható kamra áll rendelkezésre, illetve a védőréteggel ellátott vékonyrétegek levegőn is vizsgálhatóak. Az MBE berendezés a [tancziko@rmki.kfki.hu](mailto:tancziko@rmki.kfki.hu) e-mail címen, vagy a 06-1-392-2222/1280-as telefonszámon történt előzetes időpont-egyeztetés után megtekinthető.

## Irodalom

1. Inzelt György, *Természet Világa* 134/9 (2003) 404
2. Csik Attila, *Fizikai Szemle* 53/6 (2003) 207
3. Nagy Dénes Lajos, *Fizikai Szemle* 47/5-6 (1997) 150

# ÉPÍTŐANYAGOK RADIOAKTÍV SUGÁRZÁSA

Sós Katalin

SZTE Juhász Gyula Pedagógusképző Kar,  
Fizika Tanszék

Napjainkban egyre többet foglalkoznak a környezetvédelem problémáival, ezen belül lakókörnyezetünk állapotával. Így egyre inkább előtérbe kerül a lakóépületekben, illetve a munkahelyeken mérhető radioaktív sugárzás vizsgálata is. Ezt az is indokolja, hogy az embereket érő radioaktív háttérsugárzás igen nagy százalékanak forrása az épített környezet. A mérések szerint világátlagban a háttérsugárzás effektív dózisének 60%-a, magyarországi átlagban pedig 75%-a az épületektől származik. Szintén az épített környezetnek tulajdonítható az a tény is, hogy hazánkban – és a többi mérsékelt égövi országban egyaránt – nagyobb a háttérsugárzás mértéke, mint a lakossággal súlyozott világátlag. Az éghajlat és az életmód miatt ugyanis ezeken a területeken éves átlagban a lakosság idejének 80%-át épületekben tölti. Ennek megfelelően a hidegebb területek országában az effektív dózisének értéke még nagyobb, és az épületek szerepe is jelentősebb.

## Az építőanyagok radioaktivitása

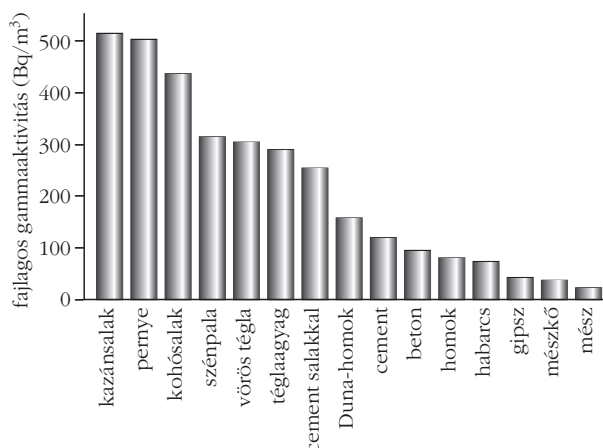
Az épített környezettől származó dózis megadásához ismerni kell a különböző építőanyagok radioaktivitását, amit elsősorban az összetételük, pontosabban az urán-, a tórium- és a káliumtartalmuk határoz meg. (A kálium az elem 0,01%-át alkotó  $^{40}\text{K}$  izotóp miatt jelentős.) Emellett figyelembe kell venni az építőanyag porozitását is, mert főképpen ettől függ, hogy az  $^{238}\text{U}$  bomlásából származó  $^{222}\text{Rn}$  (radon), illetve a tórium bomlásából származó  $^{220}\text{Rn}$  (toron) milyen mértékben képes kidiffundálni az anyagból. Nagy porozitás esetén a radonizotópok könnyen kilépnek az anyagból, radioaktív bomlásuk már a külső közegben játszódik le, így az építőanyag radioaktivitása kisebb, mint amekkora az összetétele alapján várható lenne.

Az építőanyagok radioaktivitására vonatkozó első átfogó vizsgálatot Lengyelországban végezték az 1960-as években, amelynek során építőanyagok összgamma-radioaktivitását határozták meg.

Az adatok szerint legnagyobb fajlagos gammaaktivitással a kazánsalak, a pernye és a kohósalak rendelkezik, ezt követik a különböző téglák, majd a cement, a beton, a gipsz és végül a mész és a mész (1. ábra) [1].

A salak és a pernye magas aktivitása megfelel a várokozásnak, mivel a kőszénben található radioaktív elemek ezekben halmozódnak fel. A téglák viszonylag nagy radioaktivitása összetételükkel magyarázható. A téglagyag 30–60%-ban tartalmaz agyagásványokat, emellett homokot, kalcium-karbonátot és különféle oxidokat. A homok radioaktivitása általában kicsi – kivéve, ha magas cirkon-, monacit- vagy xenotimtartalmú –, a kalcium-karbonát aktivitása szintén alacsony.

1. ábra. Különböző lengyelországi építőanyagok fajlagos gammaaktivitása [1]





1. táblázat						
Építőanyagok radioaktív-tartalma [1]						
építőanyag	származási hely	minták száma	$C_{Th}$ (Bq/kg)	$C_{Ra}$ (Bq/kg)	$C_K$ (Bq/kg)	$I$ (nGy/h)
tégla	Szovjetunió	455	40	35	611	113
	Magyarország	176	48	48	666	136
	Svédország	21	126	96	925	271
beton	Szovjetunió	124	19	28	289	63
	Magyarország	95	11	15	222	40
	Svédország	22	70	56	333	140
cement	Szovjetunió	115	17	31	152	53
	Magyarország	12	19	26	148	51
	Svédország	8	56	56	233	118
homok	Szovjetunió	375	10	8	218	32
	Magyarország	35	17	13	276	48

Az agyagásványok viszont magas urán-, tórium- és káliumtartalommal rendelkeznek. A jelentős urántartalom annak köszönhető, hogy az urán kiválása elsősorban az agyagos területeken játszódik le. Az urán oxidatív körülmények között vízben oldódik, ha azonban redukáló közegbe kerül, vízben nem oldódóvá válik, kicsapódik. Ehhez teremtenek megfelelő körülményeket az agyagásványok, amelyek szemcsefelületére válik ki az urán. A kőzetekre vonatkozó vizsgálatok többsége azt mutatja, hogy a 20  $\mu\text{m}$ -nél kisebb átlagos szemcseméretű kőzetek radioaktivitása magas, miután fajlagos felületük is nagy, és a radioaktív elemek általában a szemcsefelületeken találhatók meg.

A cement, és ebből adódóan a beton alacsony radioaktivitást mutat. A cement alapanyaga ugyanis a portlandcement, ehhez 75–80%-ban mészkőből és 20–25%-ban agyagból álló örlémenyt készítenek, amit 1400 °C-on kiégetnek. Az égetés hatására az agyagásványok elvesztik hidrátvizüket, égetett mész és szilikát képződik, majd zsugorodás lép fel, és kialakulnak az úgynevezett klinkerásványok. Az így nyert portlandklinkerhez gipszkövet és hidraulikus pótlékokat keverve kapják a cementet. A mészkő és a gipsz csak kevés radioaktív anyagot tartalmaz, ezért a cement és a beton csak kis mértékben sugároz. Jelentősebb radioaktív sugárzás akkor tapasztalható, ha a betonba magas aktivitású adalékanyagot kevernek,

mint például a stabilitási és be-dolgozási paraméterek javítására erőművi pernyét.

1977–1979 között több országban is vizsgálták az építőanyagok átlagos  $^{232}\text{Th}$ -,  $^{226}\text{Ra}$ -,  $^{40}\text{K}$ -koncentrációját ( $C_{Th}$ ,  $C_{Ra}$ ,  $C_K$ ), és a számított gammaintenzitást ( $I$ ) (1. táblázat). A téglára, betonra, cementre vonatkozó adatokat összehasonlítva szembevetendő, hogy a svédországi eredmények többszörösei Magyarországon, vagy a Szovjetunióban kapott értékeknek. Ez elsősorban annak tulajdonítható, hogy az alapanyagként szolgáló, ottani gránitos talajok-

nak igen nagy a radioaktív-tartalma. Az adatok itt is egyértelműen azt mutatják, hogy a téglá radioaktivitása nagyobb, mint a betoné vagy a homoké.

## A magyarországi helyzet

Magyarországon Tóth Árpád és munkatársai végeztek igen átfogó mérésorozatot az építőanyagok radioaktivitására vonatkozóan. A leggyakrabban alkalmazott anyagokat, a betont és a téglát vizsgálták úgynevezett homogén mintacsoportokkal, azaz adott időben vettek egyszerre több helyről mintát. Vizsgálták a minták  $^{232}\text{Th}$ -,  $^{226}\text{Ra}$ - és  $^{40}\text{K}$ -tartalmát, a kész építőanyag radonemanálási tényezőjét ( $K_{Rn}$ ) és az effektív  $^{226}\text{Ra}$ -koncentrációt, ami a rádiumkoncentráció és a radonemanálási tényező szorzata. A radonemanálási tényező a pórusok közötti radontartalom és a teljes radontartalom hányadosa, vagyis azt mutatja meg, hogy a szemcséből milyen könnyen tud kilépni a radon a szemcsék közötti pórusokba. A mérés során igyekeztek a meghatározó külső paraméterek hatását kiküszöbölni például oly módon, hogy a radonemanációt két eltérő légnyomáson vizsgálták, majd ezek átlagát tekintették a tényleges emanációs értéknek. A mintavételezés reprezentatívnek tekinthető, hiszen olyan építőanyaggyárakat választottak, amelyek akkor a hazai termelés 2/3-át biztosították. 28 építőanyaggyárból kapták a mintákat egy éven keresztül (2. táblázat) [1].

2. táblázat					
Hazai beton- és téglaminták radioaktívanyag-tartalma [1]					
építőanyag	minták száma	paraméter	min. érték	max. érték	átlag
beton	91	$C_{Th}$ (Bq/kg)	7,4	22,2	11,1
	95	$C_{Ra}$ (Bq/kg)	7,4	22,2	14,8
	87	$C_K$ (Bq/kg)	148	296	222
	94	$K_{Rn}$ (%)	15	60	30
	116	$C_{Ra, eff.}$ (Bq/kg)	2,6	4,8	3,7
tégla	176	$C_{Th}$ (Bq/kg)	33,3	66,6	48,1
	158	$C_{Ra}$ (Bq/kg)	29,6	81,4	48,1
	176	$C_K$ (Bq/kg)	444	925	666
	165	$K_{Rn}$ (%)	1	8	4
	182	$C_{Ra, eff.}$ (Bq/kg)	1,1	4,4	1,8

## A lakószobák radioaktív modellje

Az adatok nem csak magát az építőanyagot jellemzik radioaktivitás szempontjából. Különböző modellek felhasználásával ezek segítségével meghatározható a lakószoba gammadózis-teljesítményének várható értéke.

Tóth Árpád modelljében 2,7 m sugarú gömbnek tekintette a helyiséget, 0,223 m vastagságú gömbhéjnak feltételezve a szoba falazatát. A fal anyaga a vizsgált faltípusnak megfelelő. Halmazsűrűség, abszorpciós tényezők, fotonenergiák, radonemanációs tényezők és egyéb adatok felhasználásával adta meg a gömb, vagyis a lakószoba középpontjában várható gamma-

3. táblázat

**Építőanyagok <sup>222</sup>Rn-ra vonatkozó diffúziós tulajdonságai**

anyag	halmoz- sűrűség (kg/dm <sup>3</sup> )	porozitás (%)	diffúzió- állandó (m <sup>2</sup> /s)	diffúzió- hossz (cm)
cement	1,46	33,90	$7,96 \cdot 10^{-7}$	61,6
talaj	1,32	40,10	$1,40 \cdot 10^{-6}$	81,8
márvány	1,32	48,06	$2,61 \cdot 10^{-6}$	111,4
homok	1,60	50,10	$3,69 \cdot 10^{-6}$	132,5
mész	0,49	60,11	$5,69 \cdot 10^{-6}$	164,6

4. táblázat

**Anyagok izotóptartalma és radonfluxusa**

anyag	fajlagos aktivitás (Bq/kg)		radonfluxus (mBq/m <sup>2</sup> s)	
	<sup>226</sup> Ra	<sup>232</sup> Th	<sup>222</sup> Rn	<sup>220</sup> Rn
mészkö	10	10	0,14–0,48	16–94
tégla	50	15	0,01–0,21	5–40
salakkő	75	20	0,13–0,62	19–66
beton	50	10	0,05–0,75	10–107
gázbeton	20	15	0,12–0,68	8–44
gránit	55	75	0,08–0,62	17–68

dózis-teljesítményt. A modellszámítás meghatározza a dóziskonverziós tényezőket is, amelyek megadják az egységnyi izotópkoncentrációra vonatkozó gamma-dózis-teljesítményt. A dóziskonverzió <sup>226</sup>Ra-ra 5,4, <sup>232</sup>Th-ra 8,64 és <sup>40</sup>K-ra 0,648 (μGy/év)/(Bq/kg). Ezek, valamint a C koncentrációk (Bq/kg) és a radon-, illetve toronemanációs tényező ( $K_{Rn}$  és  $K_{Th}$ ) felhasználásával a szoba középpontjában várható  $D_i$  gammadózis-teljesítmény értéke (μGy/év)-ben:

$$D_i = 5,4(1 - K_{Rn}) C_{Rn} + 8,64(1 - K_{Th}) C_{Th} + 0,648 C_{40K}$$

Tóth Árpád mérési eredményei alapján a betonfalazatú szobákban 0,24 mGy/év dózisteljesítmény várható, míg a vegyes falazatú – 41%-ban téglát, 59%-ban betont tartalmazó – lakásokban 0,575 mGy/év. A modellszámítás helyességét igazolja, hogy a vegyes falazatú szobákban végzett mérések 0,618 mGy/év dózisteljesítményt adtak, ami igen jó egyezést mutat a számított eredménnyel [1].

A Nukleáris Energia Ügynökség (Nuclear Energy Agency – a fejlett országokat tömörítő OECD szakmai szervezete) 1979-es közlése szerint a külső sugárterhelés kiszámításánál figyelembe kell venni az épületekben, illetve az épületek környékén eltöltött időt is. Ezek alapján a panelházak esetén nagyobb gammadózis-teljesítmény adódik, mint a magánházaknál, mivel az itt lakókat nagyobb mennyiségű építőanyag veszi körül, és több időt töltenek az épületen belül [1].

Az UNSCEAR (az ENSZ Atomsugárzások Hatásaival Foglalkozó Tudományos Bizottsága) a lakóterek dózisteljesítményét a szabadterén mért dózisteljesítmény alapján határozta meg, felhasználva a lakásban és a szabadban mért dózisteljesítmény arányát, mint átszámítási tényezőt. Ez a számítási mód tehát figyelembe veszi az épületnek a külső, főleg a teresztrikus sugárzásra vonatkozó árnyékoló hatását is. A mérések azt mutatják, hogy az 50 g/cm<sup>2</sup> felületi sűrűségű falazat teljesen elnyeli a külső sugárzást, míg 10 g/cm<sup>2</sup> felületi sűrűség esetén az abszorpció 50%-os. 1,6 g/cm<sup>3</sup> átlagos építőanyag-sűrűséget véve ez azt jelenti, hogy a 30 cm vastagságú fal teljesen, míg a 6 cm vastagságú félig árnyékolja le a külső sugárzást. A teresztrikus sugárzást leginkább a faházak és a könnyűszerkezetes házak esetében kell figyelembe venni. Ezt igazolják azok az Amerikában végzett mérések, amelyeknél azt

tapasztalták, hogy amikor nem kell számolni a falazat sugárzásával, a bent mérhető dózisteljesítmény még a földszinten is kisebb, mint a szabadban mérhető, és emeletenként fokozatosan csökken. Az UNSCEAR számításainál feltételezték, hogy világátlagban az épületek 20%-a fából készült – ezekre 0,7 az átszámítási tényező, 80%-a pedig masszív falazatú – 1,3-es tényezővel. A súlyozott átszámítási tényező így 1,18, azaz átlagosan 18%-kal nagyobb terhelés ér bennünket a lakásokban, mint a szabadban. Az UNSCEAR 1977-es jelentése szerint a lakosság létszámával súlyozott világátlag a teresztrikus eredetű sugárzás dóziszintenzitására vonatkozóan 43 nGy/h, így a lakásokban várható dózisteljesítmény világátlagja 50,7 nGy/h [1].

Külön vizsgálatokat végeztek arra vonatkozóan, hogy az épületek egyes elemei – a falazat, a padló és a mennyezet – mekkora gammadózis-terhelést okoznak az ott lakók számára. A modellszámítások szerint egy átlagos, betonból készült épület esetén a szerkezeti elemek együttesen 0,25 mSv dózisterhelést okoznak egy év alatt. Ha a mennyezet sugárzása elhanyagolható, a padló és a falak együttes évi dózisa 0,10 mSv. Ha csak a padló sugárzását kell figyelembe venni, például beton alappozatú faház esetén, a dózisterhelés nem éri el a háttér sugárzás mértékét. Ezek az adatok azt mutatják, hogy a szerkezeti elemek szerepe nem azonos az épületekből származó sugárterhelésben: betonépületek esetén például a padló kismértékű sugárterhelést okoz, míg a mennyezet hatása viszonylag nagy.

## Az építőanyagok radonkibocsátása

Az épített környezettől származó radioaktív sugárterhelésben legfontosabb szerepet az építőanyagoktól származó radon játssza, ennek van a legnagyobb biológiai hatása. Az építőanyagok radondiffúziójára vonatkozó mérések egyértelműen azt mutatták, hogy nagyobb porozitás, azaz kisebb tömörség esetén a diffúzióállandó, és így a diffúzióhossz is nagyobb (3. táblázat).

Vizsgálatokat végeztek a különböző építőanyagok <sup>226</sup>Ra- és <sup>232</sup>Th-tartalmára, valamint <sup>222</sup>Rn- és <sup>220</sup>Rn-fluxusára (egységnyi felületen, egységnyi idő alatt kibocsátott radon aktivitása) vonatkozóan is (4. táblázat).

Építőanyagok radioaktivitásának jellemzői magyar építőanyagokra						5. táblázat
minta	aktivitáskonzentrációk (Bq/kg)				aktivitáskonzentráció-index	emanációs koefficiens (%)
	<sup>232</sup> Th-sor	<sup>226</sup> Ra-sor	<sup>238</sup> U-sor	<sup>40</sup> K		
tégla	44,5±5,4	47,6±10,5	42,0±8,9	706±119	0,61±0,08	6,3±2,9
cserép	47,1±13,2	46,3±11,5	40,4±10,3	714±186	0,63±0,16	4,3±1,4

A táblázatok adataiból látható, hogy, habár a gázbeton rádiumtartalma kisebb, mint a tégláé, mégis, a nagyobb diffúzióállandó miatt, a gázbeton radonfluxusa nagyobb. Mindegyik építőanyagnál az tapasztalható, hogy a toronfluxus körülbelül két nagyságrenddel nagyobb, mint a radonfluxus, a toron nagy bomlási állandója miatt.

Mérések szerint az égetetlen téglá radonfluxusa négyeszerese, toronfluxusa hatszorosa a kiégetett téglá fluxusához képest, ami igazolja a porozitás, és – ezen keresztül – a kiégetés hatását a radonkibocsátásra.

Az építőanyagok radonexhalációját nagymértékben meghatározza a nedvességtartalom is. Ezt bizonyítják azok a vizsgálatok, amelyek során betonminták radonkibocsátásának időbeli változását vizsgálták. 250 nap alatt hétszer végezték el a minták radonexhalációs rátájának (egységnyi tömegű anyag által egységnyi idő alatt kibocsátott radonatomok száma) mérését teljesen azonos módon és azonos körülmények között. Az eredmények azt mutatták, hogy míg az első száz nap alatt 15%-kal, a második száz nap alatt már csak 3%-kal csökkent a radonexhalációs ráta nagysága, ami a beton víztartalmának csökkenésével magyarázható, de figyelembe kell venni a beton öregedését, szerkezeti változását is.

Az építőanyagok radonexhalációs tulajdonságainak ismerete azért jelentős, mert többek között ez határozza meg a lakóterekben mérhető radonszintet. Az építőanyagok jellemzőin túl az épületek alatti talaj levegőjének radontartalma is fontos tényező – ami első

6. táblázat		
Építőanyagok összgamma-sugárzása		
termék	dózteljesítmény (nGy/h)	
	átlag	szórás
homok	39,0	1,0
sóder	34,7	1,1
válaszfaltégla	96,7	1,4
kisméretű téglá	86,5	4,1
béléstest-tégla	105,6	4,6
pillértégla	85,4	2,6
beton díszburkolat	36,9	2,5
porotherm téglá	84,7	2,9
pórusbeton falazóelem	44,7	0,6
beton díszburkolat	36,9	2,5

sorban a talaj urántartalmának és permeabilitásának a függvénye –, de ezen kívül figyelembe kell venni például a természetföldrajzi jellemzőket, a településtípust, a lakók életmódját [2]. Emellett a légnyomás-, a csapadék- és a hőmérsékletviszonyok is meghatározzák a radon áramlási módját, és ezáltal a lakások radonszintjét [3].

## Hazai mérési eredmények

2003-ban az OKK OSSKI-ban (Országos Sugárbiológiai és Sugáregészségügyi Kutató Intézet) téglá- és cserépminták gamma-spektrometriás és emanációs vizsgálatát végezték el, valamint meghatározták az úgynevezett aktivitáskonzentráció-indexet. Az aktivitáskonzentráció-index ( $I_a$ ) a rádium-, a tórium- és káliumkoncentráció segítségével adja meg az építőanyag radioaktivitását:

$$I_a = \frac{C_{Ra}}{300 \text{ Bq/kg}} + \frac{C_{Th}}{200 \text{ Bq/kg}} + \frac{C_K}{100 \text{ Bq/kg}}$$

Az EU ajánlása szerint a téglák és egyéb nagyobb mennyiségben alkalmazott építőanyagok esetén az index maximális megengedhető értéke 1, míg a kisebb mennyiségben alkalmazott anyagok esetén 6.

A különböző országokban mért aktivitáskonzentrációk téglá esetében a következők: <sup>226</sup>Ra-ra 32,0–79,8 Bq/kg, <sup>232</sup>Th-ra 18,0–61,6 Bq/kg, <sup>40</sup>K-ra 353–986 Bq/kg. A hazai értékek közel megegyeznek a nemzetközi mérési eredményekkel. Az aktivitáskonzentráció-index mind a téglánál, mind a cserépnél kisebb, mint a megengedett érték. Ez a vizsgálat tehát azt mutatja, hogy hazai építőanyagaink radioaktivitás szempontjából megfelelnek a nemzetközi előírásoknak (5. táblázat) [4].

2004 őszén hordozható szcintillációs detektorral mi magunk is elvégeztük különböző építőanyagok összgamma-sugárzásának mérését. Az ömlesztett anyagok (homok, sóder) esetén minimum 0,5 m vastag réteget, míg a darabos termékeknél (tégla, falazóelem, díszburkolat) egy raklapnyi mennyiséget, azaz 1–1,5 m vastag réteget vizsgáltunk. Mindegyik mérésnél az anyagvastagság nagyobb volt, mint a telítési rétegvastagság. A mért dózteljesítményeket a 6. táblázat foglalja össze.

A mérések egyértelműen igazolták, hogy az építési anyagok közül a homok, a sóder és a beton sugárzási értéke a legalacsonyabb. A különféle téglák dózteljesítménye nagy agyagtartalmuknak miatt viszonylag magas: a tömör tégláké, az üreges szerkezetű falazóelemeké, a Porotherm tégláé és a béléstest-tégláké egyaránt. Megfigyelhető volt, hogy egy adott építőanyaggyárban, egy időben készülő különböző típusú

téglák sugárzása közel azonos, ennek oka a közel azonos minőségű alapanyag. A különböző időben érkező szállítmányoknál azonban még azonos építőanyaggyárak esetén is mutatkoztak eltérések. A mért radioaktivitást ugyanis meghatározza a porozitás is, ami elsősorban a kiégetés mértékétől függ. A téglá égetése körülbelül 1000 °C-on történik, ennek során porozitása felére csökken, további égetés további jelentős porozitáscsökkenést okoz. Ugyanazon téglagyár mintái tehát csak akkor adnak teljesen megegyező dózisteljesítményt, ha a teljesen azonos összetétel mellett ugyanolyan az égetés mértéke is.

Pórusbetonnak vagy gázbetonnak régen a pernyét vagy egyéb kohó- és kazánszármazékot tartalmazó könnyűbetont nevezték, amelyekben a pernye és a salak, mint kis porozitású adalékanyag biztosította a jobb szigeteléshez szükséges „levegőtartalmat”. Az MSZ EN 771-4 magyar szabvány alapján ma a homok alapanyagú termékeket nevezik pórusbetonnak. A szabványos meghatározás szerint a pórusbeton hidraulikus kötőanyagból – például cementből és/vagy mészből –, továbbá finom szerkezetű, kovasavtartalmú anyagokból, pórusképző adalékokból és vízből áll. A legtöbb pórusbeton alapanyaga őrlött égetett mész, kis mennyiségű őrlött gipsz, cement, őrlött kvarchomok és víz. Ezeket az anyagokat megfelelő arányban összekeverik, pórusképzőként alumíniumpasztát kevernek hozzá, amely a mésszel reakcióba lépve hidrogént fejleszt. Ez biztosítja a zárt, apró légzárványokat. A pórusbeton radioaktívanyag-tartalma összetételéből adódóan kicsi, mint azt a mérési eredmények is igazolják. A nagy porozitás nem változtatja meg jelentősen a mérhető radioaktivitást, ugyanis ezek a pórusok zártak, így az anyag permeabilitása kicsi.

Amikor az épített környezetünk radioaktivitásáról beszélünk nem elegendő az építőanyagok összetételét és szerkezetét vizsgálni, hiszen a beépítés módja, valamint az alkalmazott burkolóanyag jelentősen módosítja a falazaton, a padlón mérhető sugárzást. Meghatározó többek között a fal vastagsága: a főfalak mindig nagyobb radioaktivitást mutatnak, mint az ugyanolyan szerkezetű mellékfalak. A klinkerburkolat radonszige-

telő hatású, így ilyen külső burkolatú falak belső felületén magasabb összgamma-sugárzás mérhető. Szintén növeli a falakon, a padlón mérhető radioaktivitást a mázas kőburkolat és a csempe, kis porozitása és az ebből adódó radonszigetelő hatása miatt.

Az épületektől származó radioaktív dózis jelentős szerepet játszik a radioaktív háttérsugárzás alakulásában. Több országban – köztük hazánkban is – figyelembe veszik ezt a ténytet, és kutatásokat végeznek az építőanyagok radioaktivitására vonatkozóan, illetve vizsgálják a lakószobák légterében mérhető gamma-dózis-teljesítményt, valamint a radonszintet. A hazai radonszint-vizsgálatok közül kiemelkedő *Tóth Eszter* és munkatársainak tevékenysége, akik diákok segítségével eddig már több ezer lakóépület éves átlagos radonszintjét mérték meg [5].

Több nemzetközi ajánlás is létezik, amelyekkel igyekeznek korlátozni az épített környezettől származó radioaktív terhelés nagyságát. Hazánkban az építőanyagok, épületek radioaktivitására vonatkozóan egyelőre még nincs törvényi szabályozás. Az építőanyagok minőségére vonatkozó kiegészítő követelmények között azonban szerepel, hogy azok radioaktívanyag-tartalma nem haladhatja meg a 112. sz. Sugárvédelmi EU Irányelvben szereplő értékeket. Az irányelv a földkéreg átlagos radioaktivitását tekinti határértéknek, amely a <sup>226</sup>Ra- és a <sup>232</sup>Th-izotópra 40 Bq/kg, a <sup>40</sup>K-izotópra 400 Bq/kg. Ezen kívül már léteznek különböző ajánlások, amelyek betartásával elérhető, hogy olyan alapanyagokat és olyan technológiákat alkalmazzunk az építkezések vagy a felújítások során, amelyekkel az épületeinktől származó dózisterhelés alacsony szinten tartható.

#### Irodalom

1. Tóth Á., *A lakosság természetes sugárterhelése*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1983.
2. Tóth E., Radon a magyar falvakban. *Fizika Szemle* 49/2 (1999) 44
3. Tóth E., Selmeczi D., Papp G., Szalai S., Lakótéri radon hosszútávú változásai. *Fizikai Szemle* 48/1 (1998) 12
4. *KÖZINFO. A Fodor József Országos Közegészségügyi Központ Információs Lapja* 2004/14
5. Hámori K., Tóth E., Köteles Gy., Pál L., A magyarországi lakások radonszintje (1994–2004). *Egészségtudomány* 2004/4.

## AZ EÖTVÖS TÁRSULAT TISZTÚJÍTÓ KÜLDÖTTKÖZGYŰLÉSE, 2007

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat 2007. május 19-én, szombaton 10.00 órai kezdettel tartja Tisztújító Küldöttközgyűlését az Eötvös Egyetem Fizikai épület (Budapest, XI. Pázmány Péter sétány 1/A) 083. előadótermében.

A hagyományokhoz híven, a napirend előtt tudományos előadást hallgathatnak meg az érdeklődők, szervezése folyamatban van.

A Tisztújító Küldöttközgyűlés nyilvános, azon bárki részt vehet, a Társulat bármely tagja felszólalhat, de a szavazásban csak a területi és szakcsoportok által megválasztott és küldöttigazolvánnyal rendelkező küldöttek vehetnek részt.

Amennyiben a Küldöttközgyűlés a meghirdetett időpontban nem határozatképes, akkor munkáját 10.30-kor, vagy a napirend előtti előadás után kezdi meg. Az ily módon megismételt Küldöttközgyűlés a megjelent küldöttek számára való tekintet nélkül határozatképes, de a meghirdetett tárgysorozat nem módosítható.

Az Elnökség a Tisztújító Küldöttközgyűlésnek a következő tárgysorozatot javasolja:

- Elnöki megnyitó
- A Szavazatszámláló bizottság felkérése
- Főtitkári beszámoló
  - A Társulat 2006. évi közhasznúsági jelentése
  - A Társulat 2007. évi költségvetése
- A Felügyelő Bizottság jelentése
- Vita és szavazás a napirend előző két pontjával kapcsolatban
- A Jelölőbizottság előterjesztése az Elnökség és a Felügyelő Bizottság megválasztására
- Javaslat tiszteleti tag megválasztására
- Vita és választás
- A Társulat díjainak kiosztása
- Zárszó

# A NAPRENDSZER ÉGITESTJEINEK FEJLŐDÉSE

## A kisbolygók

Bérczi Szaniszló

ELTE TTK Fizikai Intézet, Anyagfizikai Tanszék

Az anyag fejlődéstörténetét mozaikdarabjaiból illesztjük össze. A fizika elsősorban a forró Univerzumtól a galaxisokon és csillagokon átívelő szakaszt, valamint a velük párhuzamosan zajló atommagképződést kutatja. A Naprendszer anyagfejlődését az elmúlt évszázadban a meteoritok, később a holdközetek és marsi eredetű meteoritok vizsgálata, valamint a bolygótestek űrszondás kutatásai vitték a figyelem középpontjába. De a bolygók megismerése a Földtest felszínének és anyagának kutatásával kezdődött. A földtan a felszínen található anyagi rendszereket, a kőzettesteket vizsgálta, rendszerezte, eredetüket és egymáshoz való viszonyukat megállapította és rendszerbe foglalta. A születő földtudomány az élővilág kutatóiban jó szövetségesre lelt, és a földtan és a biológia szövetségében született meg a földtan egyik fontos történeti ága, a biosztratiográfia. A földtan fossziliárisorozatokat rekonstruált az egymásra települt rétegekben, és távoli kőzettesteket is össze tudott egyetlen nagy kőzettestté kapcsolni (korreláció a földtanban). A biológia anyagfejlődés-történeti epizódokra tett szert a fokozatosan változó fossziliákban, és rekonstruálni tudta a biológiai evolúció szakaszait (relatív sorrendekkel). A történeti képet pontosítani lehetett egy újabb szövetséges tudományág, a fizika bevonásával. A radioaktivitás volt az a jelenségkör, amely a fizikát a földtan szövetségesévé tette. Az atomok magjára is lehetett alkalmazni azt az elvet, a zárványok bezárásának elvét, amelyet már a biológiai alkalmazásnál is fölhasználtak: „Egy kőzettest, amely be van zárva egy másik kőzettestbe (úgy, hogy az teljesen beágyazza, körbefogja a bezárt testet), mindig egykorú, vagy idősebb a bezárt kőzettestnél.” A zárvány a radioaktív sugárzás esetén a sokféle sugárzó atommag, ezek sokasága – a lebomlási sorok –, amelyek szintén benne maradnak a kőzetekben. A lebomlási sorok megismerése abszolút kor meghatározássá fejlődött, miközben a forró Univerzum modelljét is megalkották a 20. század ötvenes éveiben.

A Naprendszer űrszondákkal végzett kutatása a Föld és a Hold vizsgálatával indult. A Hold anyagainak földtérképezésére ismét a földtan módszereit alkalmazták, és megalkották a Hold rétegtanát (*Shoemaker, Wilhelms, Hackman*, U. S. Geological Survey). Kőzettesteket azonosítottak, melyeket nagy holdi események hoztak létre. Ebben a munkában nem lehetett segítségükre fosszília, ezért az egymást át nem fedő rétegek relatív sorrendjének meghatározására (a korrelációra) a kőzettest felszínén megfigyelhető krátereket kezdték ugyanolyan „fosszília” szerepkörben alkalmazni, mint korábban a biológiai, majd azt követően a radioaktív elemekkel tették. A megszületett kráterstatisztika segítségével ma már a Naprendszer távoli égitestjein azonosított kőzettestek korát is meg tudjuk határozni.

Nem idézhetjük föl a módszerek sokaságát, melyekkel a Föld korát és belső szerkezetét, a felszínkö-

zeli nagy kéreglemezek dinamikáját rekonstruálták. Ez a munka napjainkban is zajlik. De a földtudomány naprendszer-tudománnyá történt kibontakozása (geonómia, *Szádeczky-Kardoss Elemér*) azért is szép és példaértékű, mert vizsgálati stratégiákat is átörökített. Egyik ilyen tudományfilozófiai program (paradigma) az égi és a földi jelenségek összekapcsolásának elve. Korábban a naptár, a geometria égi és földi alkalmazása, a mozgástörvény fölismerése, a színképelemzés is ilyen programok voltak. A Naprendszer kutatása megfiatalította ezt a programot. A földtudomány stratégiai szerkezetében benne van ez a kettős hierarchiaszintű vizsgálat. A földtudományban a testünk mérete alatti és fölötti anyagszerveződési szinteket egyszerűen kutatjuk. Föltérképezzük a kőzettesteket, majd mintát veszünk belőlük és kőzettani, mikroszkópi, s ma már számos más módszerrel is vizsgáljuk az anyagok állapotváltozásait, valamint összevetjük a kőzettestek vizsgálatából levont következtetésekkel. Így járt el a földtan a Föld felszínén és a felszín közelében található kőzettestek vizsgálata során és járhatunk el más égitestek esetén is.

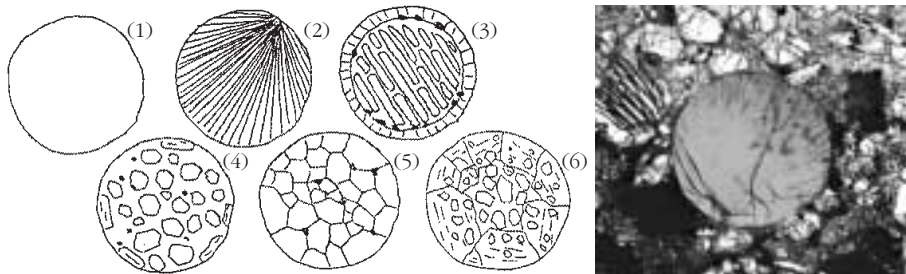
A Naprendszer bolygói és holdjai esetében jobbára csak az egyik hierarchiaszint vizsgálata vált lehetővé: a felszíni rétegek azonosítására nyílt mód a fényképfelvételeken. Ma az űrkutatás egyik nagy kihívása az, hogy egyre szélesebb körben tegye lehetővé a másik fontos vizsgálati szint, a kőzetminták vizsgálatát is. A Hold esetében ez részben már megvalósult. Más égitestek csoportjairól a természeti jelenségek egy másik köréből kaptunk segítséget. Ez pedig a földre hullott meteoritok anyaga.

## Meteoritok a kis égitestekről: a kisbolygók fejlődéstörténete

A meteoritok többsége kicsiny égitestek letörött darabja. Kozmikus események, becsapódások szakították ki őket az anyaégitestből és a naprendszerbeli pályáikon mozogva hosszabb idő után csapódtak a Földre. A szülő égitest néhányszor 10 km-től néhány 100 km-ig terjedő átmérőjű kisbolygó lehetett. A meteoritok töredékként is magukban hordozzák a szülő égitest fejlődéstörténetét. Amikor tehát a meteoritokat tanulmányozzuk, kicsiny égitestek anyagátalakulásait követjük nyomon.

A meteoritokat ma három nagy anyag típusba sorolva csoportosítják: kő-, kő-vas- és vasmeteoritokként. Ezek közül a kőmeteoritok két alcsoportra oszlanak: kondritokra és akondritokra. Az akondritokban már nincsenek kondriumok. Hogy hogyan lesznek kondritokból akondritok, izgalmas anyagfejlődés-történeti kérdés és ez a meteoritika tudományának egyik fő területe. Mi is most e kondritos meteoritok átalakulásait tanulmányozzuk, dióhéjban.





1. ábra. A kondrum szemcsék szövete többféle lehet, ahogyan ezt a mikroszkópban a vékonycsiszolatokon megfigyelhetjük (bal oldali rajz). Egy üveges kriptokristályos kondrum a szövetben (jobbra).

A kondritok tízedmilliméterestől a centiméteres méretig terjedő nagyságú kicsiny gömböket, görögül kondrumokat (magokat) tartalmazó meteoritok, ezekről kapták nevüket. A kondritok a hullott meteoritok körében 85 százalékot tesznek ki. Közöttük az igen ősinek tartott szenes kondritok csak néhány százaléknyi csoportot alkotnak, mert könnyen málló, elmoszolódó anyagúak, s hulláskor többségük széttöredezik apró darabokra. Ilyen a Magyarországon hullott híres kabai meteorit is, amely azonban szép alakú, a légkörön való áthaladás nyomait – olvadéksugarakkal lesimított, sugarasan-kúposan mintázott, ablatált – felületén is magán viselő darab.

A meteoritok több hőtörténeti szakasz átalakulásait hordozzák anyagukban, szövetükben. Mostani vizsgálatainkban két szakaszt fogunk megkülönböztetni. Egy első fölmelegedési (és lehülési) szakaszt, amely a Naprendszer kialakulásakor zajlott le. Ekkor fejlődtek ki a Nap körüli ásványi anyagok, s alkottak öveket csökkenő hőmérsékletük szerinti elrendeződésben. Megkülönböztetjük ettől azt a második fölmelegedési szakaszt, amely már a kis égítést belsejében zajlott le. Ez a szakasz két részre osztható. A korábbi a kis égítést fölmelegedésének az a szakasza, amikor az emelkedő hőmérséklet hatására az égítést ásványi anyagai átkristályosodnak. (Ennek egyik speciális esete, amikor az átkristályosodás víz hatására történik.) Későbbi a kis égítést további fölmelegedésének az a szakasza, amikor az emelkedő hőmérséklet hatására megolvadások következnek be, és a kis égítést öves szerkezetűvé differenciálódik. Mindegyik szakasz vizsgálatához először a kondritok szövetével kell megismerkednünk.

### A kondritok szövete

A kondritok szövete, első közelítésben, két fő összetevőből áll: kondrumokból és mátrixból. Majd tárgyaink kisebb mennyiségben jelen lévő összetevőket is, mint például a „fehér zárványokat” (CAI), melyek a spinellhez hasonlóan nagy olvadáspontú ásványokból állnak, vagy a kondrumokat körülvevő peremeket.

A kondritos szövet sok esetben ellentmondásos szerkezetű. Míg a mátrix finomszemcsés, alacsony hőmérsékleten keletkezett ásványokból áll, addig a kondrumok is és a CAI-k is magas olvadáspontú anyagok. Az a tény, hogy a kétféle keletkezési hőmérsékletű ásványi összetevők együtt vannak, nem „egyenlítődték ki” kémiai szempontból, azt jelzi, hogy az az égítést vagy

égítészóna, amelyből a szenes kondrit meteoritanyaga leszállt, sohasem melegeedett fel eléggé (szenes kondritok, 3-as szövettípusúnak osztályozott kondritok). Ha fölmelegeedett volna, a kondritos anyag „át-sült” volna, s kémiaiilag harmonizálódott volna a kondrumok és a mátrix szövetének ásványos anyaga. Ez nem történt meg, meteoritunk tehát

ősi, különféle eredetű anyagokból összetapadt kőzet. Ez az ősi anyag a Naprendszer születése körüli idők anyagait hordozza. Gyakoriságuk és ősiségük (4,5 milliárd évesek) alapján a kondritos meteoritokat tekintik a Naprendszer ősi kőzetanyagának.

### A kondritok ásványtani osztályozása: a kondrittípusok

A kőmeteoritok ásványai leginkább a magmás kőzetek ásványaival rokoníthatók, a kondritokéi pedig a földi köpenyt alkotó ásványokkal: olivinnel és alacsony Ca-tartalmú piroxénekkal. E két fő ásványi összetevő alapján készült a századelőn a Rose–Prior-, majd a kémiai összetételi mérésekkel kiegészített Urey–Craig- és a Wiik–Mason-osztályozás. Ezek alapján a 60-as években már öt nagy kondritcsoportot különítettek el: az enstatit kondritokat (E), az olivin-bronzit (H), az olivin-hipersztén (L), az amfoterit (LL) és az olivin-pigeonit (C-III, ilyen a híres kabai meteorit is, 1. ábra) kondritokat, valamint a szenes kondritokat (C), melyek később a zárójelben álló betűjeles rövidítést kapták. (Az enstatit, a bronzit, a hipersztén és a pigeonit piroxénváltozatok, melyek különböző arányban tartalmaznak Mg- és Fe-komponenst, a pigeonit pedig az előbbieknél több Ca-ot is tartalmaz.) A szenes kondritokat Wiik a C-I, C-II és a C-III szenes kondrit csoportokba sorolta, csökkenő illőelem-tartalmuk alapján. A kondritok (egyes szenes kondritok kivételével) mindig tartalmaznak fémek összetevőt, Fe–Ni-ötvetetet és vasszulfidot (FeS) is. A kondritos meteoritok ásványai azok, amelyeket kémiai modellekkel le tudtak vezetni a 70-es években a Nap körül kialakult, majd lehült szoláris ködből.

### A kondritos ásványi anyagok keletkezése az öves Naprendszer kialakulása során

Az anyag fejlődéstörténetéről formálódó összképben döntő jelentőségű a meteoritok vizsgálata. A szilárd felszínű égítetekre simán leszállt űrszondák mérései előtt kizárólag a meteoritok tanulmányozásával gyűjtött közzétani ismereteink voltak más égítetek anyagáról. A meteoritok anyagvizsgálata tárta föl, hogy a meteoritok ásványai, szöveti alkotóelemei, ezek ásványai a Naprendszer születésének idejéből származnak. A csillagászati modellekkel összhangban ma elfogadott az a nézet, hogy a csillaggá összehúzódó

1. táblázat		
Legfontosabb ásványok sorozata a Lewis–Barshay-féle modell szerint		
hőmérséklet (K)	kémiai elemek, reakciók	ásványok
1600	CaO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , ritkaföldfém-oxidok	oxidok
1300	Fe, Ni fémötvözet	Fe-Ni fém
1200	MgO + SiO <sub>2</sub> → MgSiO <sub>3</sub>	ensztatit
1000	alkáli-oxidok + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + SiO <sub>2</sub>	földpát
1200–490	Fe + O → FeO, FeO + MgSiO <sub>3</sub>	olivin
680	H <sub>2</sub> S + Fe → FeS	troilit
550	Ca-ásványok + H <sub>2</sub> O	tremolit
425	olivin + H <sub>2</sub> O	szerpentin
175	H <sub>2</sub> O jég kristályosodik	vízjég
150	gáz NH <sub>3</sub> + jég H <sub>2</sub> O = NH <sub>3</sub> H <sub>2</sub> O	ammónia-hidrát
120	gáz CH <sub>4</sub> + jég H <sub>2</sub> O = CH <sub>4</sub> 7H <sub>2</sub> O	metán-hidrát
65	metán, argon kristályosodik	metánjég, argonjég

kozmosz por- és gázköd fölmelegedett, központi forró tartományai létrehozták a Napot, a körülötte keringő ködből pedig anyagcsomók váltak ki, azok megformálták a Naprendszer ásványait, melyek ütközésekkel nagyobb égitestekké halmozódtak. Ezek alapján a meteoritok anyagvizsgálata során kérdezhetjük meg, hogy e folyamatnak milyen megfogható lépései maradtak fenn. A meteoritok tehát fontos láncszemek akkor, amikor az anyag fejlődéstörténeti képét egyre részletesebben meg akarjuk ismerni.

A Nap körüli por- és gázköd anyagát kétféle erő csomósította, halmozta nagyobb testekké. Az egyik erő, mely elektromágneses és kvantumos hatások együttese, ásványszemcséket hozott létre. Apró szemcsékben kristályok váltak ki, melyek az ütközések során összetapadtak, s egyre nagyobb anyaghalmozattá álltak össze. A másik erő, a gravitáció, fokozatosan jutott szervező szerephez a bolygók fölhalmozódása és megformálása során. A kilométeres nagyságú égitestek, a planetezimálok, ütközéseikkel egyre nagyobb méretű égitestekké tömörültek, me-

2. táblázat		
A Naphoz közeli, forró tartományokban kiváló ásványok sorozata		
hőmérséklet (K)	kémiai elemek	ásványok
1785	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	korund
1647	CaO TiO <sub>2</sub>	perovszkit
1625	2MgO Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> SiO <sub>2</sub>	melilit (gehlenit)
1513	MgO Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	spinell
1471	Fe Ni	vasnikkel
1450	CaO MgO 2SiO <sub>2</sub>	diopszid
1444	2MgO SiO <sub>2</sub>	forszterit
1362	CaO Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 2SiO <sub>2</sub>	anortit
1349	MgO SiO <sub>2</sub>	ensztatit

lyek egymás pályáit egyre nagyobb mértékben befolyásolták.

A Naprendszer a Napot körülvevő anyagokból és égitestekből áll. Mind-egyik égitest és anyaga is a korai Napot körülvevő por- és gázködből alakult ki. E por- és gázköd tömege mintegy századrésze a Nap tömegének, de a Naprendszer forgó mozgását ezek a Napon kívüli anyagok hordozzák keringő mozgásukban. A Nap körüli köd a Nap fölmelegedésével együtt fölforrósodott, s később lehűlt. A Naptól való távolsággal együtt változott a köd hőmérséklete, ezzel a kristályos anyagok összetétele. A legfontosabb ásványok sorozatát az 1. táblázat mutatja be a Lewis–Barshay-féle modell szerint. A kondritos meteoritok főleg ebből az ásványsorból épülnek föl.

A Naphoz közeli, forró tartományokban kiváló ásványok sorozatát *Grossman*

és *Larimer* határozta meg. Ezek jelentőségét az adja, hogy a kondritos meteoritok, kis mennyiségben, ennek a forró övnek az ásványait is tartalmazzák (2. táblázat).

Mindkét ásványsorozat tagjai közvetlenül meg is figyelhetők a meteoritokban. A Lewis–Barshay-modell – ahogy már említettük – a kondritokban, a *Grossman–Larimer*-sorozat pedig a kalcium-alumínium-oxid zárványokban (CAI). Ezekről szólunk most részletesebben.

### A kalcium-alumínium-oxid zárványok (CAI)

A belső Naprendszer ásványait a tűzálló kerámiák anyagaiént ismerjük (pl. a korund). A tűzálló ásványok kicsiny halmazokban gyűltek össze és rétegesen kristályosodtak egymás után. A kondritos meteoritokba beépülten találjuk őket, s ezeket a főleg kalciumból (Ca) és alumíniumból (Al) fölépülő világos színű ásványegyütteseket CAI-knak nevezték el a meteoritkutatásban (CAI = Ca-Al-Inclusions = Ca-Al-zárványok).

Egy CAI réteges fölépülését folyamatosan növekedő kristályos anyagcsíráként képzelhetjük el. Először korund (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) és perovszkit (CaTiO<sub>3</sub>) válik ki, majd sorra melilit (Mg<sub>2</sub>Al<sub>2</sub>SiO<sub>7</sub>), spinell (MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>), majd diopszid (CaMgSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>), végül anortit (CaAl<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>8</sub>) rétegek következnek. CAI-ásványok (fehér zárványok) összetételét először *Sztrókay Kálmán* magyar kutató mérte meg a kabai meteoritban. Röntgendiffrakciós méréseiben *Sztrókay* a fehér zárványokat spinell összetételűnek találta.

### A kondrumok kialakulása

A fő közetalkotó szilikátok alkották a belső bolygók övében kiváló ásványok nagy részét. Ezek olvadáscseppeket alkottak egykor, mert a korai Nap kitörései egyes tartományokban úgy fölforrósították a por- és gázködot, hogy az addig már kialakult és összetapadt kristályok megolvadtak, majd lehűltek. A tizedmilli-

méteres–milliméteres nagyságú gömböcskékre (a kondrumokra) fokozatosan tapadt rá a körülöttük található por is. A kondrumok és a maradék poranyag összetapadással és ütközésekkel egyre nagyobb égitestekké halmozódott. A mai kondritos meteoritok azokból a kisebb méretű kondritos égitestekből származnak, amelyek nem melegek föl a Naprendszer elmúlt 4 és fél milliárd éve alatt.

A megolvadt cseppek kihűltek, kikristályosodtak. E kondrumok, mint a Nap körüli porfelhő szemcséi beépültek az apró szemcsés alapanyagú kondritos meteoritokba. A kondrumok többféle szövetűek lehetnek, ahogyan ezt a mikroszkópban a vékonycsiszolatokon megfigyelhetjük (1. ábra). A kőzetanban használt nevükön adjuk meg a hat fő típust. Lehetnek belső szöveti mintázatot nem, vagy alig mutató üveges vagy kriptokristályosak (1), sugarasak (angolul excentro-radiálisak) (2), lemezesek (angolul barred) (3), porfirosak (4), granulárisak vagy szemcsések (5) és poikilites piroxén kondrumok (6). E kondrumok gyorsabban-lassabban lehűlt szilikátolvadék-cseppekből keletkeztek. Az olvadékok összetétele is fokozatosan változott helyről helyre a Naprendszerben. Mind a hatféle kondrum előfordul a különféle kondrittípusokban, de különböző arányban vannak bennük. A kondrittípusokat ásványtani és kémiai tulajdonságaik alapján osztályozták.

A kondrumok megőrizték a Nap körüli gázködben lezajlott eseményeket a környezetükben található anyagok ásványos és kémiai összetételében is. A kondrumok egy része, miután megszilárdult, még különféle változásokon esett át addig, amíg a kondritos kisbolygók anyagává vált. A kondrumok körül különféle peremeket találunk. Ezek részben még a Nap körüli por- és gázködben lezajlott események tanúi, más peremek viszont már a kis égitesten lezajlott (pl. vizes) átalakulás termékei. Egyes kondrumoknak aprószemcsés kristályok alkotta porpereme van, ami arra utal, hogy megszilárdulása után a kondrum még hosszú ideig sodródott a Nap körüli por- és gázködben, míg hozzá nem tapadt egy halmozódó anyagcsoporthoz. Egyes kondrumokat éppolyan magmás szövetű perem vesz körül, mint maga a szilikát-csepp anyaga. Ezek úgy jöhettek létre, hogy a már megszilárdult kondrum felületére gyűlt port újabb napkitörés megolvasztotta. Egyes kondrumok a külső részeiken vagy a peremükön tartalmazzák a fémes vasnikkelcseppeket. Ez arra utal, hogy a kondrumok forogtak, ezért a nagyobb sűrűségű összetevők fokozatosan a kondrum felületére sodródtak.

### A meteoritok anyaga a kisbolygókból származik

A kisbolygók reflexiós színképének a meteoritok színképével történt összehasonlításával már az 1970-es évekre átfogó kép alakult ki a csillagászatban arról, hogy a meteoritok forráshelye a kisbolygók öve. A 80-as évekre már a kisbolygóövön belül is zónákat tudtak elkülöníteni, amelyekre más és más uralkodó kisbolygószínkép-típus volt jellemző (*Gradie, Tedesco*). A kisbolygóöv külső peremén a szenes kondritok a

gyakoriak. S bár ma még nem rendelkezünk kőzettani módszerekkel elemezhető mérési anyaggal a külső Naprendszer jegeket is tartalmazó ősi anyagegyütteseiről, ezeknek a színképében már előfordulnak a vízjégre jellemző elnyelési vonalak. Ugyancsak a reflexiós színképek elemzésével mutatták ki azt is, hogy a külső Naprendszer fő ásványi anyaga a vízjég. Az óriásbolygók holdjai, a Szaturnusz gyűrűjének anyaga és az üstökösök anyaga a legismertebb vízjég-azonosítások a külső Naprendszerben.

## A kondritos összetételű kis égitest fejlődéstörténete

A kis égitest fölmelegedésének első szakasza: átkristályosodás (metamorfózis)

Amikor az égitestté összeállt anyaghalmazok fejlődéstörténetét kutatjuk, akkor a meteoritokat egy másik szempontrendszer szerint kell megvizsgálunk. Az égitestben eltöltött idő nyomait keressük meg bennük. Fokozatosan bontakozott ki az az eseménytörténeti szakaszolás, melynek nyomán a Naprendszerben töltött időszakot és a kis égitestben eltöltött időszakot jól el lehetett határolni.

A Hold 1960-as években megindult kutatása föllendítette a meteoritikat is, így 1967-re összegződött a kondritos fejlődés vizsgálatának eredménye is. *Van Schmus* és *Wood* a kondritokat szövetük és kémiai változásaik alapján átalakulási sorozatba rendezte el. A kondritos összetételű kicsi égitest lassú fölmelegedésének hatására az égitest anyaga fokozatosan átrendeződik, és ez az átrendeződés figyelhető meg a kondritok szövetén. A lassú átmelegedés szilárd fázisú diffúziót eredményez, és ennek számos hatása van a szövetre. Fokozatosan elhalványodnak az éles peremű kondrumok, kémiai kiegyenlítődések történnek az ásványok összetételében, redox-folyamatok változtatják a fémvas/oxidált vas arányt, a szövet fokozatosan átkristályosodik. (Mindezek a lépések jól tanulmányozhatók a NIPR antarktisi meteoritgyűjtemény vékonycsiszolat-készletén.)

1953-ban tette közzé *Urey* és *Craig* az akkor ismert 90 kondrit kémiai összetételén végzett analízisét. Ebből az összefoglaló munkából az a diagram vált fontos anyagtérképpé, amely a vasvegyületek mennyiségét ábrázolja. A szerzőkről *Urey–Craig*-diagramnak (UCD) elnevezett koordináta-rendszerben a függőleges tengelyre a fémvas és szulfidvas mennyiségét, a vízszintes tengelyre pedig az oxidált vas mennyiségét mérték föl. A diagramra föl vitt pontok két tartományra különültek el. Ezeket a szerzők H (nagy) és L (kicsi) vastartalmú tartománynak nevezték el.

Három évvel később *Wiik* finn geokémikus tette közzé vizsgálatának eredményét. Ő 30 kondritos meteorit összetételének nagyon pontos meghatározása alapján (több mérést maga végzett el) azt találta, hogy a H-k és az L-ek két egyenesre esnek az UCD-n. A H-k 27, az L-ek 21 súlyszázalékos összvastartalmat képviseltek. E kondritos meteoritok egy jelentős része azonban

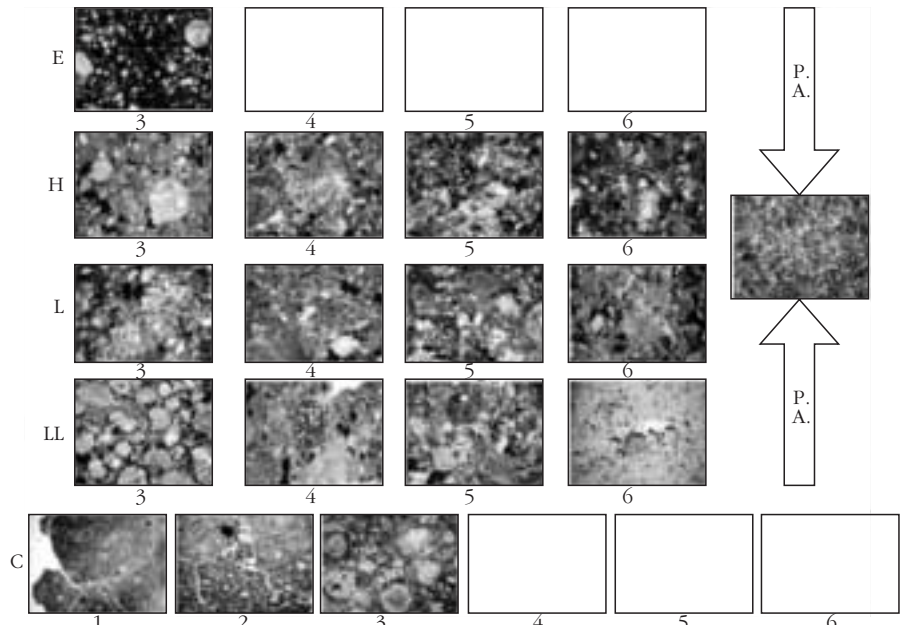
nagy széntartalmú, úgynevezett szenes kondrit volt. Wiik nem sorolta be őket a H csoportba, hanem leválasztotta őket, és a C jelű szenes kondritokat 3 rész-csoportba különítette el az illóelem-tartalom szerint. Később *Friderickson* és *Keil* az L csoporttól elkülönítette a kissé alacsonyabb öszsvastartalmú LL csoportot, és külön definiálták az E (enzstatitos piroxénű) csoportot is. Így alakult ki a kondritok ötös csoportbeosztása.

A fölmelegedés hatására lezajlott szöveti átalakulások mindegyik kondritcsoportban megfigyelhetők. Ezért az összetétel (kezdeti feltétel) szerinti osztályozás (E, H, L, LL, C csoportok) mellett a hőtörténeti fejlődési fokozatokat jelentenek (2. ábra).

A melegedés hatására történő lassú átkristályosodás (metamorfózis) során a kondritos szövet fokozatosan elmosódott körvonalúvá válnak, majd teljesen szétfoszlanak a diffúzió hatására. Ugyancsak a hőmérséklet emelkedésével fokozódó diffúzió hatására kémiai kiegyenlítődés történik az egyes ásványok kémiai összetételében, elsősorban a mátrix és az ásványok között. A leginkább tanulmányozott folyamat az olivinék és a piroxének Fe- és Mg-tartalmában történő kiegyenlítődés. A van Schmus és Wood által definiált szövettani típusok sorozatának végén a még kondritos kémiai összetételű, de a kondrumokat már nem mutató, szemcsés szövet áll.

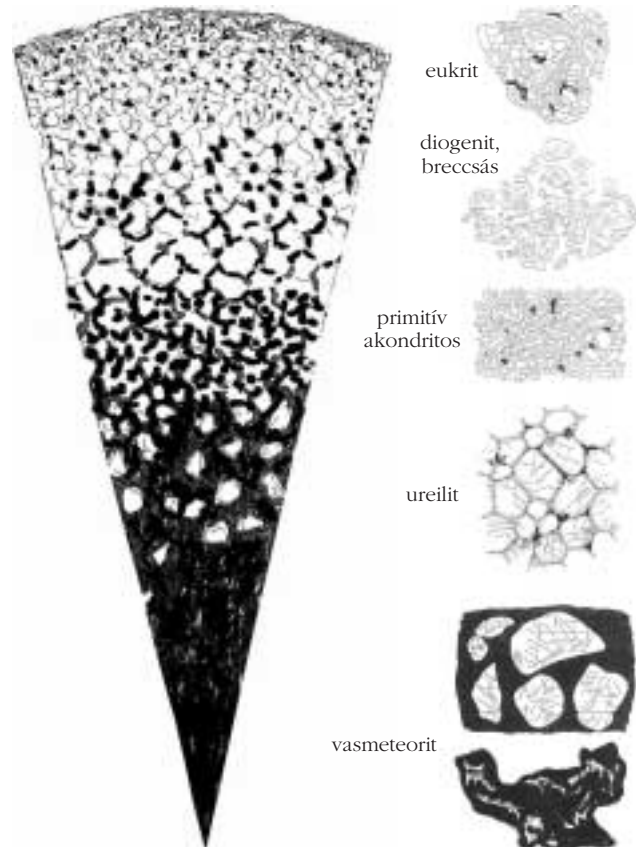
A további fölmelegedés már parciális olvadási folyamatokat indít el. Az idők során egyre több olyan – viszonylag ritka – meteoritot találtak és tanulmányoztak, amely ugyan még kondritos összetételű, de már teljesen elveszítette kondrumos szövetét. Ezeket primitív akondritoknak nevezték el. Ma ezeket tekinthetjük a kondrumos meteoritokkal indult hőtörténeti fejlődés második szakaszában a kiindulási állomásnak. (Ilyen meteoritok az acapulcoitok, lodranitok, melyekben kis mértékben a vas megolvadását és bazaltos komponens parciális megolvadását is megfigyelték.)

A primitív akondritok a kondritos égítést fölmelegedésének utolsó szakaszát képviselik. Egy differenciálódás előtti, még kondritos összetételű állapotot rögzítenek. Ezekből olvadnak ki a legalacsonyabb olvadáspontú összetevők: a vas és a bazalt (3. ábra).



2. ábra. A Van Schmus–Wood-sorozatok táblázata. A minták a NIPR antarktiszi meteoritok kőzetgyűjtemény vékonycsiszolatai alapján készült. Az E, H, L, LL, C csoportok valószínűleg különböző kezdeti feltételekkel indult égíteteket jelölnek, a számok a Van Schmus–Wood-féle petrológiai osztályok, amelyek fölmelegedési fokozatokat jelölnek.

3. ábra. A kondrumok szétbomlásáig, a szövet átkristályosodásáig eljutott kondritos anyag (primitív akondrit) differenciálódni kezd. A vas- és a vasszulfid-összetevők a kis égítést mélyebb rétegei felé (pallazitok, vasmeteoritok), a nátriumban és kalciumban gazdag összetevők bazaltos parciális olvadéka a kis égítést felszíne felé (bazaltos akondritok) vándorolnak. A visszamaradó ásványtársulások a földi felsőköpenyt alkotó peridotitokhoz hasonlóak (ureilitok, lodranitok). Ezeket a meteoritokat égítetszövetre rendezve mutatjuk be.



A kondritos összetételű kis égitest fölmelegedésének második szakasza: parciális megolvadások, anyagátrendeződések (differenciáció)

A kis égitest köpenye: ureilit és lodranit. Leegyszerűsítve a primitív akondritokban meginduló kiolvadási folyamatokat, két fő anyag távozik el belőle: a vas és vasszulfid „lefelé”, a kis égitest belsőbb övei felé, és a bazaltos magma „fölfelé”, a kis égitest felszínére is kiömölve. Ennek eredményeként a primitív akondritos összetételű kőzetből egy kiürült, de még mindig sok kondritos vonást őrző akondrit típus marad meg maradékanyagként, amely a kis égitest köpenyét alkothatja. Két fontos akondrit (kondritos szövet nélküli) meteoritcsoportot találtak eddig: ezek az ureilitek és a lodranitok.

Az ureilitek különleges akondritok. Ősi bélyegeket és átalakulási meg átkristályosodási jegyeket is hordoznak szövetükben. Ősi bélyeg a nagy széntartalom (4 súlyszázaléknyi is lehet, s ez annyi, mint a C-I szenes kondritoké) és az olivin-pigeonit fő ásványi összetétel. A kondritokra jellemző vastartalom lecsökkent már bennük, tehát a vas- és a szulfid-összetevő többsége kifolyt már ebből a meteorittípusból. Eltávozott azonban egy alacsonyabb olvadáspontú és a bazaltokra jellemző összetételű komponens is belőlük. Ezért az ureilitek egy differenciálódott, eredetileg kondritos összetételű kis égitest köpenyanyagának tekinthetők.

Jellegzetes az ureilitek szövetében az, hogy a nagy méretű olivin és piroxén ásványokat fekete perem határolja. Az ásványok közötti hézagokat szén, fémes vasnikkel és vasszulfid tölti ki. Olyan egy ureilites szövet, mintha ólomkeretes üvegablakot látnánk szabálytalan poligonokkal kitöltve. A karbon főleg grafit, amely kissé redukálta is az ásványok peremvidékét, s ennek hatására parányi vasszemcsék váltak ki az olivin- és piroxén-ásványok peremén. Ez a fémkiválási zóna szintén hozzájárul az ásványokat övező „ólomkeretes” peremekhez a szöveti képből.

A kis égitest magja: vasmeteoritok és pallazitok

A viszonylag gyakori vasmeteoritok már korábban is arra utaltak, hogy a vas megolvadt és kifolyt az eredetileg kondritos kőzetből jó néhány kis égitesten. Ugyancsak külön meteorittípusként számon tartottak bazaltos akondritokat is, melyek a bazaltot alkotó ásványokból (piroxén és földpát) állnak, s e két típus szépen beleillik abba a folyamatsorba, amit a kondritos égitest fejlődéstörténetének középső szakaszából le is lehet vezetni. A primitív akondritos összetételű égitestben a vas lefelé folyik ki és létrehozza a kis égitest magját, a kisebb sűrűségű bazaltos parciális olvadék pedig az égitest felszíne felé távozik, létrehozva annak a kérgét. Jelenleg egy nagyobb kisbolygót ismerünk bazaltos színképű felszínnel, ez a Vesta kisbolygó. Azonban számos kicsiny, 1–10 kilométeres méretű töredék égitest ilyen a kisbolygóövében. Ezek az átalakulási termékek is tanulmányozhatók a NIPR antarktisz meteoritgyűjteményének vékonycsiszolatain.

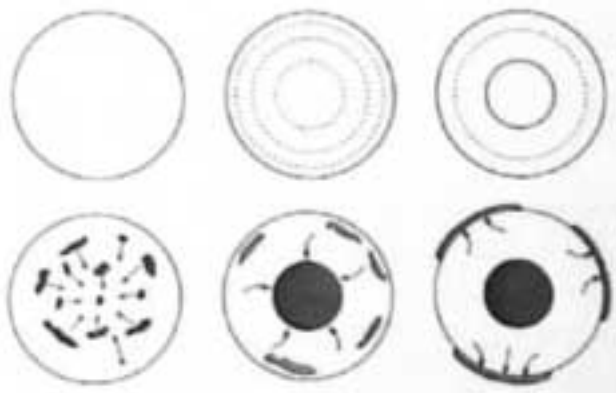
A pallazitok olyan kő–vas-meteoritok, melyekben több a fémes összetevő, mint a szilikátos. A vasnikkel fázis folytonos mátrixot alkot, melyben olivin (s néha piroxén) kristályok helyezkednek el. Vékonycsiszolatban a fémes fázis átlátszatlan, s ezért a beágyazott (fémmel körbevett) szilikátok jól megfigyelhetők. A szilikátásványok lehetnek lekerekítettek, máskor pedig kristálylapokkal határoltak vagy éles töréses pereműek. Metszetben az is megfigyelhető a fémes fázison, hogy kisebb-nagyobb vasszulfidtartományok szintén be vannak ágyazva a fémes vasnikkel-fázisba. Még olvadt állapotában ez a két fázis, a vasnikkel és a vasszulfid, egymással nem elegyedő (nem keveredő) olvadékot képez. A vasszulfid színe sárgásabb, a vasnikkel-fázisé ezüstszerű. A fémes fázisok színelkülönbségét még inkább előhozza az étetésnek nevezett eljárás. Ennek során savval maratják meg a lecsiszolt fémes felületet.

A láthatóvá vált fémes szövetszerkezetnek a vasnikkel-fázis esetén külön nevet is adtak. *Widmannstättén-mintázat*nak nevezik első leírójának nevével. A nikkeldús fázis a gammavas, taenit (kohászati néven austenit), melynek kristályrácsát laponcentrált köbös elemi cellák alkotják. A nikkelszegény fázis az alfavas, kamacit, melynek kristályrácsát tércentrált köbös elemi cellák alkotják. Lehűlés és lassú kristályosodás során oktaéderlapok szerint elrendeződő lemezek alakjában válik ki az alfavas, peremén pedig a gammavas, s ez a mintázat jelenik meg különböző irányú termetszetekben a levágott és lecsiszolt vasmeteorit-felületeken. Minél nagyobb a nikkeltartalom, annál vékonyabbak az alfavasrétegek.

A kis égitest kérge: bazaltos akondritok

A bazaltos akondrit elnevezés néhány, a kőmeteoritok köréből származó, magmás szövetű kőzettípust jelöl. Egy fejlett és differenciálódott kis égitest kérgének a kőzetszilánkjai ezek. De tisztán magmás szövete csak az eukrit–howardit–diogenit sorozat szélső tagjainak van, s persze ugyanezek előfordulnak breccsás szövettel is. (A howardit, eukrit, diogenit kezdőbetűivel HED meteoritoknak is nevezik őket.) Ásványtani szempontból ezek a kőzetek piroxénből és földpátból állnak. A diogenitek esetében a piroxén Mg-gazdag rombos piroxén (szövete újrakristályosodott szemcsés szövet). A másik szélső tag, az eukrit esetében ezek az ásványok pigeonit+plagioklász. A howarditok átmeneti breccsás kőzettípust képeznek az eukritek és a diogenitek között. A diogenit–howardit–eukrit sorozat kémiai összetétel szempontjából sok mindenben hasonlít a földi komatiit–pikrit–modernkori tholeiites bazaltsorozatra (például a sorozat közeiben fokozatosan csökken a magnézium mennyisége, s ezzel párhuzamosan a szilícium-dioxid tartalom fokozatosan növekszik). Ez arra is utalhat, hogy a kis égitesten fölgyorsítva játszódott le egy olyan folyamat, amelyet a Földön is megfigyelhetünk. Kezdetben, a vékony kéreg esetén, nagy Mg-tartalmú lávák (komatiitok vagy hozzá hasonló nagy Mg-tartalmú lávák) ömlenek a felszínre, majd a kéreg fokozatos vastagodása miatt az egyre kisebb Mg-tartalmúak érik már csak el a felszínt.





4. ábra. Összefoglaló áttekintés a kondritos kis égitest fejlődéstörténetéről. A kondritok és a különféle, kondritos eredetű differenciálódott meteoritok egy kis égitest fejlődéstörténetének egymás után következő időszakában alakultak ki. A kis égitestről időrendben megrajzolt metszeteken egy hosszú anyagátalakulási eseménysor láncszemeit alkotják e közetek, melyekből fölvázolhatjuk a kis égitest fokozatosan kialakuló réteges szerkezetét is.

### A meteoritok szövetében megfigyelhető jelenségek

A kondritok forráshelyétől szolgáló égitesteken a termikus fejlődéstörténet következő szakaszaira következtethetünk a NIPR 30 vékonycsiszolatból álló mintagyűjteményében is megfigyelhető kondritos szöveti jegek alapján:

- 1) kezdeti kondritos állapotok, ősi szövet, fölmelegedésre utaló nyomok nélkül;
- 2) a fölmelegedés megkezdődik, és ennek hatására a kondriumok körvonalai elhalványodnak, a szövetszerkezet átalakul;
- 3) a fölmelegedés hatására széndiffúzió (ureilitben) és vasredukció (szemcseeloszlás-változásban);
- 4) további fölmelegedés hatására a szilikátok szövetének átalakulása diffúzióval;
- 5) még további fölmelegedés hatására primitív akondritos szövet fejlődik ki;
- 6) még további fölmelegedés hatására vasmegoldási termékek jelennek meg (pallazit);
- 7) parciális olvadás nyomán bazaltos akondritok (diogenit, howardit, eukrit) keletkeznek.

### Összefoglalás

A kozmikus anyagok vizsgálata jelentősen kiterjedt az elmúlt fél évszázadban. Az űrkutatás törekszik anyagokat gyűjteni más égitestekről és a kozmikus anyagok vizsgálatához, mert az égitestekre és a kozmikus környezet anyagaira vonatkozó kutatások a leggyorsabban fejlődő vizsgálati területek közé tartoznak. E cikkben a kisbolygókról származó meteoritokat vizsgáltuk.

A meteoritokat egy elképzelt, Földnél kisebb kicsi égitest töredékeinek értelmezhetjük. A kondritos kisbolygó a Naprendszer ősi anyagából jött létre. Kicsi méreténél fogva csak néhány kis méretű kondritos égitest tudta megőrizni az ősi anyagokat, mert kis mérete folytán rövid ideig tartott benne az a fölmelegedés, amit a rövid éleési idejű radioaktív elemek hoztak létre benne.



5. ábra. Az antarktisz meteoritok közetgyűjtemény vékonycsiszolatai a National Institute of Polar Research (NIPR, Japán Nemzeti Sarkkutató Intézet) készlete alapján sok érdekes összehasonlító szöveti vizsgálatot végezhetünk el.

A kissé nagyobb kisbolygónak is csak néhány millió éves fölmelegedési idő állt rendelkezésére. De ezalatt olyan fejlődési állomásokon ment végig, amelyek előbb fokozatosan átalakították majd kismértékben szét is válogatták az ősi kondritos anyagegyüttest, és sűrűségük szerint övekre is tagolták (4. ábra).

A sorozat folytatásában több más fontos epizódot mutatunk majd be. Először a holdi eseményeket, amelyekről az Apollo-expedíciókon begyűjtött kőzetminták és meteoritok is rendelkezésünkre állnak. A meteoritok egy különleges csoportját alkotják a marsi eredetűek. Ezekről egy későbbi cikkben szólunk, és a nagyobb méretű égitesthez tartozó még differenciáltabb kőzettani fejlődéstörténet újabb bolygótörténeti szakaszokkal fog megismertetni bennünket a Mars kutatása során. A bolygóttestek anyagából kiolvasható fejlődéstörténeti epizódokat a legnagyobb kőbolygó, a Föld komplex története koronázza meg, ahol a leg hosszabb ideig tartó és legváltozatosabb bolygófejlődési történeti szakaszt láthatjuk működni a lemeztectonika formájában.

A cikkben egy fontos anyagminta-gyűjteményre hivatkoztunk. Ezeken dolgozik űrkutató csoportunk, a Kozmikus Anyagokat Vizsgáló Űrkutató Csoport az ELTE TTK Fizikai Intézet Anyagfizikai Tanszékén. Ennek az anyagminta-gyűjteménynek a használata tette lehetővé a bemutatott anyagfejlődés-történeti kép kutatását, megismerését és rekonstruálását: ez a NIPR (Japán Nemzeti Sarkkutató Intézet, Tokió) Antarktisz Meteorit Vékonycsiszolat Gyűjteménye (5. ábra). Ezt a gyűjteményt többször is megkaptuk éves kölcsönzési periódusokra. Ez a mintagyűjtemény a legkönnyebben elérhető készlet ma a világon a meteoritok vizsgálatához. Ezúton is köszönetet mondunk a National Institute of Polar Research Antarktisz Meteoritok Osztályának a mintakészlet kölcsönzéséért.

### Irodalom

- Bérczi Sz., *Planetológia*. Egyetemi jegyzet, J3-1154, Tankönyvkiadó, Budapest, 1978.  
 Bérczi Sz., *Kristályoktól bolygóttestekig*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1991.  
 J.T. Wasson, *Meteorites*. Springer, Berlin, 1974.

## KIS ATLASZ SOROZAT A NAPRENDSZERRŐL

Szerkeszti: Bérczi Szaniszló

Az ELTE TTK Fizikai Intézetében, az Általános Fizika Tanszéken működik a *Kozmikus Anyagokat Vizsgáló Űrkutató Csoport*. Ennek tanár, mérnök, kutató, doktorandusz és egyetemi hallgató tagjai egy *Kis atlasz a Naprendszeréről* sorozat munkáiban vesznek részt. A sorozatban eddig tíz atlasz jelent meg.

Az első a *Holdkőzetek, Meteoritek* anyagvizsgálataiba nyújt betekintést. Kőzettani mikroszkóppal tanulmányozzuk a holdi, illetve a kis égitestek töredékeként a Földre hullott meteoritek anyagát. A meteoritek egy csoportja, a kondritos meteoritek, olyan fizikai folyamatokat is megfigyelhetővé tesznek, amelyek egy kis égitestnek, egy kisbolygónak a fejlődéstörténete során mennek végbe. A NASA Holdkőzetek az Apollo-expedíciókról származnak. A holdkőzetek főbb szövettípusait a földi vulkáni és ismert ipari folyamatokban létrejövő anyagokkal hasonlítjuk össze.

A sorozat második kis atlasza hozza a legmeglepőbb témát: hogyan készítettük el a Hunveyor egyetemi kísérleti gyakorló űrszondát. Az atlasz címe: *Planetáris felszín vizsgálat a SURVEYOR alapján megépített HUNVEYOR kísérleti gyakorló űrszondával*. Bemutatjuk a Hunveyor építésének főbb szakaszait, a váz szerkezetét, az elektronikai rendszert, a minimál-űrszondához tartozó kar és kamera kapcsolót a fő moduldal, és sok érdekes, eddig már megvalósított kísérleti berendezést. Részletesen bemutatjuk azokat a méréseket, amelyeket erre a robotra terveztünk és meg is építettünk. Bemutatjuk a Hunveyor használatát a különféle oktatási területeken is, az égitestek felszínét tanulmányozó tudományok mellett a fizikában, technikában és a földi környezettudományban. Modellezzük az égitestek felszínén zajló áramlási folyamatok kölcsönhatásait a gyakorló űrszonda részrendszereivel. Ez a modell a mérések tervezéséhez és az egész robot-együttes áttekintéséhez is jó támpontokat ad. (Ezt a kis atlaszunkat angol nyelven is kiadtuk.) A Hunveyor atlasz készítésében a *Hunveyor Csoport* pécsi és szombathelyi (Hunveyor-2 és 3-at építő) tagjai is részt vettek.

A harmadik kis atlaszban a Naprendszer nagyobb égitestjeinek űrszondákról megfigyelhető felszínét tanulmányozzuk. A *Bolygótestek atlasza* című munkánk bemutatja a főbb kőzetbolygókat és jeges holdakat, valamint a Naprendszer kisebb égitestjeit. Vázolja a főbb felszínformáló folyamatokat, s összehasonlítja

anyagot mutat be az olyan közös felszínformáló eseményekről, mint a körkörös medencék képződése, a vulkanizmus, a tektonikus folyamatok, vagy a káoszterületek megjelenése. Röviden bemutatja azt is, hogyan történik az égitestfelszíni kőzettestek térképezése.

A negyedik kis atlaszban a Naprendszer légkörrel rendelkező égitestjeit tanulmányozzuk. A *Bolygólégkörök atlasza* bemutatja a bolygók légkörének általános fölépítését, vázolja a főbb légköri és felszíni kölcsönhatásokat. A legtöbb részletet a Föld légköréről és a Jupiter légkörzéséről ismerünk. Atlaszunk összehasonlító táblázatokat közöl az eddig megismert légkörök rétegződéséről és főbb állapotjellemzőiről. Az atlasz sorozatnak a bolygók felszínét és légkörét tanulmányozó két tagját az *ELTE Planetológia Csoport* tagjaival való együttműködésben készítettük.

Ötödik atlaszunk is szokatlan témát dolgoz föl, címe: *Űrkitatás és geometria*. Ebben a geometriának két űrkitatáshoz kapcsolódó ágát mutatjuk be: az égi koordináta-rendszereket (egyiket a Marsra leszállt űrszonda esetére számszerűen is megadjuk), és az űrállomás-építés „kristálytani geometriáját”. Ez a második rész olyan térbeli mozaikrendszer megépítésének alapismereitebe vezeti be az olvasókat, amely gömb-szerű űrállomástestek („mesterséges égitestek”) kvázikristályos elvű létrehozására is és a térbeli klasszikus kristálytani szerkezetek megépítésére is alkalmas. Itt bemutatunk néhányat *Kabai Sándornak a Mathematica programmal* előállított olyan számítógépes grafikából, melyek a kozmikus térben történő tájékozódáshoz, az űrben összekapcsolódó térbeli alakzatok, szerkezetek tervezéséhez is felhasználhatók.

A hatodik kis atlasz a *Bolygófelszíni mikrokozmoszok* atlasza. A Földön mikrokozmosz az, ami körülveszi az embert: a lakás, a kert, a környezeti táj közeli része. Ugyanez a mikrokozmosz a más égitest felszínére leszállt űrszondának is. A Holdra, a Marsra, a Vénuszra (sőt azóta már a Titánra is) érkezett robotok sziklasivatagokat találtak. A helyben maradt űrszondák szemével (kamerájával) látunk, kinyújtott karjával (robotkar) mérünk és talajt vizsgálunk. A fedélzeti műszerekkel a valódi űrszondák mérik a környezet jellemzőit, de a különféle mérések itt a laborban is elkészíthetők rákicsinnyítve őket a Hunveyor egyetemi gyakorló űrszondamoddellre. Kémiai, meteorológiai, elektrosztatikai mérések elvét és fölépítését ismerhetjük meg e füzetből.

A hetedik kis atlasz a *Bolygófelszíni barangolásokról* szól. Négyféle robotautó-típus járt már a Naprendszerben: kettő a Holdon, s kettő a Marson. Ezekkel kitágul az a mikrokozmosz, amelyet az űrszonda

A *Kis atlasz a Naprendszeréről* sorozat megjelenését a Magyar Űrkutatási Irodánál elnyert pályázatok tették lehetővé. Érdeklődni lehet a [bercziszani@ludens.elte.hu](mailto:bercziszani@ludens.elte.hu) e-mail címen.

fedélzeti műszereivel mérhet, mert egyre nagyobb távolságokra juthatnak el a robotok a leszállási helytől. Külön érdekessége ennek a füzetnek a 6 Apollo-expedíció rövid leírása. Az első három űrhajóspárosnak még nem volt autója, de az Apolló-15, 16 és 17 űrhajósai egyre nagyobb távolságot barangolhattak be a leszállási hely környékén. A Pathfinder még csak a leszálló egység, mint platform körül kóborló kisautót próbált ki, de a jelenleg is működő MER robotok már több kilométernyi utat megtettek. Ugyancsak nagy távolságot járt be a két Lunohod a Holdon, még az 1970-es években.

A nyolcadik kis atlasz címe: *Űrkutatás és kémia*, melyben mind a négy halmazállapot kémiájának világában teszünk kirándulást. Mivel a földi környezetben megismert kémián túlmenően űrszondáink más bolygótetek felszínére is eljutottak, és ezeknek a felszínközeli anyagait is fokozatosan megismerhettük, érdemes az űrkutatás és a kémia kapcsolatát olyan formában gazdagítani, hogy a földi kémiát (planetáris) összehasonlító kémiává tesszük. Ez a planetáris összehasonlító kémia az égitestfelszíni környezetek anyagait, folyamatait elemzi (ugyanúgy, ahogyan az összehasonlító planetológia az égitestek felszínét), miáltal lehetővé teszi a hagyományos kémiai ismereteknek izgalmas újrafelfedezését és új irányokba való bővítését. Mi ezeket a kémiai „kiterjesztéseket” *Űrku-*

*tatás és kémia* atlaszunkban elsősorban a Mars bolygóra mutatjuk be.

A kilencedik kis atlasz címe: *Planetáris kutatások analógiákkal és szimulációkkal*, melyben anyagok, tájformák, folyamatok és más jelenségek földi analógiáit állítjuk párba a bolygókön, főleg a Marson és a Holdon megismert jelenségvilággal. A szimulációs kísérletekre a Hunveyor-Husar gyakorló űrszondamodell-rendszer iskolarobotjaival kerül sor. Több planetáris analóg helyszínt látogatott meg már csoportunk a Hunveyorokkal. Európai horizonton a Mien- és a Ries-kráterek becsapódási anyagai, az izlandi vulkánok és a jég, illetve az anatóliai kőgleccserek, valamint a hazai folyók meanderezései képeznek planetáris párhuzamokat.

A tizedik kis atlasz címe: *Fejlesztések a HUNVEYOR-HUSAR űrszonda modelleken*. Az elmúlt 6 évben jelentős átépítéseket hajtottunk végre a Hunveyor modelleken és a Husar rovereket is új irányokba fejlesztettük. Bemutatjuk az új Hunveyor építések főbb blokkjait, vázát, elektronikai rendszerét, és sok érdekes, az előzőeken nem lévő kísérleti berendezést, valamint a Husar robotokon épített megoldásokat. Végül új nézőpontból is bemutatjuk a Hunveyor-Husar modellek használatát a különféle oktatási területeken is, az égitestek felszínét tanulmányozó földi analóg területeken (például Mars-analóg tájakon).

## FIZIKATÚRA – AVAGY HOGYAN MOZGASSUK MEG DIÁKJAINKAT FIZIKAILAG?

Lang Ágota, Czupy Judit  
Széchenyi István Gimnázium, Sopron

2005 a *Fizika Éve* volt, erre még minden kedves olvasó emlékszik. Az ebből az alkalomból szervezett események többsége még az év első felében lezajlott. Mi is igyekeztünk minél jobban bevonni diákjainkat, sőt, például a Fénystafétával egész Sopront, de éreztük, ki kellene még rukkolni valamivel. Így jött el a szünidő, amikor is a pihent agyból kipattant az ötlet: használjuk ki, hogy itt van tőlünk karnyújtásnyira az erdő, és legyen ez egy verseny színtere. (Valahol a tudat alatt szerepe lehetett ebben a *Nyerges Gyula* kollégánktól hallott csillagászati sétának, amit Esztergom körül szerveztek.) A verseny pedig ne a példamegoldásról, hanem gyakorlati dolgokról szóljon, ahol a diákok végre matathatnak egy kicsit. Hogy nagyobb kedvet csináljunk, ezért – ahogy a nagyobb versenyeken is szokás – minden segédeszköz használatát megengedtük, amit hajlandó magával cipelni a versenyző a hátizsákban; egyedül a telefonos segítségkérést tiltottuk meg. Persze a diákok első reakciója: akkor laptopot is vihetünk? A mienk: ha cipeled!?

Mivel az erdőben egyedül bóklászni és eltévedni nem nagy kaland, ezért háromfős csapatoknak hirdettük meg a viadalt, amely végül a *Fizikatúra* nevet

kapta. Erre Sopron minden iskolájából vártuk a vállalkozó szellemű csapatokat. Hírverés céljából plakátokat helyeztünk el közterületeken, újságban is megjelentettünk egy cikket, sőt honlapja is volt a rendezvénynek, jelentkezni is ezen keresztül lehetett. Itt olvashatták az érdeklődők a játékszabályokat:

„Ahogy a névből is sejthető, ez a vetélkedő eltér a szokásos, (tan)teremben zajló versenyektől. A Soproni-hegység túraútvonalain jelöljük ki a pályát, és az érintendő állomásokon különböző feladatok várják a versenyzőket. A pontos útvonalról térképet a rajthelyen kapnak a csapatok. Ez normál tempóban 3–4 óra alatt járható be, plusz a feladtmegoldások ideje. Az állomásokon különböző feladatok várják a csapatokat, de csak akkor adjuk oda, ha a csapat minden tagja odaért, tehát nem érdemes előreküldeni a leggyorsabbat, hanem segíteni kell a lelassúbbat! Minden segédeszköz használata, amit hajlandó vagy magaddal cipelni, megengedett, *a telefonos segítség kivételével!*

A megoldásokra kapott pontszámokból levonjuk a menetidőt (percekben mérve és 10-zel osztva), ennek alapján alakul ki a csapatok végső sorrendje.”

Egyéb fontos információkat is itt találtak, például, hogy mit érdemes átnézni, illetve mindenképp bepakolni a 2 napi hideg élelem mellé. Az Öveges-könyveket melegen ajánlottuk, ezen kívül a magyar Nobel-díjasokról és *Einstein*ről javasoltuk anyagot gyűjteni. Egy fakultatív előfeladat is várt a csapatokra: *A fizika jótékony hatása a környezetünkre* címmel készíthettek plakátot pluszpontokért.

A csapatokat első nekifutásra 2 kategóriába soroltuk, de tekintettel arra, hogy végül 7–12. osztályig minden korosztály képviseltette magát, 3 kategóriára szedtük szét a mezőnyt.

## Fizikátúra 1.0

Az állomások „személyzete” ezen alkalommal 11.-es diákokból állt. (Néha van előnye, ha osztályfőnök az ember...) A feladatokat ők is csak a nagy nap reggelén ismerhették meg, és kaptak némi eligazítást a pontozásról. Miután ők elindultak, hogy elfoglalják helyüket a körülbelül 12 km hosszú túra útvonalán, mi még felkészítettük a starthelyet egyik szponzorunktól kapott lufikkal, majd izgatottan vártuk, hogy vajon a bejelentkezett 42 csapatból hányan jelennek meg. Az egyre növekvő tömegből arra következtettünk, hogy elég sokan. 2–3 csapat maradt csak otthon, de helyettük megjelentek mások, akik hirtelen felindulásból, előző este határozták el, hogy részt vesznek a versenyben. Szerencsére minden fontos dokumentumból – úgymint térkép fénymásolata, menetlevél – hoztunk tartalékot. Előbbin az érintendő állomások voltak bejelölve, míg a menetlevélen azt tüntettük fel, mikor érkezett be a csapat egy állomásra, illetve mikor indult tovább. Legfőbb funkciója azonban az volt, hogy a holtidőt – amikor a csapat már befutott az állomásra, de önhibáján kívül várnia kell az eszközre – számon tartsuk. Ezt, természetesen, levontuk a menetidőből.

42 csapat nagy öröm, de felveti azt a problémát, hogy szét kellene húzni a népes mezőnyt a rajtnál, hogy ne egy tömegben trappoljanak végig a pályán. Azt találtuk ki, hogy itt rögtön kitöltik az Einstein-to-

Hogy lebeg a tojás?



tót, ennek beadása után indulhat a csapat. Ezen ki rövidebb, ki hosszabb idő alatt rája át magát, előveszik az idevágó segédanyagot, keresgetnek benne... gondoltuk mi. A valóságban a csapatok 90%-a tippmix jelleggel, minél gyorsabb kitöltésre törekedett, és egymás sarkát taposva tülekedtek előttünk, hogy rávezessük menetlevelükre az indulás időpontját és kilőhessenek. Második ötletünk a tömegjelenetek elkerülésére jobban bevált: az első állomáshely és a feladat eltért a két kategória számára, a „nagyokat” egyből felhajtottuk a Károly-magaslatra, míg a „kicsik” a Deák-kútnál kezdtek és onnan egy kevésbé fásasztó úton jutottak el a közös 2. állomáshoz. Ettől kezdve útjuk ugyan együtt vezetett, de a nagyok ekkor már jócskán elhúztak a kisebbektől.

Nézzük, milyen feladatok várták az állomásokon a csapatokat! Ezek kitalálásakor szem előtt tartottuk a kiírásban foglaltakat, valamint azt a célt, hogy minél többen tudják sikeresen teljesíteni a feladatot, egy kis sikerélményre szert téve. Az sem volt egy utolsó szempont, hogy a 11.B osztály – amelyből segítőkink kikerültek – inkább nyelvi beállítottságú, tehát amikor nekik kell majd elbírálni, hogy egy kísérlet sikeres-e vagy sem, akkor egyértelműen tudják majd ezt megtenni. Így aztán a következő ötleteink születtek.

### 1. feladat

#### II. kategória

Az első állomáshely a nagyok számára, amint már említettük, a Károly-magaslaton volt. Itt a kirándulók asztaloknál-padoknál pihenhetnek meg. A szervezők egy asztalt megterítettek, a tányér és pohár persze csak műanyagból voltak, de a sörösüvegek, evőeszközök valódiak. A poharakban szívószálat is találtak a résztvevők, és több liter víz állt rendelkezésükre a következő feladat megoldásához:

Képzeljétek el, hogy egy vendéglátó egységben egy megterített asztalnál ülve várjátok, hogy kihozzák az ételt. Mivel lassan halad a dolog, a társaság szórakoztatására el akarjátok játszani a *Boci, boci tarka* című közkedvelt gyermekdalocskát. (Eljátszani, nem elénekelni!!) Írjátok le, hogy az asztalon található tárgyak közül *melyikkel és hogyan* lenne ez kivitelezhető! Ha több lehetőséget is láttok, mindet adjátok meg! Az a csapat, amelyik veszi a fáradságot, és elő is adja – előzőleg hívjátok oda egy szervezőt, aki majd meghallgatja –, további 10 pontot szerezhet. Nem kell teljesen tisztán szólnia, de a dallam felismerhető legyen! Az ötletek (rajzolni is szabad!).

#### I. kategória

A kicsik a Deák-kút felé indultak, ahol ugyancsak található egy pihenő a forrás mellett. A szervezők a következőket pakolták ki az asztalokra: étolaj, ecet, liszt, só, cukor és műanyag poharakban tojások. Ezekből a kollégák már nyilván sejtik is, mi lehetett a feladat!

A pohárban egy tojást láttok. Feladatotok elérni, hogy ez a tojás egy kicsit felemelkedjen a pohár alja fölé és ott lebegjen! (Ez ugye azt jelenti, hogy nem

tartja senki!!!) Először is írjátok le, hogyan tudnátok ezt elérni! Az ötlet (rajzolni is szabad!). Ezután próbáljátok meg is valósítani a rendelkezésekre álló eszközökkel!

☉ A kitöltött feladatlapok és a kiadott eszközök begyűjtésekor láttunk néhány olajos poharat is, sőt az egyik csapat először földet rakott bele. (Lehet, hogy el akarták ültetni a tojást.) Azért előbb vagy utóbb a többségnek leesett (esetleg a könyvekből), hogy mi is a megoldás. A kivétel a következőt javasolta: „*Összekeverjük az asztalon lévő dolgokat és ezzel alkotunk egy olyan dolgot, ami sűrűbb a tojásnál.*” Végül is az elv nem rossz, csak éppen megvalósítaniuk nem sikerült.

Hol találkozol a gyakorlatban/természetben a lebegéssel? Mondjatok néhány példát!

☉ A válaszokból kiderül, hogy sajnos a lebegés = úszás a legtöbb kis agyban, még ha hallottak is már felhajtóerőről. Egyébként a rajzok egy részénél is a tojás kiemelkedett a vízből.

## 2. feladat

A 2. állomás helyének kijelölésében ugyancsak fontos volt, hogy sok asztal legyen. Itt körülbelül 15 megszámozott boríték rejtette magyar Nobel-díjas tudósok portréját 20 kockára szétdarabolva. A csapatok ezek közül húztak egyet, és persze kaptak mellé egy feladatlapot is.

A borítékban egy magyar Nobel-díjas tudós fényképét találjátok, csak egy kicsit összeszabdalva. A feladat első része, hogy rakjátok ki a darabokból a teljes képet! Ezt mutassátok meg az egyik szervezőnek! Melyik tudóst ábrázolja a kép? Miért részesült a legmagasabb tudományos elismerésben? Melyik a természettudományoknak az a területe, amelyet *Alfred Nobel* mostohán kezelte, és nem osztanak ilyen Nobel-díjat?

☉ Itt, sajnos, nem emeltük ki a szövegből a „*természettudomány*” szót, bár valószínű, akkor is ugyanez az eredmény született volna: aki írt valamit, az a matematikát jelölte meg, míg helyes válaszként *természetesen* a földrajzot vártuk.

Nobel-díjas összerakó



## 3. feladat

A kis fizika/tudománytörténeti kitérő után ismét a gyakorlati feladatoké volt a főszerep. A következő állomás ugyan közös volt, de különböző „egységcsomagokat” kapott a két kategória.

A nagyobbakéban egy filctoll, vékony drót, elem lapult, amelyből elképzeléseink szerint egy kis tekercest készíthettek volna.

A kicsik doboza vasszőget, egy kisebb darab hungarocelt, fonalat, fémkarikát, üveggolyót és még néhány felesleges apróságot rejtett, megtévesztés gyanánt. A szervezőknél pedig állandó mágnes, illetve egy tál víz volt bérelhető. Mindezen kellékek pedig az északi irány belövésére szolgáltak.

A rendelkezésedre bocsátott eszközök segítségével mutasd meg, merre van észak! Írd is le, milyen módszerrel dolgoztál! Milyen más módszert tudsz még a természetben járva az északi irány meghatározására?

☉ Itt Moha vitte a Páfrányt...

Milyen mágneses pólus van a Föld Északi-sarkán?

☉ Hát, ez beugratós kérdésnek bizonyult, mi tagadás, annak is szántuk. Az egy dolog, hogy többnyire az északi pólusra tippeltek, de főleg a kicsik megosztottak a pozitív, illetve negatív pólus között. Pedig azt gondolnánk, hogy a mágnesség eléggé hétköznapi jelenség ahhoz, hogy legalább az elnevezéseket ismerjék. Egy-két csapaton belül nem tudtak megegyezni, így ők például „*déli, azaz negatív*” pólusról beszéltek.

*Csak a II. kategóriának:* Mi látható a képeken? Ha tudod, add meg az idegen (latin) nevét is! Hogyan alakul ki ez a gyönyörű természeti jelenség?

☉ A képen természetesen északi/sarki fény volt látható. Néhány nagyon csúnya téveszme: „A napkitörés az ionoszférában megvilágítódik.” „A napkitörések miatt a Föld gravitációja eltaszítja a pólusok felé a napfénykitöréseket.” „A Nap sugarai különböző frekvenciájúak, a Föld mágneses mezejének hatására eltorzulnak (elhajlanak) és legkülönbözőbb színek lesznek láthatóak.”

Ebből mondjuk meg, merre van észak







Merre menjünk?



Munkában a csapatok

#### 4. feladat

A következő állomásra nehezen találtak oda a fiatalabb versenyzők, de végül csak befutott mindegyik csapat. Ide a szervezőknek egy nagy szatyor zöldség-gyümölcsöt kellett felcipelniük (ne feledjük, hogy az is a személyzet dolga volt, hogy a szükséges eszközöket eljuttassák az állomáshelyre, ebben ritkán tudtunk segíteni autóval) és mindenféle fémanyagot: szögeket, gombostűket, többfajta anyagból készült gémkapcsokat. No és persze voltmérőt. A feladat lényegében ugyanaz volt mindenkinek, de külön állomáshelyet állítottunk fel a két kategóriának.

Talán meglepő, hogy az elemet, amelyet ma olyan sok elektromos eszköz működtetésére használunk, csak a 18. század legvégén állította össze egy itáliai tudós, persze kicsit más formában, mint ahogy ma ismerjük. Ki ez a tudós, hogy hívjuk ma az általa készített áramforrást? Kiről nevezte ő el?

☉ A kicsik 24 csapatából 8 nem tudott ehhez a kérdéshez hozzászólni. A csapatok felétől kaptunk helyes választ a kérdés első részére, néhányuknak beugrott *Galvani* neve is, bár kicsit keverték, hogy kit hova kellene írni. A galvánelem senkinek nem jutott eszébe, de kaptunk helyette Volta-oszlopot (ezt elfogadtuk) és primér áramforrást (ezt név hiányában nem). Hogy Barkla vajon melyik segédanyagból lett előhalászva, azt nem tudni (mentségükre szóljon, hogy hetedikesek követték el).

☉ A nagyoknál viszont épp fordítva: a galvánelem és Galvani sok feladatlapon olvasható volt, miközben *Volta* helyett felmerült *Faraday* és *Ampère* neve is.

Az asztalon mindenféle gyümölcsöt és zöldséget találsz, mellettük még egyéb hétköznapi dolgok. Hogyan lehetne ezekből áramforrást készíteni? Ötlet, esetleg rajz. Ha a csapat összeállít egy áramforrást a rendelkezésre álló eszközökből és a műszer jelzi is a feszültséget, 5 pont. További 5 pont jár, ha ezt a feszültséget sikerül megtöbbszörözni.

☉ Nos, a II–III. kategóriában több csapat szinte megsértődött a feladaton. Ne csináljunk már bolondot belőlük! Ezekből a kellékekből feszültséget varázsolni? A nyolcadikosok azonban rutinfeladatnak tekintet-

ték, és fülig érő szájjal választották ki a zöldségesbolt-szerű kínálatból főleg a citromot, nyomták bele a szeget és a gémkapcsot. A hetedikeseket biztattuk, hogy amíg várakoznak, nézegessék az Öveges-könyveket, ha hoztak magukkal. Ezen az állomáson egy kicsit fizikusabb beütésű fiúk voltak a „felügyelők”, és érdekes volt nézni ezeket a laklikat, ahogy a kicsiket rávezették a megoldásra, még ha nem is teljes pontszámért, de azért örömet okozva nekik.

☉ Ami itt is feltűnt: elég nehézkesen – és tömören – fogalmazták meg, hogyan állították össze a kísérletet, szívesebben rajzoltak, és ez egyformán jellemző a kicsikre és a nagyokra.

Mi a teendő a kimerült elemekkel, akkumulátorokkal?

☉ Örömmel jelenthetjük, hogy 42 csapatból 40 tökéletesen tisztában van – legalábbis elvben – azzal, hogy ezek veszélyes hulladékok, külön kell őket gyűjteni stb.

További áramforrás még a generátor, dinamó. Melyik magyar tudós készített először a világon ilyen eszközt?

☉ Nemi megnyugvással vettük tudomásul, hogy a fizikortörténet magyarokat érintő része a legtöbbször előtt ismert. Azért *Jedlik Ányos* mellé kaptunk még *Déri Miksát*, *Galamb Józsefet*, *Teller Edét* és *Pelényi Jánost* (??).

*Csak a II. kategóriának:* Rajzoljátok le valamelyik generátor modelljét, és 2–3 mondatban foglaljátok össze a működésének elvét!

☉ Több csapat egyszerűen passzolta a kérdést, viszont kaptunk leírást motorról, néhány precíz megoldás is született. Kipróbálásra ajánlunk egy egészen új módszert, mely szerint „a grafitrudakat elkezdjük forgatni a réztekercsek körül és így elektromos áram keletkezik”.

#### 5. feladat

##### I. kategória

Az utolsó állomásra optikai feladatot szántunk. Első nekifutásra egy távcső összerakásának ötlete merült fel. Megpróbáltuk optikai padon összeállítani, de mivel két fizikatanárnak sem hozott olyan eredményt,

amivel 15 méter távolságból felismerhető lett volna egy papíron 7 pöttyből a Göncölszekér, ezért végül egy optikai játékdoboz kellékeit használtuk fel. (Ugyanis az utolsó állomáson egy kilátó áll, ennek tetejéből kellett nézniük a már említett lapot.)

A rendelkezésre álló eszközök segítségével készíts távcsövet, amelynek segítségével megláthatod, mi áll a fára erősített papíron! Mit láttál? Másold ide. Mire emlékeztet ez? Hol láttál már hasonlót? (Ha nem sikerül távcsővel meglátni, akkor a szervező odakísér a papírhoz, miután kinullázta az előző feladatrészt, és innen folytathatod.) Sorolj fel tudósokat, akik távcsövet készítettek! A 20. század csillagászeit milyen újfajta távcső segíti?

A cél a Sopron és Brennberg között található Gyermekek- és Ifjúsági Táborban volt, amelyben nagyon kedvesen fogadták kérésünket, sőt felajánlották, hogy igazi, természettel kapcsolatos feladatlapot is összeállítanak végző gyanánt. Ennek keretében például szagmintákat kellett felismerni, illetve összepárosítani egy-egy fa levelét, termését és ágát. A céllal szemközti erdei pihenőhelyen pedig paprikáskrumpli rotyogott a bográcsban, így a csapatok többsége jóllakva távozott. A korán érkezőknek viszont még csak a krumplipucolás jutott... Ha ebédet nem is, de emléklapot minden résztvevő kapott.

☺

A Fizikátúra a fizikai ismeretek mellett feltételezett némi térképismeretet. A kézhez kapott térképen ugyanis csak az állomásokat jelöltük be, az odavezető utat a csapatoknak kellett ki- és megtalálniuk. Be kell vallanunk, bennünk fel sem merült, hogy ezek a gye-

rekek ne lennének annyira talpraesettek, hogy legalább turistautakon maradnak. Hiszen arra azért ügyeltünk, hogy az állomások jól jelzett utakról elérhetőek legyenek, másrészt a térképen megadtuk együnk mobilszámát is, azzal a felkiáltással, hogy ha már nagyon nem tudják, hol vannak, inkább telefonáljanak. Valóban befutott néhány hívás, mert a 3. állomás után háromfelé is indulhattak, és többen nem találták el a helyes irányt. De egy lánycsapat például élete legnagyobb élményeként emlegeti az eltévedést; nagy örömmel mesélték, hogy láttak mindenféle állatot, le is fényképezték őket.

A visszajelzésekből úgy gondoljuk, hogy a csapatok többsége élvezte ezt a számukra újfajta versenyt. Néhány diákunk otthon is olyan lelkesen mesélt róla, hogy a szülők külön kérésére már tavasszal meg kellett szerveznünk a Fizikátúra 2.0-t, amit magunktól nem tettünk volna, mert ezt az eseményt kifejezetten a Fizika Évére találtuk ki. Azonban nekünk is úgy megtetszett, hogy megegyeztünk: ha rendszeressé tálán nem is tesszük, de amíg kedvünk/erőnk/ötletünk van, addig csináljuk.

Végül is a Fizikátúra 2.0-t elmosta az eső, de 2006 őszén ismét belevágtunk, és októberben levezenyeltük a Fizikátúra 2.1-et. Erről minden információt, a feladatlapokat és képeket a [www.fizikatura.atw.hu](http://www.fizikatura.atw.hu) weboldal tartalmaz. Felkeresését már csak azért is ajánljuk, mert az előfeladat fizikával kapcsolatos viccek beküldése volt. Természetesen a viccgűjtemény is olvasható a honlapon!

Végzőként pedig arra biztatjuk a kollégákat, hogy bátran vágjanak bele egy ilyen jellegű rendezvény megszervezésébe, mert garantált a siker!

## PÁLYÁZATOK

# A 2007. ÉVI ÖVEGES JÓZSEF DÍJ PÁLYÁZATI FELHÍVÁSA

A Magyar Nukleáris Társaság Elnöksége az iskolai fizikaoktatás kísérletes jellegének erősítésére és a kísérletező fizikatanárok elismerésére 2006. márciusában *Öveges József Díjat* alapított. A díjat iskolában oktató fizikatanárok nyerhetik el, az általuk benyújtott pályázat alapján. A díj Alapító Okirata a [http://www.reak.bme.hu/mnt/Ovegesdij/Oveges\\_Alapokirat.pdf](http://www.reak.bme.hu/mnt/Ovegesdij/Oveges_Alapokirat.pdf) címen olvasható az interneten. Az Öveges Díj egy bronzból készült kispasztika (*Farkas Pál* szobrászművész munkája), a díj elnyerését tanúsító oklevél, valamint 2007-ben 100 000,- Ft egyszeri tudományos ösztöndíj.

Ezúton hívjuk fel a fizikatanárokat, pályázzanak az órán bemutatott (tanári vagy tanulói) kísérletekkel!

A pályázat tartalmi és formai részletei

- Személyenként évente egy pályázat nyújtható be.
- A pályázatban leírt (egy vagy több) kísérlet egy témakörhöz tartozó legyen.
- Pályázni lehet megvalósított új kísérletekkel, illetve régi kísérletek korszerűbb megvalósításával, amelyek akár technikai (pl. számítógéppel támogatott kísérlet), akár didaktikai újdonságokat tartalmaznak.
- A pályázónak nyilatkoznia kell a pályázatban bemutatott kísérletek *eredetéről* és *újdonságtartalmáról* (saját ötlet, másnak az ötlete átdolgozva, megújítva stb.).
- Számítógépes *szimulációk* nem minősülnek kísérletnek.

- Nem lehet pályázni olyan készletekkel, kísérletekkel, amelyeket a pályázó korábban már gazdaságilag hasznosított (pl. kereskedelmi forgalomban kapható).
- A két példányban benyújtandó pályázatnak olyan részletes leírást (esetleg egyéb adathordozót, videót, CD-t stb.) kell tartalmaznia, amelynek alapján:
  - A Kuratórium értékelni tudja a pályázatot a Díj Alapító Okiratában részletezett szempontok szerint (ld. alább).

– Más fizikatanár kollégák képesek a kísérlet átvételére saját iskolájukban.

- A pályázat jelíges, ezért a pályázónak sehol sem szabad feltüntetni a nevét a pályázaton. A pályázathoz csatolni kell egy lezárt borítékot, amely kívül a pályázat jelígjét (kódját), belül a pályázó nevét és egyéb adatait tartalmazza. Ezt a borítékot a Társaság titkára bontja fel az után, hogy a Kuratórium az összes pályamunkát pontozta.

A pályázat beadásával a pályázó egyben *hozzájárul* ahhoz, hogy

– neve és elért pontszámai felkerüljenek a Magyar Nukleáris Társaság által gondozott Öveges Díj honlapra;

– a Díj elnyerése esetén a pályázat(ok)ban leírt kísérletek közül a Kuratórium által arra alkalmasnak ítélték ugyancsak felkerüljenek az Öveges Díj honlapra, ahonnan szabadon letölthetők, és oktatási célokra térítés nélkül felhasználhatók lesznek (Öveges Díj Alapító Okirat 7.§).

A pályázat benyújtási *határideje*: 2007. október 12., péntek (postabélyegző kelte).

A pályázat benyújtási *címe*: *Silye Judit*, a Magyar Nukleáris Társaság titkára, Országos Atomenergia Hivatal, 1036 Budapest, Fényes Adolf u. 4.

A pályázat jelíges jellege miatt a Kuratórium csak postán érkezett pályázatokat tud elfogadni.

A nyertes pályázónak a Magyar Nukleáris Társaság elnöke 2007. december elején az Ünnepi Közgyűlésen adja át az Öveges József Díjat. A pályázónak körülbelül 20 perces előadás keretében *be kell mutatnia* legérdekesebb kísérleteit, amelyek a Díj elnyeréséhez segítették.

### A pályázatok értékelése

A pályázatokat a Társaság Elnöksége által felkért Kuratórium értékeli. A Kuratórium elnöke *Sükösd Csaba* egyetemi docens, tagjai *Görbe László* középiskolai tanár, *Jubász András* egyetemi docens, *Mester András* középiskolai tanár, *Rósa Géza* nyug. tanácsadó.

Az értékelés szempontjai (Öveges Díj Alapító Okirat 5.§):

<i>Szakmai</i> tartalom	max. 20 pont
<i>Könnyű</i> iskolai megvalósíthatóság	max. 12 pont
<i>Újdonságtartalom</i>	max. 10 pont
Kapcsolódás a <i>modern</i> fizikához	max. 10 pont
Alkalmasság <i>tanulói</i> kísérletre	max. 10 pont
Kapcsolat <i>nukleáris</i> ismeretekkel	max. 8 pont
<b>Összesen</b>	<b>max. 70 pont</b>

A pályázatra kapott pontok hozzáadódnak az előző években gyűjtött pontokhoz. Minden évben az a fizikatanár nyeri el a díjat, akinek a *pontversenyben a legtöbb pontja van*. Aki elnyerte a díjat, annak a pontjai nullázódnak. A következő években azonban továbbra is részt vehet a versenyben, pontokat gyűjthet, és a díjat ismét elnyerheti (Öveges Díj Alapító Okirat 3§).

*Sükösd Csaba*  
az Öveges Díj Kuratóriumának elnöke

## KÖNYVESPOLC

### Bódizs Dénes: ATOMMAGSUGÁRZÁSOK MÉRÉSTECHNIKÁI Typotex Kiadó, Budapest, 2006.

A Typotex kiadó több elméleti fizikai téma után egy olyan könyv megjelentetésére vállalkozott, amelyet elsősorban a kísérleti fizikusok és az egyetemek fizikus hallgatói használhatnak. A könyv az atommagsugárzások mérésének technikai lehetőségeit alapvetően a felhasználók szempontjából ismerteti. A témakör igen széles, ezért a szerzőnek a közepes mélységű áttekintés szintjére kellett korlátoznia a leírásokat, ami előnyt jelent azoknak, akik most ismerkednek a témával, hátrányt azoknak, akik valamelyik tárgyukorról részletesebb ismereteket kívánnak szerezni. Viszont az utóbbiaknak a közölt részletes irodalomjegyzék ebben is segítségük-

re lehet. Ilyen jellegű magyar nyelvű kiadvány az elmúlt két-három évtizedben nem jelent meg, s ezért nemcsak a kezdő szakemberek forgathatják eredményesen, hanem mindazok is, akik ionizáló sugárzások mérésével rendszeresen foglalkoznak a gyakorlatban is.

A könyv végigvezeti az olvasót a sugárzások mérésének teljes láncolatán. Minden mérés alapja a sugárzás és az anyag kölcsönhatása. A szerző ennek szenteli az első fejezet jelentős részét. Az alfa- és a béta-részecskéknek, a foton-sugárzásnak és a neutronoknak minden olyan tulajdonságát elemzi, amelyek ki-  
hatnak azok mérésére.

A második fejezet (*Általános detektorjellemzők*) csak az úgynevezett aktív (elektromos jelkimenettel rendelkező) detektorok általános elméletét írja le, nem foglalkozik – az általában csak a sugárdózis meghatározásra szolgáló – integráló (pl. termolumineszcens) detektorokkal.

A harmadik fejezet külön-külön tárgyalja a gáztöltésű, a szcintillációs és a félvezető detektorokat. Ebben a fejezetben található a neutrondetektorok is, függetlenül azok mérési elvétől, majd dióhéjban itt esik szó a szilárdtest-nyomdetektorokról és a termolumineszcens detektorokról.

Az elektronikus jelfeldolgozással foglalkozó negyedik fejezet részletesen ismerteti a mérések minőségének kulcskérdését, az elektromosimpulzus-formálást, bemutatva ennek számos lehetőségét, az egyes megoldások előnyeit és korlátait. Ez és a hatodik fejezet írja le a leggyakrabban használt elektronikus egységeket, illetve a komplett mérőberendezéseket.

A hatodik fejezet a nukleáris mérés technika legösszetettebb feladatával, a spektrometriával ismerteti meg az olvasót. Külön-külön foglalkozik az alfa-, a

béta- és a gamma-spektrometriával, a gyakorlatban jól használható útmutatást adva a mérési eredmények kiértékeléséhez is.

Külön tárgyalja a szerző (7. fejezet) a kis aktivitások és a nagy intenzitások mérés technikájának sajátosságait, majd a relatív és az abszolút mérési módszereket.

A könyv utolsó néhány oldala a mérőberendezésekre és a mérési módszerekre vonatkozó, ma már elengedhetetlen minőségbiztosítás módjait és kritériumait írja le.

Az irodalom csak általánosan van felsorolva, hivatkozások csupán az ábráknál és táblázatoknál találhatók. Ez a megoldás – elsősorban egyetemi tankönyvnél – megfelelőnek tekinthető, ugyanúgy mint a névmutató hiánya.

Összefoglalva: ez a kiadvány azoknak ajánlható, akik a nukleáris mérés technikával foglalkoznak, és jó áttekintést szeretnének kapni az egész területről, valamint hasznos segédanyag a felsőoktatás területén is.

*Deme Sándor*  
MTA KFKI AEKI

## Korom Erzsébet: FOGALMI FEJLŐDÉS ÉS FOGALMI VÁLTÁS Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 2005.

„Milyen erők hatnak egy feldobott pénzérmére a pályája adott pontjaiban?” „A feldobó erő nagyobb, mint a gravitáció, ezért felfelé mozog” válaszolta a megkérdezett gimnazista tanulók 50%-a. „Mi történik, ha egy levegővel teli lombik számára léggömböt erősítünk és a lombikot melegvízbe rakjuk?” „A meleg levegő elpárolog, oxigénné alakul, ami felfújja a léggömböt” válaszolta a 12. évfolyamos szakközépiskolások 13,5%-a. Ezek a tanulói tévképzeteket bemutató példák egy empirikus vizsgálat elemei, amely alapja *Korom Erzsébet: Fogalmi váltás és fogalmi fejlődés* című művének. A szegedi neveléstudományi kutatóműhely *Tanítás és tanulás* című sorozata (szerkesztő *Csapó Benő*) egy újabb kötettel gazdagodott, amelynek akár mottója is lehet a fenti idézet. A természettudományos oktatás minden szintjén – az iskolába lépéstől a felsőoktatásig – felmerülnek azok a kérdések, amelyek a kötet témáját, célkitűzését megfogalmazzák: Miként gyarapszik, fejlődik az iskolai évek alatt a tanulók fogalmi készlete? Miért nem tudják a tanulók ismereteiket hatékony rendszerré szervezni? Miért különül el a tanulók iskolai és hétköznapi tudása? Milyen tanítási módszerekkel lehet elősegíteni az ismeretek megértését, hatékonyabb rendszerré szervezését?

„A tanuló tudását befolyásoló legfontosabb tényező az, amit a tanuló már tud. Meg kell ismerni azt, és aszerint kell tanítani.”  
*D.P. Ausubel*

Ezekre a kérdésekre fűzi föl mondandóját Korom Erzsébet a nemzetközi és a hazai kutatási eredményeket bemutató művében. A szerző, aki a téma elismert kutatója, hiánypótló, a gyakorló pedagógusok számára is felhasználható, értékes művet alkotott. A logikus felépítésű kötet öt fejezetből áll, az első összefoglalja a tanulók ismereteit, meggyőződéseit feltáró kutatások előzményeit. A szelektált, a téma szempontjából meghatározó, a kutatás fejlődésében lényeges „szereplők”, irányzatok célirányos bemutatása során megismerhetjük többek között *Brunner*, *Ausubel*, *Piaget*, *Vigotszkij* nézeteit, a poszt-pozitívista filozófia hatását, a kognitív pszichológia eredményeit, a konstruktív tanuláselmélet jellegzetességeit. „Mind a tévképzetek kezelése, mind pedig a fogalmi váltás kutatása erőteljesen széttagolt, szerteágazó” összegzi a szerző a nemzetközi szakirodalom sokszínűségét. Ezt támasztja alá a következő fejezet is, amelyben a tévképzetkutatás jelen irányzatait ismerhetjük meg. Már az angol elnevezéseknek megfelelő magyar szakkifejezések sokasága (pl. tévképzet, naiv elmélet, előzetes elképzelés, gyermektudomány, alternatív keret, intuitív fogalom, ... stb.) mutatja, hogy nincs általánosan elfogadott definíció és még inkább nincs általános módszer, recept a kezelésre. A magyar tanulók köré-

ben végzett, a megértési nehézségeket feltáró empirikus kutatások eredményeként „kirajzolódik”, hogy a tanulóknak már az iskolába lépéskor elképzelésük van a világról (ún. gyermeki „világmagyarázatok”), a tévképzetek széles körben elterjedtek, kortól, nemtől, képességtől, nemzetiségtől függetlenül jelen vannak, a tévképzetek kitartóak, hagyományos módszerrel nem változtathatók, változatos forrásból származhatnak. A tanulói tévképzetek gyakran túlhaladott tudománytörténeti nézetekhez hasonlítanak, és a tévképzetek gátolhatják a tanulást. A harmadik, a fogalmi fejlődés és a fogalmi váltás kutatását elemző fejezetben a tanulás, mint fogalmi váltás funkcióját járja körbe a szerző, kitérve azokra a feltételekre, amelyek a fogalmi váltáshoz („lecserélés”) szükségesek: a tanulói elégedetlenség előidézése (kognitív konfliktus), az új fogalom érthetősége (konzisztens és koherens). Az új fogalomnak hihetőnek, valószínűnek kell tünnie, az új fogalomnak azt kell „sugallnia”, hogy hasznos lesz a későbbi vizsgálódás során. Ebben a fejezetben ismerhetjük meg a fogalmi fejlődés, fogalmi váltás kognitív fejlődés-lélektani kutatásait, amelyek konkrét témákhoz, tantárgyi tartalmakhoz kötődnek (pl. az intuitív számfogalom, intuitív biológia, intuitív anyagfogalom, mentális modellek az „Univerzum”-ról). Az elméletek és a legújabb irányzatok a fogalmi váltást befolyásoló tényezőket (kontextus, szituáció, motiváció hatása) vizsgálják.

A kötet terjedelemben és a természettudományos nevelés szempontjából legjelentősebb fejezete a szerző PhD-dolgozatán alapuló, a 12–18 éves tanulók részecskeszemléletének fejlődését vizsgáló kutatását összegzi. A természeti-technikai környezetet magyarázó anyagszerkezeti kép helyes, tapasztalatokon alapuló, a tanulók életkorának megfelelő kialakítása az egyik legfontosabb feladata az iskolai természettudo-

mányos oktatásnak. A kutatás alapját képező kérdések: Mennyire ismerik a részecskemodell a 6–8–10–12. osztályos tanulók? Azonos mértékben értik-e a részecskemodell a gázok, folyadékok és a szilárd anyagok esetén? Hogyan alkalmazzák a részecskemodell egyszerű jelenségek magyarázatában? A részecskemodell alkalmazásában szerepet játszik-e a kontextus? Melyek a leggyakrabban előforduló hibás elképzelések, tévképzetek? Hogyan változik a tévképzetek jellege és aránya az életkorral? Van-e összefüggés a részecskeszemlélet megértését vizsgáló teszten elért teljesítmény és más változók (tanulmányi átlag, tantárgyi attitűd, szociális háttér) között? Az izgalmas kérdésekre hiteles, néha meglepő válaszokat találunk, amelyek a mindennapi tanításhoz is hasznos segítséget adnak.

Ugyancsak közvetlenül hasznosítható a könyv 5. fejezete, amelyben az ismeretek tanításának módszertani kérdéseit taglalja a szerző. Ez a téma egy külön kötetet is megérdemelne, hiszen a tévképzetek felismeréséhez és kezeléséhez „nincs királyi út”, és a megszokott, hagyományos módszertani repertoár nem elegendő. Szükség van, többek között, a tanulók előismereteinek feltárására, a fogalmi fejlődés nyomon követésére, lehetőséget kell biztosítani arra, hogy a tanulók megismerjék saját meggyőződéseiket és társaik elképzeléseit, módszert kell találni a kognitív konfliktus kezelésére, a tanulói és a tudományos nézetek ütköztetésére, a tanulók meglévő tudásának felhasználására az új ismeret tanítása során. Külön figyelmet kell fordítani a tudománytörténeti ismeretek tanítására.

Ajánlom e nagyszerű kötetet a természettudományos nevelés szemléletváltásra képes „szolgálóinak” (kutatóknak, tanároknak, oktatóknak, taneszköz-fejlesztőknek, tantervkészítőknek, tankönyvíróknak) és, elsősorban, tanárszakos hallgatóknak!

*Papp Katalin*

## HÍREK – ESEMÉNYEK

# AZ AKADÉMIAI ÉLET HÍREI

## Felhívás a Magyar Tudomány Ünnepe 2007. évi megrendezésére

Tanúsítva, hogy a jó kezdeményezések könnyen és gyorsan szilárdulnak tradíciókká, az 1997-ben indult Magyar Tudomány Napja az évek során egyre életerősebb rendezvénysorozattá vált. 2003-ban már a Magyar Tudomány Ünnepeként, vagyis mai nevén aratott széles körű sikert. Célja ma is az, hogy – mint az MTA elnöke, *Vizi E. Szilveszter* fogalmazott – „a közfigyelem előterébe állítsa a tudományt”.

A Magyar Tudományos Akadémia, a szaktárcák, a társadalmi intézmények, a tudományos szervezetek

közreműködésével 2007-ben is ezt a célt kívánja megvalósítani, de tartalmi és formai újításokkal óhajtja fűszerezni a hagyományos tudománynépszerűsítést.

A 2007. évi rendezvénysorozatra november 3. és november 30. között kerül sor. A központi téma az idejé esztendőben: „A tudomány iskolája”. Ez a megjelenés egyszerre utal a tudományban való elmélyedés iskolai lehetőségeire, illetve magának a tudománynak a közvéleményt „iskolázó” potenciáljára. A téma magába foglalja a tudomány és az oktatás, a tudo-

mány és a közgondolkodás teljes kérdéskörét, a közoktatástól a felsőoktatáson át a kutatóintézetek oktatói szerepéig.

Az európai szintéren egyre népszerűbbé váló tudományos fesztiválok mintájára a Magyar Tudomány Ünnepe idei rendezvényei is fesztiválszerűbbek lesznek. A nyitó és a záró rendezvény kivételével, amelyek a magyar tudományosság legelismertebb tekintélyei lesznek a főszereplők. Maga a rendezvény-sorozat az érdeklődő – akár kamaszkorú, középiskolás – közönséghez szól már azzal is, hogy lazább, színesebb, játékosabb tudománynépszerűsítő formákat választ.

Elődleges információs fórumunk az elmúlt években már megszokott módon a [www.tudomanyunnepe.hu](http://www.tudomanyunnepe.hu) in-

ternetes oldal lesz, és a rendezvények adatbázisát is az internetes jelentkezések alapján állítjuk össze.

A tudománynak a nagyközönséghez való eljuttatása nélkülözhetetlen ahhoz, hogy a kutatás, az innováció elnyerje a neki kijáró rangot, és ahhoz is, hogy minél több korosztályban ébredjen fel a vágy a világban való tudományos eligazodásra. Aki a tudást, a tudományt választja, az a jövőt választja. Korántsem véletlen, hogy a World Science Forum Budapest 2007. évi vezérgondolata is éppen ez lesz.

A magyar tudomány és tudásátadás minden egyes művelőjét és népszerűsítőjét felhívjuk, hogy ötleteivel, munkájával járuljon hozzá a rendezvénysorozat sikeréhez! Így válhat a magyar társadalom igazi tudományos fesztiváljává a Magyar Tudomány Ünnepe!

## Akadémiai Ifjúsági Díj

Az MTA főtitkára által alapított *Akadémiai Ifjúsági Díjat* 2007-ben a következő fiatal kutatók nyerték el a fizikai tudományok területén kiemelkedő munkájukkal:

ELEKES ZOLTÁN (ATOMKI): *A valencianeutronok lecsatolóadásának jelensége*

HARTMANN PÉTER (KFKI SZFKI): *Plazmafizika alapfolyamatok számítógépes szimulációja*

KOÓS ANTAL ADOLF (KFKI MFA): *Szén nanocsövek előállítására és vizsgálata*

ZÓLYOMI VIKTOR (KFKI SZFKI): *Nanocsövek elektroszerkezete*

VÉRTESI TAMÁS (ATOMKI): *Kvantummechanikai összefonódottság, kísérleti kimutatása és informatikai vonatkozásai*

## Statisztikus fizikai nap

Az MTA Fizikai Tudományok Osztálya Statisztikus Fizikai Bizottsága és az Eötvös Loránd Fizikai Társulat Statisztikus Fizikai Szakcsoportja 2007-ben is megszervezi a hagyományos Statisztikus Fizikai Napot, amelynek célja, hogy 5–10 perces előadások keretében áttekintést nyújtson a hazai statisztikus fizikai kutatásokról.

Ebben az évben két hosszabb, áttekintő jellegű előadás hangzik majd el a reggeli és a délutáni blokk elején:

*Derényi Imre* (ELTE): *Sejtstruktúrák fizikája.*

*Csordás András* (ELTE–MTA): *Csapdázott szuperfolyékony Fermi-gázok univerzális jellemzői.*

Időpont: 2007. április 11. szerda (előreláthatólag de. 9-től du. 5-ig.)

Helyszín: ELTE Bolyai Kollégium, 1117 Budapest, Nándorfejérvári út 13. Előadóterem.

Részvételi díj nincs, szállásról egyénileg kell gondoskodni.

Bővebb információ és regisztráció a <http://www.szfk.hu/statfiznap/> weboldalon.

## Atomerőmű-bemutató az Akadémián

2007. március 9-én a Magyar Tudományos Akadémián bemutatták a világ legújabb atomerőmű-építési technológiáit. A rendezvény apropóját az energiatermelés kihívásai adták, különös időszerűségét pedig az, hogy előbb-utóbb Magyarországnak is döntenie kell hosszabb távú energiaellátásának módjáról. Magyarországon az orosz Atomsztróexport cég által kínált technológia korábbi változata szerint működő, szovjet tervezésű, második generációs nyomottvízes reaktor termel áramot. Az Atomsztróexport most ennek továbbfejlesztett változata, a VVER-1200/491 reaktorral szerelt NPP-2006-os atomerőmű működését és előnyeit ismertette a konferencián, kifejezetten Magyarországnak ajánlva.

Európában jelenleg a francia Areva cég a legaktívabb, Finnországban és Franciaországban jelenleg is épít európai nyomottvízes reaktort. A cég kifejlesztette a biztonságosabb, forralóvízes reaktor technológiáját is.

Magyarországon a paksi atomerőmű adja az ország villamosenergia-termelésének mintegy 40 százalékát, de a létesítmény öregszik. Felújítása, kapacitásainak bővítése folyamatban van, hogy üzemidejét később meg lehessen hosszabbítani. Enélkül mintegy 2000 megawattnyi új áramtermelő kapacitást kellene létrehozni, állapította meg tavaly decemberben a gazdasági tárca mellett működő energetikai bizottság. A



bizottság szakértői szerint azonban a növekvő hazai energiaigény kielégítésére és a szintén öreg, bezárandó hagyományos erőművek pótlására is újabb kapacitásokra lesz szükség. A megoldásra számos elképzelés van, a mátrai erőmű egy újabb lignittüzelésű egységgel bővülne, Kelet-Magyarországon két hazai vál-

lalkozás is (az EMFESZ és a System Consulting) létesítene gáztüzelésű erőművet, sőt szó van egy tározós vízerőmű építéséről is. Nyilván születnek majd újabb tervek is, a bizottság tagjainak többsége szerint azonban fontolóra kell venni egy újabb atomerőművi blokk építését is.

## HÍREK ITTHONRÓL

### Felhívás

Nemzetközi konferencia rendezéséhez támogatást lehet kérni a Tiszta és Alkalmazott Fizikai Uniótól (IUPAP).

A kérelem beadási határideje 2007. május 1.

További információ található a <http://www.iupap.org/conferences/applform.html> weblapon.

A támogatás kérése előtt célszerű felvenni a kapcsolatot *Janszky Józseffel* ([janszky@szfki.hu](mailto:janszky@szfki.hu)).

Fejlődő országbeli, illetve kelet-európai fizikus hölgyek részére mód van egy másik forrásból is támogatást kérni, ennek részletei a <http://www.iupap.org/wg/wip/travelgrants-07.html> honlapon található!

## IV. Budapesti Szkeptikus Konferencia

2007. február 24-én rendezték meg a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Fizikai Intézetében a IV. Budapesti Szkeptikus Konferenciát, melynek fővédnöke *Vizi E. Szilveszter* akadémikus, a Magyar Tudományos Akadémia elnöke, sajtófővédnöke *Vince Mátyás*, a Magyar Távirati Iroda elnöke volt. A konferencia arra a kérdésre összpontosított, hogy milyen mértékben hatol be oktatásunkba az áltudomány, és hogyan lehet ez ellen fellépni.

A Konferenciát *Kertész János* akadémikus, a BME Fizikai Intézetének igazgatója nyitotta meg. Beszédéből az alábbi részletek érdemelnek különleges figyelmet:

„...nemcsak az örültek megszállottságával és pénz-sóvár szélhámosok angolna-ügyességével kell megbirkózni, hanem a tőkeerős média nehéztüzelésével is. És fontos, mert az áltudomány megrendíti a tudományba vetett bizalmat, súlyos anyagi veszteségeket okoz a tájékozatlanoknak, sőt egészségüket, esetenként életüket veszélyezteti...”

Az áltudományok feltartóztathatatlanul látszó terjedését nem utolsó sorban az okozza, hogy az oktatás nem képes ellátni azt a felvilágosító szerepet, amellyel felvértezhetné az állampolgárokat a rájuk zúduló áltudományos nyomással szemben. A közoktatásban a természettudományok elkésztő módon visszazorultak, de a felsőoktatás színvonalában is nagy ingadozásokat észlelhetünk. Az idei konferencia az oktatás szerepének, felelősségének a kérdésére összpontosít.”

A konferencia „sztárvendége” *James Randi*, a világ-hírű bűvész és skeptikus volt, aki video-üzenetben üdvözölte a résztvevőket. Az ő szavai közül is fontos kiemelni a következőket:

„...A televízióban és az írott sajtóban világszerte szinte megállás nélkül folyik mindenféle nonszensz és az irracionalitás terjesztése, és ez sokkal nagyobb

népszerűségnek örvend, mint a hiteles beszámolók a tényekről. Az úgynevezett tudományos műsorok színvonalára, legalábbis nálunk az Egyesült Államokban – nem tudom Önöknél ez hogyan van – olyan mélypontra süllyedt, hogy szinte mindenféle babonát és ostobaságot felkarolnak, amit csak el lehet képzelni. Ezért pedig a médiát terheli a felelősség...”

A babonákkal, az irracionalitáson és a műveletlenségen alapuló elképzelésekkel, tévhitekkel, amelyek a médiában szinte egész nap és minden egyes nap jelen vannak, fel kell vennünk a küzdelmet. Ez kifejezett veszélyt jelent a civilizáció számára, ami felett nem szabad könnyedén elsiklani, éppenséggel nagyon is komolyan kell vennünk! Fel kell lépünk a félretájékoztatás és a tudatlanság ellen. Ez pedig alapvetően az oktatás problémája...”

Az oktatás egyike a legfontosabb eszközeinknek, amely a Földön létező összes más fajtól alapvetően megkülönböztet bennünket. Az a tény, hogy rendelkezünk szervezett, tudományos alapokon nyugvó oktatással, amely megtanít bennünket arra, hogyan oldjuk meg a problémáinkat, más szóval, hogyan nézzünk a világra, a lényege mindennek! A világot szenvedélyektől mentesen, őszinte szándékkal és minden korlátozás nélkül kell szemlélni. A valóságos világot kell vizsgálni! Ezért tegyenek meg mindent, mint skeptikusoknak, minden cselekedetüknek azt kell hangsúlyoznia, hogy az oktatás-nevelés minden másnál fontosabb.”

A konferencia programjában a hazai tudományos közössége kiemelkedő képviselői szerepeltek, az előadások témáját az szervezők a nagyközönség érdeklődésének megfelelően állították össze.

A részletek iránt érdeklődők az előadások anyagát letölthetik a konferencia <http://szkeptikus.bme.hu> honlapjáról.

## Atomi vastagságú széntranzisztor lehet a szilíciumtranzisztor utóda

A legkisebb hagyományos, szilícium alapú, tranzisztoroknál négyszer kisebb és jóval hatékonyabb tranzisztorok készíthetők egytized nanométer vastagságú szénrétegekből – állítják a kutatók. Más nanoméretű tranzisztorokkal ellentétben ezek az új alkatrészek nem igényelnek sem bonyolult technológiát, sem pedig különleges hűtést. Ezeket a tranzisztorokat grafénből – egy atomnyi vastagságú szénatom-hálózatból készítik. A grafit ilyen grafénrétegek együttese, a nanocsövek pedig egy-egy grafénréteg feltekerésével keletkeznek. A grafén sokkal jobb vezető, mint a fémek, mivel benne az elektronok nem szóródnak az atomokon, az atomok között egyenes vonalban mozoghatnak. Emiatt kisebb fogyasztású és gyorsabb elektronikus eszközök készíthetők belőlük. Az első

graféntranzisztor 2004-ben hozták létre, azonban abból elszivárgott az áram, és nem lehetett kikapcsolni, mivel az elektronok igen könnyen átugrottak az egyik szénatomról a másikra. *Andre Geim*nek és kollégáinak a Manchesteri Egyetemen sikerült ezeket a hiányosságokat kiküszöbölni, és egy „nanoszalagnyi” grafénből létrehozni egy 10 nanométer széles és egytized nanométer vastag réteget. Az új tranzisztor szobahőmérsékleten működik, és viszonylag könnyű előállítani. A berendezés lelke, a grafénszalag elektronsugaras litográfia alkalmazásával vágható ki egy grafénlemezéből, hasonlóan a szilíciumtranzisztoroknál használatos technikához. Geim szerint „a grafénnek minden esélye megvan arra, hogy a szilícium utóda legyen”. (<http://www.newscientist.com>)

### MINDENTUDÁS AZ ISKOLÁBAN

## SZÉN NANOCÖVEK

A jövő – és részben már a jelen – ígéretes anyagai

Napjainkban egyre többet hallani a nanotechnológiai forradalomról. Nem is olyan régen a miniaturizálásban a csúcst a olyan szilíciumalapú mikrocsipek jelentették, amelyekben a legkisebb elemek az ezredmilliméter tartományába estek. A tudomány fejlődése következtében azonban ma már a milliméter milliomodrészénél is kisebb méretű objektumokat, azaz akár magukat az egyes atomokat is látni, sőt manipulálni tudjuk. Mindez az anyagvizsgálati módszerek, elsősorban az elektronmikroszkópok, illetve a különböző pásztázó tűszondás mikroszkópok (pásztázó alagútmikroszkóp = scanning tunneling microscope = STM; pásztázó atomerő mikroszkóp = atomic force microscope = AFM) hihetetlen fejlődésének köszönhető.

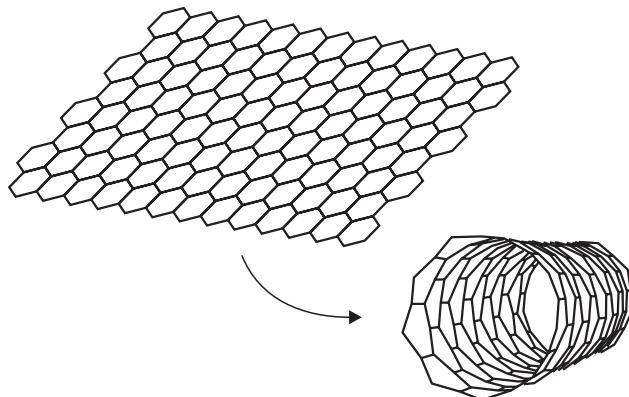
A szemünk láttára kibontakozó és széles terület felölelő nanotechnológiában kulcsfontosságúak a *szén nanocsövek*. Az egyfalú szén nanocső egy nagyon kis átmérőjű, belül üres egyenes henger, amelynek a „falán” helyezkednek el a szénatomok. Elnevezésük onnan ered, hogy a henger átmérője a nanométeres tartományba esik, vagyis ezek a csövek négy nagyságrenddel vékonyabbak az emberi hajszálnál (1. ábra). Ez azt jelenti, hogy a kerületen, a cső tengelyére merőlegesen körbehaladva legfeljebb néhányszor tíz szénatomot találunk. Ugyanakkor hosszuk tipikusan több tíz- vagy százezerszer nagyobb vastagságuknál.

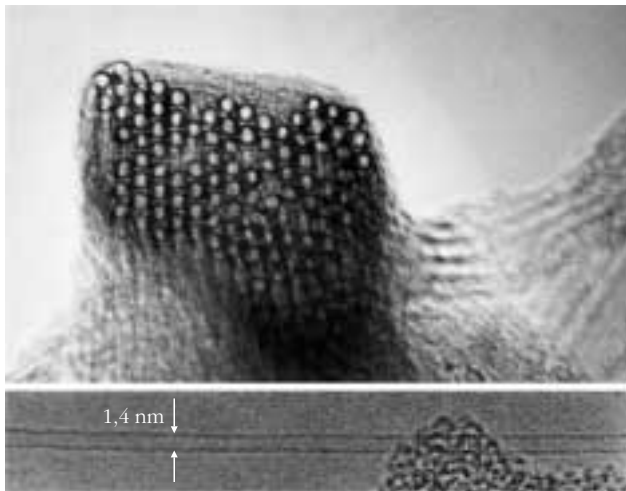
Szén nanocsöveket először fullerének előállítása során figyeltek meg, 1991-ben. Az ívkisüléssel elpárologtatáshoz használt grafitrúd felületén keletkezett

kormot vizsgálták elektronmikroszkóppal. A felvételeken koncentrikusan egymásba ágyazott csöveket lehetett látni, amelyek száma esetenként a tízet is meghaladta. Az ilyen többfalú szén nanocsövek külső átmérője 2 és 20 nm közé esik, a szomszédos falak távolsága  $\approx 0,34$  nm, vagyis megegyezik a grafit párhuzamos rétegei közötti van der Waals-távolsággal.

A kutatások a 90-es évek közepén lódultak meg, amikor lehetővé vált egyfalú szén nanocsövek előállítása megfelelő katalizátorral adalékolt grafit lézeres elpárologtatásával. A szén nanocsövek előállítása manapság leggyakrabban valamilyen széntartalmú gáz katalitikus elbontásával (chemical vapor deposition = CVD) történik. Ennél az eljárásnál a katalizátorrészeknek

1. ábra. Szén nanocső származtatása hatszögös rács feltekeréséből





2. *ábra.* Transzmissziós elektronmikroszkópos felvétel egyfalú szén nanocsövekből álló kötegről (felül), illetve egy magányos egyfalú szén nanocsőről (alul). (*Science* 273 (1996) 483)

egy hordozóra való megfelelő ráhelyezésével a létrejövő mintázat akár tervezhető is, például egyenletes sűrűségű „erdő” hozható létre szén nanocsövekből. Előállítottak már centiméteres hosszúságú nanocsövekből álló erdőt is, gyufaskatulya-méretben.

A körülményektől függően az egyfalú szén nanocsövek összeállhatnak van der Waals-erők által összehúzott kötegekké, de lehetnek izolált csövek is (2. *ábra*). A cső vége lehet nyitott vagy zárt. Az utóbbi esetben a csövet lezáró „sapka” ötszögeket is tartalmaz. Egy hosszú cső tulajdonságait azonban a henger palástján hatszögekbe rendeződő szénatomok határozzák meg. Az egyfalú szén nanocsövek nemcsak az átmérőjükben különböznek, hanem ezeknek a hatszögeknek a henger falán való elhelyezkedésében is. Annyiféle egyfalú szén nanocső létezik, ahányféleképpen képzeletben(!) kivághatunk és hengerré hajthatunk egy téglalapalakú csíkot egy síkbeli hatszöges rácsból (1. *ábra*). Ezt a feltekerési- vagy kiralitási vektorral szokás jellemezni, ami egy a feltekerés után fedésbe kerülő szénatompárt összekötő vektor az eredeti hatszöges rácson. Bármely egyfalú szén nanocső egyértelműen megadható két egész számmal, az  $(n, m)$  kiralitási indexekkel, ami a kiralitási vektornak a hatszöges rács két primitív vektorára vonatkozó komponense. Ha  $n = m$ , akkor bizonyos szén–szén kötések merőlegesek a cső hossz tengelyére, ezek a karosszék csövek (3.a *ábra*), ha valamelyik index nulla, akkor bizonyos szén–szén kötések párhuzamosak a cső hossz tengelyével, ezek a cikk-cakk csövek (3.b *ábra*). Ezekben a speciális esetekben léteznek a csőnek tükörsíkjai. Az általános esetben  $(n \neq m \neq 0)$  nincs tükörsík, ilyenkor királis csőről beszélünk (3.c *ábra*).

Az egyfalú szén nanocsövek tulajdonságai – a görbületi effektusok elhanyagolásával – jól közelíthetők a szabályos hatszöges szénrác, a grafén tulajdonságaiból kiindulva. Ezt hívják zónahajtogatásos közelítésnek. Belátható például, hogy – az egészen kis átmérőjű csövektől eltekintve – ha  $(n-m)/3$  egész szám, akkor a cső fémes, ellenkező esetben szigetelő.

A 0,4–0,8 nm átmérőtartományban azonban a nagy görbület miatt már jelentős eltérések adódnak a zónahajtogatásos módszer eredményeitől.

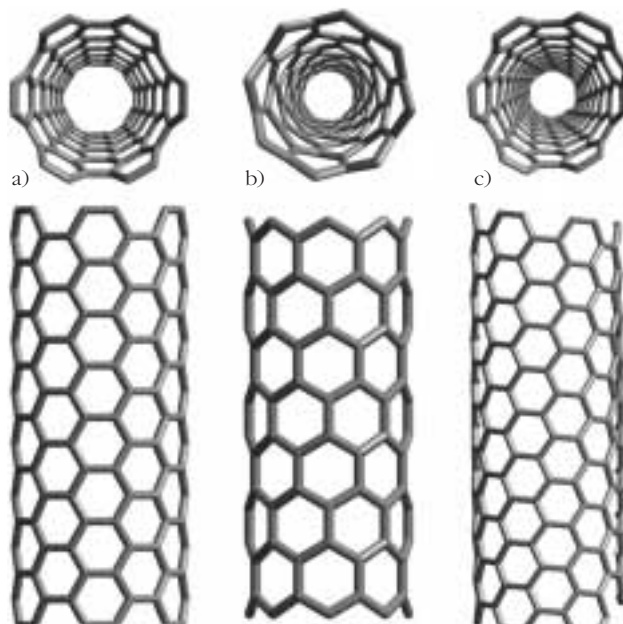
A szén nanocsövek alkalmazása szempontjából az egyik legnagyobb problémaként azt szokás említeni, hogy az egyfalú szén nanocsövek célzott, szelektív előállítása jelenleg még nem megoldott. Ez kétségtelenül igaz, de hozzá kell tenni, hogy sok olyan alkalmazás van, ahol a jól definiált kiralitás valójában nem is szempont, elegendő például a fémes, illetve szigetelő csöveket utólag szétválasztani.

## Mire jók a szén nanocsövek?

A szén nanocsövek vizsgálata sokat segíthet abban, hogy jobban megértsük az atomok viselkedésének a kvantumfizika által vezérelt törvényszerűségeit. Alakjuknál és méretüknél fogva alkalmasak mezoszkopikus jelenségek, például a ballisztikus vezetés vizsgálatára. Továbbá olyan, az egyszimulációs fémekben fellépő, korrelált elektronokra jellemző „egzotikus” állapotok tanulmányozhatók bennük, mint a Luttinger-folyadék állapot. Ebben a cikkben azonban azt szeretnénk bemutatni, hogy a szén nanocsövek különleges elektromos, mechanikai és kémiai tulajdonságai milyen alkalmazási lehetőségekkel kecsegtetnek. Csokorba gyűjtötünk néhány fontos, részben már létező, részben még csak kísérleti stádiumban lévő alkalmazást.

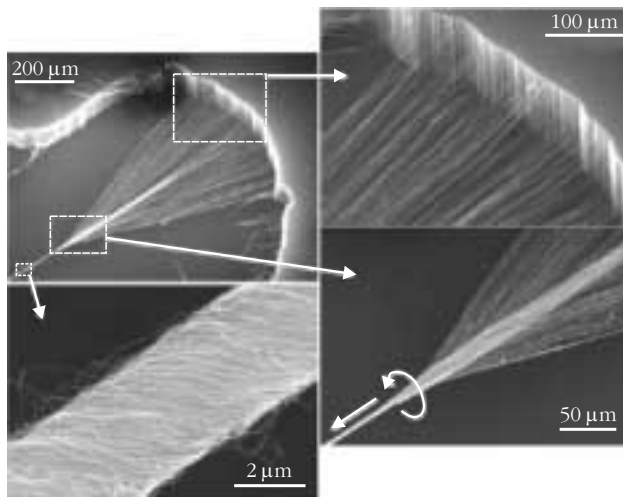
A szén nanocsövek nagyon hegyes képződmények: hosszuk tipikusan több ezerszer nagyobb az átmérőjüknél. Mindenki ismeri a „villámhárító effektust”. Nos, a szén nanocsövek végénél már viszonylag kis feszültség hatására nagy elektromos térerősség alakul ki, ami könnyedén szakít ki elektronokat a nanocsövből. Ezen elektronok segítségével azután sokféle eszköz működtethető, például egy lapos kijelző, vagy

3. *ábra.* Karosszék cső (a), cikk-cakk cső (b) és királis cső (c)





4. ábra. Szén nanocső téremissziós elektronforrással működő hordozható röntgenspektrométer



5. ábra. Szupererős szén nanocső fonal szövése szén nanocsövekből álló „szőnyegből”. (*Science* 306 (2004) 1356)

egy hordozható röntgenkészülék. Míg a szén nanocsöves, hidegkatódos, hordozható röntgenspektrométerek már megjelentek a piacon (4. ábra), a lapos képernyőkkel még csak a prototípusoknál tart a Samsung, illetve a Motorola cég. A szén nanocső katódos lapos képernyő jellemzője a nagy felbontású, éles kép és a nagy fényerő. Előnye a plazmatévével szemben, hogy könnyű, kicsi a felvett teljesítmény, és a pixelek nem égnek be. Előnye az LCD-vel szemben a nagyobb fényerő, hogy bármilyen látószögből jól látható, a pixelek pedig nagyon gyorsan kapcsolhatók.

A szén nanocsövek mechanikai tulajdonságai is különlegesek. Szakítószilárdságuk példa nélküli, 75-ször nagyobb az acélénál, de még a régebből ismert szénszálaknál is 10–15-ször erősebbek. Ugyanakkor sűrűségük csak hatoda az acélénak. Mindez rendkívül kedvező lehetőségeket teremt könnyű és nagyon erős anyagok előállítására. A szén nanocsövekkel erősített műanyagok egy napon a könnyű és erős kompozitok új családját jelenthetik, amelyek különösen a gépkocsi- vagy repülőgépgyártásban válhatnak nélkülözhetlenné. Luxusalkalmazásokban már ma is léteznek: a 2006-os Tour de France kerékpárverseny győztese például olyan biciklit használt, amelynek a szénszálás vázát szén nanocsövekkel tovább erősítették. A rendkívül erős váz mindössze 1 kg-ot nyomott.

Szén nanocsövekkel ígéretes eredményeket értek el a mesterséges izom kutatása terén is. Az alapjelenség a nanocső nyúlása, illetve rövidülése a rávitt elektromos töltés függvényében. Néhány voltnyi elektromos feszültség hatására az emberi izomnál sokkal nagyobb húzófeszültség kifejtésére képesek. Ha ehhez hozzávesszük, hogy a piezokerámiákkal ellentétben nem törékenyek, érthető, miért kísérleteznek több helyen is a szén nanocsövek mechanikai működtető szerkezetként, aktuátorként való alkalmazásával.

A szén nanocsöveket, bármilyen hihetetlen, szupererős fonalakká lehet fonnai polivinilalkohol segítségével (5. ábra). A néhány mikron átmérőjű szálak hossza akár 100 méter is lehet. Az ilyen erős fonalból szőtt ruhaanyagok mechanikailag ellenállóbbak lehetnek bármely más ismert természetes vagy mesterséges anyagnál. Az anyagok szívósságát szokás azzal a

tömegegységre jutó energiával jellemezni, amit az anyag még szakadás vagy törés nélkül képes elnyelni. A szén nanocső fonalakra 570 kJ/kg értéket mértek, ami húszszor nagyobb a golyóálló mellényekben jelenleg használatos kevlarra, és háromszor nagyobb a legszívósabb természetes anyagra, a pókselyemre vonatkozó értéknél. Egy ilyen anyagból készült rendkívül könnyű golyóálló mellény valóságos – a *Gyűrűk urából* ismert – „mithril láncing” lenne. Hogy a kard se maradjon ki, megemlítjük, hogy nemrégiben fény derült a szaracénok híres, damaszkuszi acélból kovacsolt kardjának titkára. Egy XVII. századi kard elektronmikroszkópos vizsgálatából megállapították a kutatók, hogy – valószínűleg a speciális kezelés következtében – a kard éle szén nanocsöveket (és szénszálakat) is tartalmazott, és nem lehetetlen, hogy ennek köszönhette bámulatos mechanikai tulajdonságait.

Említést érdemel egy egzotikus, talán soha meg nem valósuló ötlet: az űrlift. Ennek a lelke egy olyan kábel lenne, amelynek egyik vége a Föld felszínén, valahol az Egyenlítőn lenne rögzítve (esetleg egy úszó tengeri szigeten), a másik vége pedig, a hozzá kötött ellensúllyal, túllógna a körülbelül 36 ezer kilométeres geostacionárius magasságon. A centrifugális erő miatt kifeszülő kábelben mozgó lift segítségével a jelenlegi rakétás technikánál olcsóbban lehetne tárgyakat, illetve embereket az űrbe juttatni. Egy űrlift elkészítése és üzemben tartása (ha egyáltalán lehetséges) manapság még horribilis összegbe kerülne. Mindenesetre, a jelenleg ismert anyagok közül az ehhez szükséges mechanikai igénybevételt egyedül a szén nanocsövek bírják ki, egy ekkora hosszúságú acélsodrony például a saját súlya alatt elszakadna. Érdekességként megjegyezzük, hogy egy ilyen űrliftet *Arthur C. Clarke* már 1979-ben, a *The Fountains of Paradise* című novellájában leírt, amelyben a kábel egy speciális szénszál(!) volt.

A szén nanocsövek elektromos szempontból is érdekesek. Vannak közöttük fémes és félvezető tulajdonságúak is. Mindkét csoport nagyon fontos a jövőbeli nanoelektronikai alkalmazások szempontjából. Egyedi nanocsövekből már készítettek olyan áramkö-

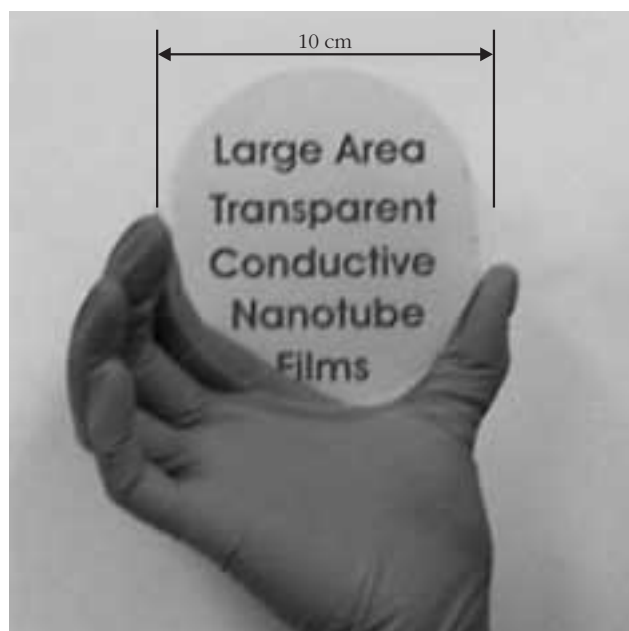
röket (tranzisztorokat, logikai kapukat), amelyek mindazt tudják, ami, mondjuk, egy számítógép működéséhez szükséges. Ne feledjük, egy nanocső tranzisztor több mint százszor kisebb a jelenlegi legkisebb szilícium alapú tranzisztornál.

A jó elektromos vezetőképesség együtt jár a jó hővezető-képességgel. A szén nanocsövek – a fononok nagy szabad úthossza miatt – a legnagyobb hővezető-képességű anyagok közé tartoznak. Szobahőmérsékleten, a cső hossz tengelye irányában 15-ször jobban vezetik a hőt, mint a réz. Kísérletek szerint sokkal jobb hőkontaktust biztosítanak például egy processzor és hűtőbordája között, mint a jelenleg használatos hővezető paszták.

Nemrégiben kiderült, hogy megfelelő eljárással ultravékony, hajlékony, átlátszó, ugyanakkor elektromosan vezető film készíthető egyfalu szén nanocsövekből. Ezek a filmek hordozóra is fölvihetők, de önhordóak is lehetnek (6. ábra). A fényt áteresztő vezető anyagok az elektrooptikai alkalmazások szempontjából – egyebek között érintőképernyőként, illetve napelemekben – rendkívül fontosak. Erre a célra jelenleg a legerterjedtebb az ITO (indium-ón(tin)-oxid). Hasonló elektromos ellenállás esetén a hajlékony, átlátszó szén nanocső film fényáteresztő képessége a látható tartományban összemérhető a törékeny ITO-éval, a 2–5  $\mu\text{m}$  infravörös tartományban pedig lényegesen jobb nála.

Egyelőre kísérleti stádiumban vannak szén nanocsövekből álló olyan membránok, amelyek – a nanométeres átmérőjű csövekben történő áramlások tulajdonságai miatt – alkalmasak különböző molekulák hatékony szétválasztására. A szén nanocsövek folyadékáteresztő képessége a mérések szerint több tízezerszer nagyobb, mint ami a klasszikus egyenletek

6. ábra. 80 nm vastagságú, egyfalu szén nanocsövekből álló film, zafír hordozón. Az olvasható szöveg a film mögött van. (*Science* 305 (2004) 1273)



alapján várható. Remények szerint 5–10 éven belül piacra kerülhetnek olyan szén nanocsöves membrán-szűrők, amelyekkel minden eddiginél olcsóbban lehet tengervízből ivóvizet előállítani. Az ilyen membránok segítségével – egyebek mellett – talán lehetséges lesz a szén-dioxid kiszűrése is így a káros kibocsátások mérséklése is. Elképzelhető folyadékáramlások kibekapcsolása is a nm-es tartományban.

A nanocsövek belsejébe a nyitott végükön viszonylag könnyen be lehet juttatni különböző molekulákat. A nanoborsók például belsejükben fullerén molekulákat tartalmazó szén nanocsövek. A szén nanocsövek további fontos tulajdonsága, hogy a külsejükre rá lehet kötni különféle oldalcsoportokat. A funkcionizált endohedrális nanocsövek pedig esetleg olyan nanokapszulaként szolgálhatnak majd, amelyek segítségével például, a külső funkciós csoporttól függően, gyógyszermolekulákat célzottan lehetne eljuttatni a szervezeten megadott helyére.

A funkcionizált nanocsövek ígéretes alkalmazásaira példaként említjük a daganatos sejtek szelektív elpusztítása terén amerikai kutatók által elért kezdeti eredményeket. Egérkísérletek során sikerült a daganatos sejtekhez megfelelően funkcionizált nanocsöveket hozzákötniük. Ezután a látható fényhez közeli infravörös tartományba eső fényvel (0,7–1,1  $\mu\text{m}$ ) világították meg az állatot. Ezt a fényt a test szövetei jó részt átengedik, a szén nanocsövek viszont nagymértékben elnyelik. Ezáltal a nanocsövek közvetlen környéke annyira fölmelegedett, hogy ettől elpusztultak a daganatos sejtek. Természetesen a módszer tényleges használhatóságát még nagyon sok és körültekintő vizsgálat igazolhatja csak.

Ígéretes orvosi alkalmazással kecsegtetnek azok a mostanában folyó vizsgálatok is, amelyek során olasz kutatók szén nanocsövek hálózatát tartalmazó hordozón tenyésztettek (a hippokampuszból származó) idegsejteket. A vizsgálatok azt mutatták, hogy a szén nanocsövek javítják a jelátvitelt a neuronok között. A kutatók célja olyan szén nanocsöveken alapuló implantátumok, új generációs biocsipek kifejlesztése, amelyek segítségével a sérült neuronok újbóli összeköttetése révén a központi idegrendszer bizonyos sérülései helyrehozhatók. Megjegyezzük, hogy ebben az EU-projektben magyar kutatók is részt vesznek: a nanocsövek minősítése az MTA SZFKI-ban történik.

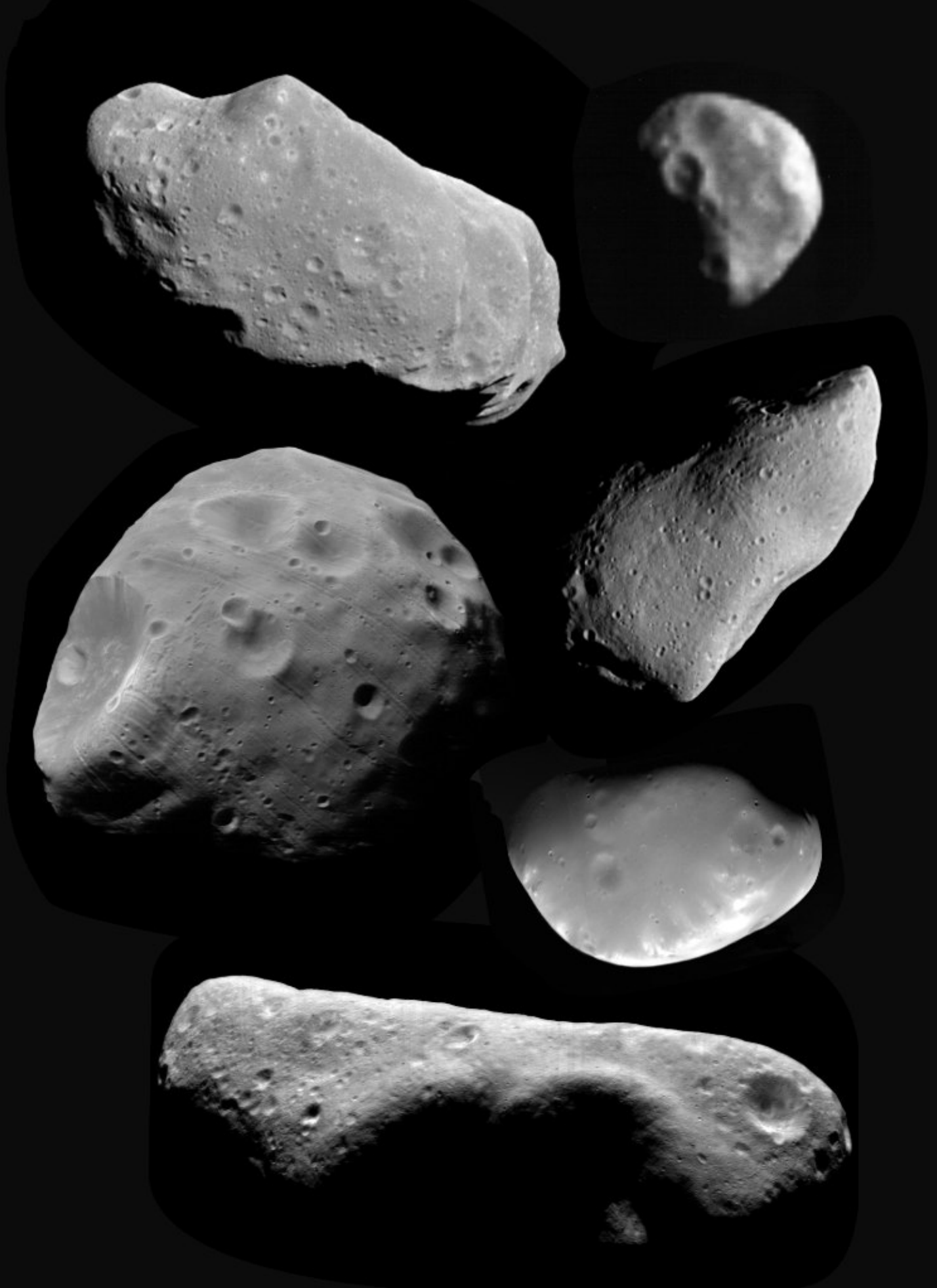
Végezetül megemlítiük, hogy a szén nanocsövek elméleti és kísérleti kutatása hazánkban is több egyetemen, illetve kutatóintézetben folyik, nemzetközileg is számottevő eredményekkel.

Az íráshoz kapcsolódó internetes oldalak elérhetők például a <http://virag.elte.hu/kurti/science.html> oldalról. A *Fizikai Szemlé*ben a szén nanocsövekről eddig megjelent cikkek: Kürti Jenő, A varázslatos szénatom (47/9 (1997) 274), Biró László Péter, Nanovilág: a szén nanocsőtől a kék lepkeszárnyig (53/11 (2003) 385) és Márk Géza, Egy hullámcsoomag kalandjai az alagútmikroszkópban (56/6 (2006) 190).

Kürti Jenő

ELTE, Biológiai Fizika Tanszék





Az Ida és a holdja Dactyl, valamint a Phobos és a Gaspra, alattuk a Deimos, legalul az Eros.