

fizikai szemle



2007/5

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 Szuperkamiokande-kísérlet
vízirtályát körülölelő
Cserenkov-detektorok ellenőrzése
a tartály feltöltése előtt.
(Lásd Patkós András írását.)

TARTALOM

<i>Kiss Ádám:</i> A gyorsítók szerepe a fejlett társadalmakban a XXI. század elején	145
<i>Bérczi Szaniszló:</i> A Hold fejlődéstörténete kőzetminták alapján	151
<i>Pozsgai Imre:</i> Fizika a szilárdfázisú gyógyszerek fejlesztésében és gyártásában	156
<i>Rácz Béla:</i> Búcsú Ketskeméty István professzortól	161
<i>Hartmann Ervin:</i> Biró Gábor (1925–2007)	162
ATOMOKTÓL A CSILLAGOKIG	
<i>Lendvai János:</i> Új rovat a Fizikai Szemlében: »ATOMOKTÓL A CSILLAGOKIG«	164
<i>Patkós András:</i> Részecskék az Univerzumban	165
A FIZIKA TANÍTÁSA	
<i>Zátonyi Sándor:</i> A motiváció és környezetünk fizikája	169
Csodák pedig vannak – és terjednek (<i>Papp Katalin</i>)	177
KÖNYVESPOLC	179
HÍREK – ESEMÉNYEK	163, 180
MINDENTUDÁS AZ ISKOLÁBAN	
A fekete lyukak (<i>Németh Judit</i>)	180
<i>Á. Kiss:</i> The role of accelerators in the highly developed societies of our times	
<i>Sz. Bérczi:</i> The history of our Moon as testified by mineral probes	
<i>I. Pozsgai:</i> Physics in the development and manufacture of solid phase medicaments	
<i>B. Rácz:</i> Taking leave of professor I. Ketskeméty	
<i>E. Hartmann:</i> Gábor Biró (1925–2007)	
FROM ATOMS TO STARS	
<i>J. Lendvai:</i> A new column in our journal: FROM ATOMS TO STARS	
<i>A. Patkós:</i> Particles in the Universe	
TEACHING PHYSICS	
<i>S. Zátonyi:</i> Motivation and physics of our environment	
Palaces of (physical) miracles – and their proliferation (<i>K. Papp</i>)	
BOOKS, EVENTS	
SCIENCE IN BITS FOR THE SCHOOL	
Black holes (<i>J. Németh</i>)	
<i>Á. Kiss:</i> Die Rolle von Beschleunigern in der hochentwickelten Gesellschaften der Gegenwart	
<i>Sz. Bérczi:</i> Die Entwicklungsgeschichte unseres Mondes, wie Gesteinsproben sie belegen	
<i>I. Pozsgai:</i> Physik in der Entwicklung und Herstellung von Arzneien im festen Zustand	
<i>B. Rácz:</i> Abschied von Professor I. Ketskeméty	
<i>E. Hartmann:</i> Gábor Biró (1925–2007)	
VON DEN ATOMEN BIS ZU DEN STERNEN	
<i>J. Lendvai:</i> Eine neue Spalte in unserer Zeitschrift: VON DEN ATOMEN BIS ZU DEN STERNEN	
<i>A. Patkós:</i> Teilchen im Weltall	
PHYSIKUNTERRICHT	
<i>S. Zátonyi:</i> Motivation und die Physik unserer Umwelt	
Paläste der (physikalischen) Wunder – immer häufiger (<i>K. Papp</i>)	
BÜCHER, EREIGNISSE	
WISSENSWERTES FÜR DIE SCHULE	
Schwarze Löcher (<i>J. Németh</i>)	
<i>A. Кишин:</i> Роль ускорителей частиц в развитых обществах наших времен	
<i>С. Бэрги:</i> История нашей Луны записанная на основе минералогического анализа проб	
<i>И. Пожгаи:</i> Физика в развитии и производстве твердотельных лекарств	
<i>Б. Раи:</i> Прощание с профессором И. Кечкемети	
<i>Э. Хартман:</i> Габор Биро (1925–2007)	
OT ATOMOV DO ZVEZD	
<i>Я. Лендвай:</i> Новый раздел нашего журнала	
<i>А. Паткосу:</i> Частицы во Вселенной	
ОБУЧЕНИЕ ФИЗИКЕ	
<i>И. Затони:</i> Физика окружающей среды и мотивация	
Палаты (физических) чудес и их распространение (<i>К. Пан</i>)	
КНИГИ, ПРОИСХОДЯЩИЕ СОБЫТИЯ	
НАУЧНЫЕ ОБЗОРЫ ДЛЯ ШКОЛ	
Чёрные дыры (<i>Ю. Немет</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 egyzámlán.

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 Fizikai Lapokat Eötvös Loránd 1891-ben alapította

LVII. évfolyam

5. szám

2007. május

A GYORSÍTÓK SZEREPE A FEJLETT TÁRSADALMAKBAN A XXI. SZÁZAD ELEJÉN

Kiss Ádám

ELTE, Atomfizikai Tanszék

A gyorsítók a XX. század második felében néhány évtized alatt a civil élet számos területén nélkülözhetlenné váltak, és a XXI. század elejére a részecskegyorsítók és a velük kapcsolatos tevékenység a gazdasági élet figyelemre méltó része lett. A gyorsított részecskéket a tudományos kutatáson kívül napi rendszerességgel alkalmazzák az egészségügy és az ipar számos területén. A gyorsított részecskék alkalmazásának segítségével más módszereknél nem látott pontosságú anyagelemzésre, diagnosztikai célú vizsgálatra nyílik lehetőség, a gyorsított részecskékkel való besugárzás pedig nagy pontossággal ellenőrzött anyagátalakításra, egészségügyi terápia folytatására alkalmas. A fejlett országokban a ma működő közel húszezer gyorsító több tízezer szakértőnek ad munkát, azok száma pedig évente akár a több milliót is elérheti, akik az egészségügyben kerülnek kapcsolatba a gyorsítókkal.

Az első részecskegyorsítók

Az első részecskegyorsítókat a XX. század 20-as és 30-as éveiben építették. Eleinte kizárólag az anyag akkor újonnan felfedezett alkotórészei, az atommagok megismerésének vágyával, a tudományos kutatás céljaira alkották meg őket. A magfizika gyors fejlődésnek indult. Az egyre nagyobb, látványos sikerek újabb és újabb kérdéseket vetettek fel, amelyek megválaszolásához általában mindig nagyobb energiájú és intenzitású gyorsított nyalábokra volt szükség. Hamarosan felismerték és a gyakorlati alkalmazásra kidolgozták a ma is alkalmazott gyorsítási alapelveket, az elektrostatikus gyorsítás módszerét, a lineáris és ciklikus rezonanciagyorsítási eljárásokat. Az 1930-as években épültek az első elektrostatikus gyorsítók (*J.D. Cock-*

roft és *E. Walton* 800 kV-os kaszkádgenerátora és *R.J. van de Graaff* 1,5 MV-os gyorsítója), valamint az első ciklikus rezonanciagyorsítók (*E.O. Lawrence* és *M.S. Livingstone* ciklotronja 1939-ben a Berkeley-i egyetemen 9 MeV-es proton- és 35 MeV-es α -nyalábolt volt képes előállítani).

Már az első gyorsítókkal szerzett tapasztalatokból kiderült, hogy az ebben az időben megszülető és hamarosan a tudományos érdeklődés középpontjába kerülő részecskefizikai kutatásokhoz már akkor szükséges még nagyobb részecskeenergiák eléréséhez figyelembe kell venni a részecskék gyorsításakor fellépő relativisztikus tömegnövekedést. Enélkül ugyanis az egyre nagyobb sebességű részecskék a ciklikus rezonanciagyorsítóknál kiesnek a gyorsító fázisból. A probléma megoldása elvezetett a lineáris részecskegyorsítók és a relativisztikus jelenségeket megfelelő módon figyelembe vevő ciklikus gyorsítók megépítéséhez.

A gyorsítók építésében elért sikereket látványos tudásgyapardás követte az atommagok tulajdonságainak felderítésében. Ezzel párhuzamosan alapos ismeretekre tettek szert a nagy energiájú részecskék és az anyag kölcsönhatásával kapcsolatban is. Hamarosan kiderült az is, hogy a gyorsított részecskéket a gyakorlati élet, az ipar, más tudományok és az orvosi gyakorlat számos területén fel lehet használni. A potenciálisan vonzó alkalmazási lehetőségek megismerése nyomán az 1950-es és 60-as évektől kezdve szinte minden fejlett országban számos részecskegyorsító építettek egyrészt a tudományos kutatás céljaira, másrészt gyors ütemben nőtt a gyakorlati alkalmazási igénnyel telepített gyorsítók száma is. Tekintettel arra, hogy a gyorsított részecskék alkalmazása a legtöbbször beváltotta a hozzájuk fűzött reményeket, va-

lamint arra, hogy a tudományos kutatás és a gyakorlat folyamatosan újabb és újabb felhasználási területeket azonosított, a gyorsítók elterjedésének üteme a napjainkig töretlenül növekedett.

Hazánkban az első részecskegyorsítót *Simonyi Károly* professzor vezetésével építették 1950–51-ben Sopronban (1. ábra). 1951. december 22-én ennek a gyorsítónak a segítségével hozták létre Magyarországon az első mesterséges magátalakulást (441 keV energiájú protonokkal lítium atommagokat bombázza a ${}^7\text{Li}(p,\gamma){}^8\text{Be}$ magreakciót figyelték meg).

A gyorsított részecskék a modern társadalmak mindennapjaiban

A gyorsított részecskéknek a mindennapi gyakorlati életben való alkalmazása minden esetben a részecske és az anyag – többségében az atomfizikai jelenségkörbe tartozó folyamataival jellemezhető – kölcsönhatásán alapul. A részecske az anyaggal kölcsönhatva fokozatosan elveszti energiáját, gerjeszti, ionizálja a pályája közelében lévő atomokat és ezáltal legtöbbször lényeges változásokat hoz létre. Természetesen a gyors részecske sokszor magreakciót is kivált a fékező anyagban lévő atommagokkal kölcsönhatásba lépve.

Összességükben ezek a folyamatok adják a hátterét a gyorsított nyalábok felhasználásának. A gyorsított részecskéknek az egymástól mégoly távol lévő területeken történő különböző felhasználása is mind az alábbi három alkalmazás valamelyikébe sorolható. Mindez – mint ahogyan később látni fogjuk – az egyszerűnek látszó csoportosítás ellenére széles felhasználási kört jelent.

- A gyorsított részecskéknek az anyaggal való jellegzetes kölcsönhatása során az anyagnak leadott dózissal kapcsolatos felhasználás. Ilyenkor a gyorsított részecskék nyalábja a bombázott anyagban meghatározott, előre eltervezett és eredményében kívánt hasznos folyamatokat hoz ellenőrzött módon létre.

- A gyorsított részecskéket az anyag diagnosztizálására, analízisére használjuk fel.
- A gyorsítókat a gyakorlat által igényelt radioaktív források előállítására alkalmazzák.

A gyorsítók mai alkalmazásai összességükben meglepően nagy gazdasági és társadalmi hatással bírnak. A gyorsítókkal összefüggésben lévő gazdasági tevékenység évente mintegy 50 milliárd dolláros üzletet jelent. A gyorsítók működtetésével kapcsolatos munkahelyek száma a százezres kategóriában van. Az alkalmazások pedig sok millió személyt érintenek, elsősorban egészségügyi kezelésben részesülő ellátottként.

Az előbbieket alátámasztását jelenti az az adat, hogy az Egyesült Államokban mintegy 1600 onkológiai központ 2100 körüli lineáris gyorsítót használ terápiás és diagnosztikai célokra. A terápia évenkénti értéke ~10 milliárd dollár, míg a gyorsítóberendezések felújításával és az új telepítésekkel kapcsolatban mintegy 3 milliárdos üzletről beszélhetünk.



1. ábra. Az első magyar részecskegyorsító, amelyet Simonyi Károly professzor és munkatársai építettek 1951-ben Sopronban. Az azóta átalakított berendezést az Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kara látványos telephelyén állították ki.

A helyzet – tendenciájában – világszerte hasonló. Napjainkban mindenütt komoly üzleti bővülés figyelhető meg ezen a területen. Szerte a világ fejlett országaiban egyre több gyorsítót állítanak üzembe. Megfigyelhető a korábban épített gyorsítók folyamatos modernizálása is, amelynek fő hajtóerejét elsősorban az információtechnológiai forradalom eredményeinek alkalmazása jelenti.

A jelenleg üzemben lévő gyorsítók meghatározó többsége működésük elve szerint lehet *elektrosztatikus gyorsító*, *lineáris rezonanciagyorsító* (ez a magyar szakirodalomban is használt eredetileg angol nevén: LINAC – *linear accelerator*), vagy *ciklikus rezonanciagyorsító*. A gyorsítók legfontosabb paramétereinek a gyorsított részecske típusa, a nyalábenergia és a nyalábbintenzitás számít. Természetesen a gyorsítóknak van még számos más, többnyire a gyorsítóra egyedileg jellemző, tulajdonságuk is.

A jelenleg a Földön üzemben lévő gyorsítók számára nézve pontos statisztika nincsen. Ennek az oka elsősorban az, hogy a változások ilyen sok berendezés esetén gyorsak, a régi, elavult gyorsítókat leállítják, máshol újakat állítanak üzembe. Így a gyorsítók számát tekintve csupán becslésekre vagyunk utalva.

A mai gyorsítók felhasználási céljuk szerinti megoszlását az alábbiak foglalják össze:

Nagy energiájú ($E > 1\text{GeV}$) gyorsító	~ 120
Radioterápiás gyorsítók	> 7500
Kutatás (orvosi kutatásokra is)	~ 1000
Orvosi izotópgyártás	~ 200
Ipari folyamatokra és kutatásra	> 1500
Ionimplantáció, felületek kezelése	> 7000
Szinkrotron sugárforrások	> 50

A fentiekből kitűnik, hogy jelenleg világszerte bizonyosan több mint 17 500 gyorsító van üzemben.

A gyorsítók alkalmazása a modern társadalmak életében

A gyorsított részecskéket a legfejlettebb társadalmak az élet számos, egymástól meglehetősen távoli területén alkalmazzák. Ezeket a területeket fontosságuk szerint is áttekintve az orvosi alkalmazások, az ipari alkalmazások, a vizsgálati technikák és a gyorsított részecskék, mint a kutatás és fejlesztés eszközei csoportokba osztjuk és ebben a sorrendben tárgyaljuk őket.

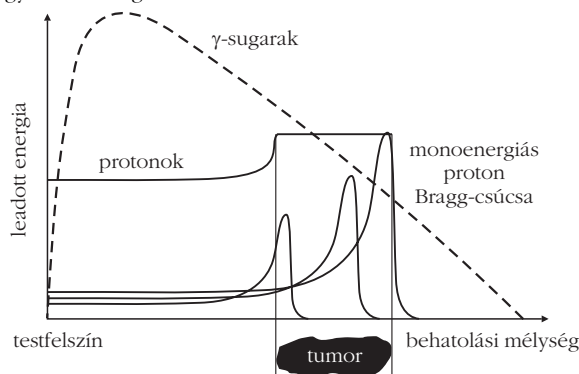
A részecskegyorsítók orvosi alkalmazásai

A gyorsítóknak az egészségügyi gyakorlatban való felhasználását mindenekelőtt a daganatos betegségek sugárterápiája és az orvosi diagnosztika jelentik.

A daganatos megbetegedések ma a fejlett régiók egészségügyében az egyik legnagyobb, a társadalmi közösség tagjai jelentős részére kiterjedő problémát jelentik. A felmérések szerint az Európai Unióban minden harmadik személyben élete során kifejlődik valamilyen rákos daganat, és az összes haláleset mintegy negyede rákos betegség miatt következik be. Japán 125 millió lakosából 2001-ben közel 4 millió fő, azaz 3% volt a daganatos beteg.

Az orvostudomány a rákos betegségek gyógyítása terén ma már komoly, több évtizedes tapasztalattal rendelkezik. Így közismert, hogy a rosszindulatú daganatok kezelésének számos módja van. A tapasztala-

2. ábra. A testen belül kifejlődött tumor besugárzása gamma-sugarakkal és protonokkal. A γ -besugárzásnál a leadott energia a tumoron kívül is nagy. Protonoknál és nehézionoknál az energialeadás nagy részét a daganatra lehet koncentrálni.



tok alapján állítható, hogy a daganatok lokális kezelése a beteg gyógyításának egyik hatékony eszköze. A daganatok lokális kezelése több, egészen különböző úton (például ide tartozik a daganat sebészeti eltávolítása) is történhet. Ezeknek egyik, figyelemre méltóan sikeresnek bizonyult eljárása a sugárterápia, ami a daganatok – többnyire gyorsítókkal előállított – radioaktív nyalábokkal való besugárzását jelenti.

A radioaktív nyalábokkal végrehajtott sikeres daganatos terápia legfontosabb követelménye az, hogy az ionizáló sugárzás valóban a rákos sejteket rombolja és ne okozzon jelentős sérülést a daganat környékén lévő egészséges szöveteknek. Ennek minél jobb teljesítéséhez szükség van a daganat elhelyezkedését messzesemenően figyelembe vevő nyalábvezető rendszerre, háromdimenziós tervezésre, a besugárzás helyérzékeny monitorozására és a besugárzó nyaláb probléma esetén történő azonnali lekapcsolásának lehetőségére. Mindehhez megfelelő gyorsítókra és a vezérléstechnika magas szintű, korszerű alkalmazására van szükség.

A mai orvosi gyakorlatban leggyakrabban lineáris elektrongyorsítókat (LINAC) alkalmaznak. A frekvencia általában 3 GHz körül van és a gyorsítókkal 5–20 MeV energiájú elektronnyalábokat állítanak elő. Magukkal az elektronnyalábokkal közvetlenül felületi, vagy kis mélységben a felület alatti, daganatokat kezelnek. Ez azonban az összes felhasználásnak csupán mintegy 10%-át jelenti. Mélyebben fekvő daganatok esetén – tehát az esetek túlnyomó többségében – a terápiás besugárzást az elektronnyaláb megfelelő céltárgyon történő lefékezésekor keletkező folytonos energiaspektrumú, nagy áthatolóképességű γ -sugárzással hajtják végre. A tényleges terápia általában mintegy 4–6 hétig tart és a napi besugárzási dózis többnyire 1–3 Gy/nap körül van.

A daganatok egyszerű besugárzásán alapuló kezelési eljárásnak komoly hátránya az, hogy a daganatos sejtek mellett az egészséges szövetek is elkerülhetetlenül besugárzást kapnak. A 2. ábrán látható, hogy γ -sugarakkal történő besugárzásnál az energialeadás jelentős része a tumor és a testfelület közötti szövetekben történik. Azon, hogy a tumor és a testfelület közötti egészséges szövetek egyike se kapjon megengedhetetlenül nagy dózist, segít az, hogy a daganatot a testhez képest több irányból sugározzák be. Ilyen módon – a gyakorlatban technikai fejlesztéssel – elérhetjük azt, hogy a daganat a kívánt dózist kapja, de eközben az egészséges szövetek csak kevésbé sérüljenek.

A 2. ábrából kitűnik, hogy az előbbi problémán a megfelelően megválasztott energiájú nehéz töltött részecskékkel történő besugárzás érdemben segíthet. A nagy energiájú protonok, vagy még nehezebb ionok az energiájuk túlnyomó többségét a hatótávolságukat közvetlenül megelőző rétegekben adják le. Ez lehetőséget ad arra, hogy a besugárzás lényegében csak a tumort érje. Több, különböző besugárzási energia választásával el lehet érni, hogy a daganatos szövetek által kapott dózis egyenletesen nagy legyen.

A protonokkal vagy nehéz töltött részecskékkal történő besugárzáshoz azonban néhányszor tíz MeV energiájú protonokat és nehézionokat előállítani képes gyorsítók – elsősorban erre a célra kifejlesztett ciklotronok – telepítésére, valamint a körülményeket pontosan figyelembe vevő, precíz besugárzás-tervezési és nyalábirányítási rendszerek kiépítésére van szükség. A fejlesztések mind anyagilag, mind a szak tudás oldaláról nagy erőket követelnek. Mégis, ma sokan úgy látják, hogy a jövő sugárterápiás fejlesztésének ez a fő vonulata. Várhatóan ezen a területen a következő években gyors lesz az előrelépés.

A gyorsított részecskék másik egészségügyi felhasználását a gyorsítók által termelt, orvosi célokra használt sugárzó izotópok, a *radioizotópok* előállítása jelenti. A testbe juttatott radioizotópokat egyrésztől betegségek diagnosztizálására, másrésztől (főleg daganatos) betegségek célzott kezelésére alkalmazzák. A testben a radioizotópok sugárzásukkal elárulják elhelyezkedésüket, és így működésbeli információt szolgáltatnak arról a szervről, amelyben összegyűlnek. A testbe juttatott anyagokat kémiai tulajdonságuk teszi arra alkalmassá, hogy a kiválasztott szövet, sejtet megkeressék. Mindehhez – a beteg védelmében – olyan izotópot célszerű választani, amelyről származó β -sugárdózis kicsi, a kibocsátott γ -energia alacsony, lehetőleg 100 és 300 keV közé esik és az izotóp felezési ideje is a lehető legrövidebb. Korábban a különleges követelmények miatt ilyen célra csak néhány, reaktorban előállított izotópot találtak alkalmasnak. Jelenleg az igények növekedésével és a lehetőségek bővülésével határozott változás figyelhető meg: a diagnosztikára használt izotópokat közvetlenül az egészségügyi intézménybe telepített gyorsítókkal a helyszínen állítják elő. Így a pozitronemissziós tomográfia (PET) alkalmazza például az ^{15}O (felezési ideje 2,03 perc), a ^{13}N (9,96 perc), ^{11}C (20,38 perc), ^{18}F (109,8 perc) izotópokat. A radio-immunodetektálás és a radio-immunoterápia – ezekben az új eljárásokban a radioaktív atomok antitestekhez kötődve célzottan a rákos sejtek proteinjéhez jutnak el – pedig a ^{123}In (68 óra) és a ^{67}Cu (61,9 óra) atomokat használja fel.

Az orvosi gyakorlatban bővülő mértékben felhasználásra kerülő radioaktív izotópok előállítását a célzottan erre a feladatra kifejlesztett, kisméretű (kompakt) ciklotronokkal végzik. Ezek tipikusan protonok 10 és 30 MeV közötti energiára való gyorsítására alkalmasak viszonylag nagy áramerősségek (maximum 400 μA) mellett. – A speciális izotópok előállításának egyik fő nehézsége az, hogy a hatékony felhasználás bonyolult céltárgytechnika kifejlesztését és alkalmazását követeli meg.

Ipari alkalmazások

Az ionizáló sugarakat nagyipari termelésben elsősorban a vegyipar használja fel. Itt főleg gammaforrások vagy gyorsított elektronnyalábok *sugárhatásának* segítségével *kémiai reakciókat* váltanak ki. A besugárzással a kívánt kémiai reakciókat a hőmérséklettől

függetlenül lényegében egyforma hatékonysággal ki lehet váltani. Ezeknek a reakcióknak az időbeni lefolyását a besugárzási paraméterekkel ellenőrizni és irányítani lehet, ráadásul sokszor további katalizátorokra sincsen szükség. Az alkalmazott dózisteljesítmény általában az igen magas, kGy/s tartományban van. A besugárzásos technikát alkalmazzák többek között a polietilén, a plasztik, a kenőanyagok és a gumi gyártásában.

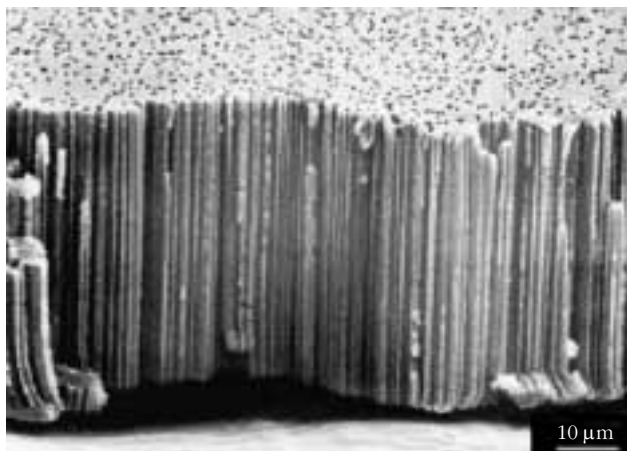
Az ionizáló besugárzások másik, szélesesen kihasznált tulajdonsága az, hogy megfelelően nagy sugárdózisok (a ~ 10 kGy tartományban) *csírátlanítják* a besugárzott anyagokat. Így a gyorsított nyalábokkal orvosi műszerek sterilizálását, fertőző hulladékok kezelését, ivóvíz csírátlanítását láthatják el. Ebben az alkalmazási körbe tartozik az élelmiszerek tartósítása is elektrongyorsítók felhasználásával. Azonban az élelmiszereknek besugárzással való tartósítása a fellépő mellékhatások – főleg a szabad gyököknek szerves molekulákban való keletkezése – miatt komoly vitát váltott ki. Bár a vita eddig nem vezetett egyértelmű következtetésre, néhány országban mégis jogi úton korlátozzák a módszer alkalmazását.

A félvezetők, integrált áramkörök gyártásához a legtöbbször az *ionimplantáció* módszerét alkalmazzák. A ma már széles körben elterjedt eljárásban elektrosztatikus gyorsítóval 500–600 keV energiájú ionnyalábokat állítanak elő. A felgyorsított atomok a szilícium egykristályban általában 100 nm és 1 μm közé eső mélységbe jutnak be, és így áll elő a megkívánt n-, vagy p-típusú félvezető. A bejuttatott atomok száma nagyságrendileg $\sim 10^7$ ion/ cm^2 körül van. Külön előny, hogy az eljárás során a mintának sem a hőmérséklete, sem a méretei nem változnak.

Az *ionimplantáció* módszerét a fémipar is alkalmazza. Az acél- és más fémfelületekbe implantált ionok (ezek lehetnek Cr, Ti, N) réteget képeznek, amelyek az eredetinel 10-től 1000-szer nagyobb keménységgel, kopásállósággal rendelkezhetnek. Erre szép példákat szolgáltatnak a csípőprotézisek, különböző szelepek, motorhengerek felületének jelentős felkeményítése. A platina-implantáció a felületek savállóságát növeli meg jelentősen.

Majdnem minden műanyagfelület bőr, szén, szilícium, vagy vas atomokkal való implantációja a felületek keménységének növekedésével jár. Ilyen módon bizonyos műanyagfelületeknél akár ötszörös acélkeménységet is el lehet érni.

A fémfelületek implantációval való kezelésének érdekes felhasználását jelenti az, amikor a nagy energiára gyorsított protonokkal történt besugárzással vékony réteget aktiválnak fel egy kopásnak kitett felületen. A használat közben a felületről eltávozott aktivitás mérésével megmérhető a *rétegekopás*. Erre példa az, hogy acélfelület besugárzásával $^{56}\text{Fe}(p,n)^{56}\text{Co}$ aktív réteget hoznak létre (az ^{56}Co felezési ideje 77,7 nap). A használat során a kenőanyagba került kobaltizotóp aktivitása könnyen megmérhető, és ebből a kopás sebességére lehet következtetni.



3. ábra. Plasztikfólia – ionokkal történt besugárzását követően – maratással létrehozott szűrőmembrán képe.

Végül említést teszünk a modern technikában és az orvostudományban gyakran felhasznált *membránszűrők* gyorsított ionokkal való előállításának terjedő gyakorlatáról. Ilyenkor olyan fóliákat húznak el a besugárzási ablak előtt, amelyek vastagsága kisebb, mint a bombázó ionok hatótávolsága az anyagban. A besugárzás körülményeinek változtatásával és a besugárzott fólia későbbi maratásának ellenőrzésével tetszőleges pórusűrűség érhető el egészen $\sim 10^9$ pórus/cm²-ig. Ráadásul a membrán pórusainak átmérője is az igényeknek megfelelően beállítható 10 nm és 10 μ m között. Egy ilyen besugárzásnak és az azt követő maratásnak kitett fólia képét mutatjuk be a 3. ábrán.

Anyagvizsgálati technikák gyorsított részecskékkel

Az anyagvizsgálatra, az anyag összetételének és szerkezetének meghatározására több olyan hatékony módszert fejlesztettek ki, amelyek során gyorsított részecskéket használnak.

A felületek összetételének meghatározására lehet alkalmazni a *Rutherford-visszaszórás* módszerét. A módszer alap gondolatát az adja, hogy a vizsgálandó felületre érkező gyorsított ionok Coulomb-szóródnak a felületen lévő atommagokon. A felület összetételére a mért szórási képből nagy pontossággal következtetni lehet. A Rutherford-visszaszórási kísérletekben általában 2–4 MeV közötti energiájú α -részecskéket alkalmaznak. Ezekkel vékony rétegekről mintegy 150 Å mélységig lehet információt szerezni. Egy-egy vizsgálat tipikus ideje 10 perc körül van. Az eljárás rendkívül érzékeny a nagy rendszámú elemekre, a könnyebb izotópokat kevésbé mutatja ki.

A másik, a felületi rétegek összetételének vizsgálatára gyakran alkalmazott módszer a protonokkal indukált röntgensugarakat felhasználó *PIXE-eljárás* (Proton Induced X-ray Emission – a protonok kiváltotta röntgensugárzás). Itt a vizsgálandó felületet, kisebb anyagdarabkát néhány MeV energiájú ionnyalábbal – leggyakrabban protonokkal – besugározzák, ami a besugárzott atomokat röntgensugárzás kibocsátására készíti. A kilépő röntgensugarak jellemzőek a

kibocsátó atomra. A modern gyorsítókkal erősen fókuszált nyalábokat lehet előállítani (a nyalábátmérő a 10 μ m tartományban is lehet), amely lehetővé teszi apró minták vizsgálatát, felületek részletes, összetétel szerinti feltérképezését.

Gyorsított részecskék felhasználásával több más analitikai célú módszert is kidolgoztak. Ilyenek a *magreakció-analízis*, a *rugalmas visszalökési szórás*, valamint a *töltött részecskés aktivációs analízis*. A módszerek mindegyike igen pontos, alkalmazásakor a kísérletezőnek kell eldöntenie, melyik a legalkalmasabb a kitűzött feladat elvégzésére.

A *gyorsítós tömegspektroszkópia* (vagy *AMS-módszer*; Accelerator Mass Spectroscopy) azt teszi lehetővé, hogy kiválasztott mintákban egy-egy bennünket érdeklő izotóp viszonylagos gyakoriságát meghatározhassuk. Az eljárás lényege az, hogy a mintákat valamely módon egyedi atomok kibocsátására készítjük, amelyeket ionizálunk. Ezeket az ionokat azután egy elektrosztatikus gyorsítóval nagy (néhány MeV) energiára felgyorsítjuk, és a gyorsított részecskéket tömegszeparációs módszerekkel elemezzük. Ily módon egy-egy stabil, vagy radioaktív izotóp nagyságrendekkel kisebb részarányának jelenlétét, pontos mennyiségét ki lehet mutatni, mint egyéb eljárásokkal. Az AMS-módszer rendkívül érzékeny, elvileg akár 10^{15} atom mellett már egy atomot is ki tud mutatni!

Az AMS-technikával számos, a tudomány vagy a gyakorlat területén érdeklődésre számot tartó izotóp vizsgálható nagy pontossággal. Ezek közül alkalmazási területeik és egyéb figyelemre méltó következtetésekre alkalmat adó voltak miatt kiemelkednek a ¹⁴C (felezési ideje 5730 év), ⁴¹Ca (10⁵ év), ³⁶Cl (3 · 10⁵ év), ²⁶Al (7 · 10⁵ év) és a ¹⁰Be (1,6 · 10⁶ év) izotópok. A legfontosabb meghatározható izotóp kétségkívül a számos kultúrtörténeti és környezettudományi felhasználásban fontos *radiokarbon*, a ¹⁴C. Ezzel az eljárással a radiokarbon kormeghatározás aktivitásmérés segítségével végrehajtott módszeréhez képest mintegy ezer-szer-tízezerszer kisebb tömegű minta is elég (~1 g helyett elég ~1 mg) az azonos pontossághoz.

Az eljárásnak az egyszerű elvek ellenére számos nehézsége van. Komoly felkészültségre van szükség a mintában lévő szénizotópoknak ionokká történő hatékony alakításához az ionforrásban, a sok nagyságrend gyakoriságkülönbségű szénizotópok (¹²C, ¹³C és ¹⁴C) gyorsítás előtti nyalábvezetéséhez, valamint a gyorsítás utáni tömegszeparáció megbízható megvalósításához. A módszer segítségével a radiokarbon kormeghatározások mintegy 50 ezer évre, tehát majdnem tízszeres felezési időre visszamenően kiterjeszthetők.

Az anyag szerkezetét is több olyan módszerrel lehet vizsgálni, amelyek gyorsított nyalábokat alkalmaznak. A leggyakoribbak a *diffraktométerek*, amelyeket kristály- és molekulaszervezetek vizsgálatára használnak fel. Ezen módszereknek az a lényege, hogy kis hullámhosszú monokromatikus nyalábok diffrakcióját hozzuk létre a vizsgált mintán.

Gyorsított részecskék szerepe más tudományterületek fejlesztésében

A mai *környezettudomány* több fontos kutatási célfeladata a gyorsítókhoz, elsősorban a radiokarbon AMS-módszerrel való meghatározásához köthető. Számos területen ki lehet ugyanis használni, hogy a kozmikus sugárzás útján a felső légkörben keletkező ^{14}C rövid idő (néhány hét) alatt széndioxid-molekula részeként jó közelítéssel egyenletesen elkeveredik a légkörben, és így a ^{14}C fajlagos aktivitása lényegében mindenütt ugyanaz.

A környezettudomány egyik jelentős vizsgálati célja az *óceáni áramlások feltérképezése*, az óceáni víztömegek keveredésének, az óceánok horizontális és vertikális tömegtranszportjának felderítése. Ehhez ad ma más módszerrel nem helyettesíthető eszközt az a tény, hogy a légkörnek az óceánok vizével való kölcsönhatása folytán folyamatosan ^{14}C jut a vízbe. Ráadásul a víznek a széndioxiddal való kölcsönhatása olyan, hogy a sarki vizeknél széndioxid felvétel történik, míg az egyenlítő környékén a víz széndioxidot ad le a levegőnek. Az óriási víztömegek ^{14}C aktivitása egyszerű kapcsolatban áll azzal az idővel, amióta az a vízbe került. Nagy térségek háromdimenziós ^{14}C eloszlástérképe felvilágosítást ad a radiokarbonnal természetes módon megjelölt víztömegek sorsáról, áramlásáról. A kutatási munka elvégzéséhez a gyorsító tömegszeparáció (AMS) adja a jelenleg egyetlen, ténylegesen alkalmazható módszert.

Egy másik környezettudományi szempontból fontos kérdéskör a különböző *természetes vízbázisok korának meghatározása*. Erre ismét a ^{14}C koncentráció mérése nyújt lehetőséget. A felszín alatti vizek cseréje a kevésbé vízáteresztő rétegek között ugyanis sokszor a néhány ezer év tartományba esik. Az ilyen időtartamok alatt létrejövő radiokarbon koncentrációváltozások pontosan meghatározhatók az igen érzékeny AMS-módszer segítségével.

Az *aeroszolkok mozgása a felső légkörben* az egyik fontos, de gyakorlatilag igen nehezen kutatható kérdésköre a környezettudománynak. Ennek vizsgálatára nyújt lehetőséget az a tény, hogy a felső légkörben a kozmikus sugárzás által kiváltott nagy energiájú neutronok nitrogénnel való kölcsönhatásában (a ^{14}C és ^3H mellett) mind a ^7Be , mind a ^{10}Be izotóp keletkezik. A berillium könnyen megtapad az aeroszolkokon. Így a különböző magasságokban vett mintákban, vagy a csapadékban az AMS-módszer segítségével meghatározott koncentrációadatokból következtetni lehet az aeroszolkok mozgására.

A *művészettörténet* és a *régészet* a nukleáris technika több módszerét is felhasználja. A radiokarbon segítségével számos kultúrtörténeti és régészeti emlék keletkezésének idejét határozták meg sikeresen. Tárnyak nagy energiájú sugarakkal való átvilágítása, az aktivációs analízis valamely módszere, vagy a PIXE-eljárás alkalmazása felvilágosítást adhat a minta belső szerkezetéről, kémiai összetételéről. Az ilyen célokra

kifejlesztett gyorsítók több világhírű múzeum, így például a párizsi Louvre vizsgálati eszközei között megtalálhatók.

A sort néhány olyan lehetőség ismertetésével zárjuk, amely az *energetika* jövőbeni fejlesztésével kapcsolatos.

Az atomenergia jelenleginél nagyobb mértékű felhasználását nagyban gátolják azok a félelmek, amelyek a nagy aktivitású, hosszú felezési idejű transzuránokat tartalmazó *kiegített üzemanyag hosszú távú elhelyezésével* kapcsolatosak. Felmerült a gondolat, hogy ezeket a transzurán magokat nagy energiájú protonokkal besugározva stabil vagy rövid felezési idejű magokká alakítsák át. A számítások szerint eközben ráadásul még jelentős mennyiségű energiát is lehetne termelni. A folyamatok fizikája oldaláról a javaslat bizonyosan megvalósítható. A gyakorlati megvalósítás azonban még számos jövőbeni fejlesztéstől függ. Így például természetes, hogy az esetleges nagyüzemi méretű magátalakításokhoz ma még nem létező, különlegesen nagy áramú, új fejlesztésű gyorsítókra lesz szükség. Ezen túlmenően is vizsgálják annak a lehetőségét, hogy belsőleg biztonságos, nagy energiájú proton-nyalábot alkalmazó hasadási reaktorokat fejlesszenek ki. Ezek mintegy négy nagyságrenddel kevesebb radioaktív hulladékot termelnének, mint a ma működő reaktorok. Túlzás nélkül mondhatjuk, hogy a hasadási energiatermelés kiterjesztésének egyik vonzó jövőbeni alternatívája a részecskegyorsítók fejlesztésétől függ.

A *fűzős energia* felszabadításának egyik – jelenleg is kutatott – lehetősége is gyorsítókhoz kötődik. Az alapgondolat az, hogy egy folyékony deutérium-trícium cseppecske öszenyomásával hozzanak létre olyan viszonyokat, hogy meginduljon a termonukleáris fűző. Az elméleti számítások szerint ehhez a körülbelül 1 mg tömegű cseppecskét a sűrűsége mintegy 1500-szorosára kell öszenyomni úgy, hogy a csepp sűrűsége elérje a $\sim 300\text{ g/cm}^3$ értéket. Az öszenyomás egyik elméleti lehetősége az, hogy nagyenergiájú nehézion-nyalábokkal egyszerre különböző irányokból meglőjük a cseppecskét. A megfelelő öszenyomás például körülbelül 2–10 GeV közötti energiájú, legalább 100 mA áramerősségű bizmutnyalábokkal a számítások szerint elérhető. Egy ilyen nyaláb teljesítménysűrűségének csúcscsértéke elérné a $\sim 400\text{ TW/cm}^2$ ma még fantasztikusnak tűnő értéket. Ilyen gyorsító ma még nem áll rendelkezésre, de semmi nem zárja ki, hogy kifejlesztése a jövőben sikerüljön.

A gyorsítók mai alkalmazásait mindenütt a magas színvonalú technológiai háttér megkövetelése jellemzi. A gyorsítók további dinamikus ütemű elterjedése a társadalmi-gazdasági élet és a tudomány igényei miatt egyaránt várható. A gyorsítók akár elvi áttörést is hozó további fejlesztése bizonyosra vehető.

Irodalom

Fényes Tibor (szerkesztő), *Atommagfizika*, Debreceni Egyetem, Kossuth Egyetemi Kiadó, 2005, ISBN 963 472 890 1

A HOLD FEJLŐDÉSTÖRTÉNETE KÖZETMINTÁK ALAPJÁN

Bérczi Szaniszló
ELTE Anyagfizikai Tanszék

Egy korábbi, szintén a Naprendszer anyagaival foglalkozó cikkben a kis égitestekről írtunk, és a kondritos kisbolygó fejlődéstörténetét tekintettük át. Mostani írásunkban a holdi fejlődéstörténet nagyobb eseményeit mutatjuk be, amelyekről az Apollo-expedíciókon begyűjtött kőzetminták és a holdi meteoritok is tudósítanak.

A Naprendszer űrszondákkal végzett kutatása a Föld és a Hold vizsgálatával indult. A Hold anyagainak föltérképezése során a földtan által 300 éve kitaposott utat járták végig. Ennek lényege, hogy első lépésként az égitest felszínén lévő kőzettesteket azonosították. Ezeket nagy holdi események hozták létre. Egy évtized alatt az U. S. Geological Survey munkatársai megalkották a Hold rétegtanát. Nem volt azonban segítségükre fosszília az egymást át nem fedő rétegek relatív sorrendjének meghatározására, vagyis a földtani korrelációra. Ekkor ismerték föl, hogy a kőzettestekhez tartozó forma is lehet zárvány szerepű. A kőzettest felszínén megfigyelhető krátereket ugyanolyan „fosszília” szerepkörben kezdték alkalmazni, mint korábban a biológiai, majd azt követően a radioaktív elemekkel tették. Megszületett a kráterstatisztika, melynek segítségével ma már a Naprendszer távoli égitesteinek is meg tudjuk határozni a korát.

A földi sztratigráfia axiómái

A szilárd kérgű bolygótestekről készült geológiai térképeken a kőzettestek a „főszereplők”. Azokat a kőzettesteket ábrázolják színes formában, amelyek a felszínre nyúlnak. A kőzettestekkel valójában gyakran a felszínen megfigyelhető formákat térképezik föl, és arra törekszenek, hogy a kőzettesteket még a felszín alá nyúlásukban is nyomon kövessék. A kőzettestrétegekből rétegtani (sztratigráfiai) egységeket, sorozatokat állítanak össze.

A kőzettestek föltérképezése során axiómákat állítottak össze. Az axiómákat megelőzi a következő alapföltevés: az égitest felszíne tömbökből áll, 3D kiterjedésű kőzettestekből, melyeknek a körvonalai, elhelyezkedése, egymáshoz való viszonya mérhető, föltérképezhető.

A legismertebb axióma a települési törvény (*Nicolaus Steno*, dán természettudós állította föl az 1600-as években). Az égitest felszínén található kőzetrétegek (kőzettestek) közül az a fiatalabb, amelyik fölötte van a másiknak. A rétegek sora – így fölfelé haladva – rendre egyre fiatalabb kőzettesteket jelez.

Ezúton is köszönetet mondunk a NASA Johnson Space Center Koszmikus Anyagok Laboratóriumának a mintakészlet kölcsönzéséért.

A következő két fontos és elismert axióma annak a tapasztalatnak a kiterjesztése, amit ma, itt a Földön megfigyelhetünk. Megfigyelhetjük, hogy

1. milyen folyamatok alakítanak ki kőzettesteket: például üledékképződés a tengerben, vulkanizmus stb.;

2. milyen folyamatok változtatják e kőzettestek egymáshoz való viszonyát: például tektonizmus, intenzív stb.

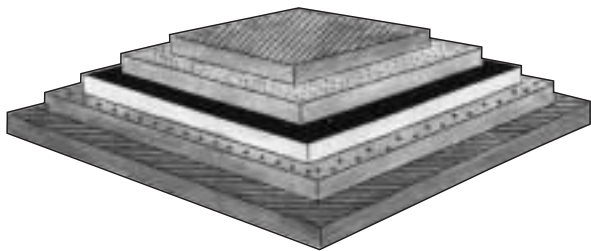
A kiterjesztési kettős axióma azt mondja ki, hogy amilyen folyamatok hatnak ma és itt a Földön, azok hatottak korábban is, és másutt is a Föld felszínén. Az időbelit aktualizmusnak, a térbelit uniformitarizmusnak is nevezik, de mindkettő a jelen folyamatok működésének térbeli és időbeli kiterjesztése.

A következő két fontos axióma a kőzettestek közötti viszonyokból von le időrendi következtetést. Az egyik megállapítja, hogy az a tektonikus folyamat, amely elmozdít egymáshoz képest két kőzettestet fiatalabb, mint a két elmozdított kőzettest. A másik azt állítja, hogy az a kőzettest, amely más kőzettestbe való behatolással jött létre, fiatalabb, mint az őt bezáró kőzettest.

Az utolsó fontos axióma a korreláció lehetőségét fogalmazza meg zárványok segítségével. A zárványok bezárásának axiómája egyrészt ugyanolyan viszonyaxióma, mint az előző kettő, másrészt azonban magában hordozza az Univerzumra is kiterjeszhető anyagszerkezeti rétegtan lehetőségét is. Ez az axióma kimondja, hogy a bezárt test (zárvány) mindig idősebb, mint a bezáró kőzet. A földtani korreláció alkalmazására azért van szükség, mert a kőzettestek nem folytonos réteget képviselnek, illetve mert különböző helyeken az égitest felszínén más és más típusú kőzetek egyidejűségét is fontos megállapítani. Röviden: a rétegek oldalirányú folytonosságát tudjuk kimutatni a korreláció segítségével.

A zárványok önálló fejlődéstörténeti sorozatot képeznek akkor, ha az élővilág fossziliáit alkalmazzuk a korreláció megállapításánál. Vannak azonban időközben fölfedezett másféle zárványok is: ilyenek például a radioaktív elemek, melyek bomlásukkal szintén saját fejlődéstörténetet képeznek. A zárványok tehát rávilágítanak arra a tényre, hogy a rétegtan (sztratigráfia) lényegéhez tartozik az, hogy két független, saját fejlődéstörténetet őrző eseményszálal vet egybe, hasonlít össze.

A Naprendszerbe kilépve új típusú zárványokra lesz szükségünk ahhoz, hogy a korrelációt égitestek közötti tartományokra is kiterjesszük. Olyan zárványok szükségesek, melyek több égitest felszínén is megtalálhatók, és valamilyen tulajdonságuk időben változik. Ilyen zárványok a kráterek, s korrelációra alkalmas kőzetprovinciák az égitestfelszíni krátermezők.



1. ábra. A holdi sztratigráfia idealizált rétegtani piramisa. Felülről rendre a következő rétegtani egységek sorakoznak: *kopernikuszi* (fiatal, sugársávokkal is körülvetett kráterek tartoznak ide), *eratoszthenészi* (fiatal, de sugársáv nélküli kráterek tartoznak ide), *imbriumi* (az Imbrium medence kialakulásától, kidobott takarók, mare előntések tartoznak ide), *nektári* (a Nektár-medence kialakulásától kezdve képződött medencék, marék tartoznak ide), *pre-nektári* (minden Nektár-medence előtti kőzettest ebbe a rétegtani emeletbe tartozik).

Holdi sztratigráfia

A Hold volt az első égitest, melyre a sztratigráfia Földön kifejlesztett, de más égitestre kiterjesztett axiómáit alkalmazták [5–8]. A kőzettestek tulajdonságait, az átfedési viszonyokat először fotometriai úton, távcsöves fényképfelvételekről, majd űrfelvételekről állapították meg.

A rétegtani térképező munka egyik összefoglalása a holdi rétegtani oszlop, amit mi itt egy lépcsőzetes azték piramis formájában mutatunk be (1. ábra). Ebben felsoroljuk a holdi rétegtan fő emeleteit, melyek egyúttal a holdi kőzetképződés nagy korszakait is jelentik.

A Holdon a sugársávós kráterek a legfiatalabbak (kopernikuszi emelet), ezeket követik lejjebb a még mindig fiatalosan tagolt morfológiájú, de már sugársáv nélküli kráterek (eratoszthenészi emelet). Mindkét fiatalabb emelet rétegei többnyire csak kráternyi foltokban vannak jelen a Hold felszínén, bár előfordulnak eratoszthenészi marék is (és a Tycho- vagy a Kopernikusz-kráter sávjai is messzire nyúlnak, különösen telihold idején láthatjuk ezt). A foltnyi rétegtani egységek alatt nagy kiterjedésű kőzettesteket alkotó két emelet következik. Az egyik az imbriumi, mely az Imbrium-medencéhez kapcsolódott a definiáláskor kijelölt területen (imbriumi emelet). A másik, a még

idősebb egység a Nektár-medencéhez kapcsolódik (nektári emelet). Legalul fekszik a krátermezőkkel borított terravidékek (pre-nektári) emelete.

Azóta a rétegtan alapelveit több más naprendszerbeli égitestre is alkalmazták, így a Marsra, a Merkúrra, a Jupiter Galilei-féle holdjaira, és jelenleg a Vénusz geológiai térképezése folyik. A XXI. század egyik nagy tevékenysége lesz a Naprendszer-léptékű rétegtan kidolgozása.

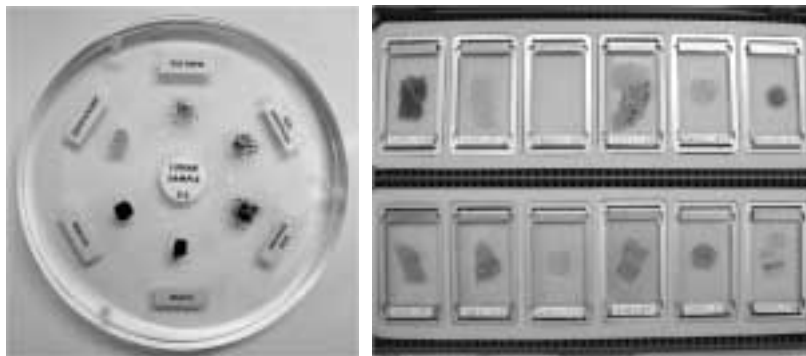
Hosszú ideig a Naprendszer bolygói és holdjai közül (a Földön kívül) csak a Holdat borító rétegsor vizsgálata volt lehetséges: a felszíni rétegek azonosítására fényképfelvételek alapján nyílt mód. Ma az űrkutató egyik nagy kihívása az, hogy a bolygótestek geológiai föltérképezése után tegye lehetővé a klasszikus földtan másik fontos hierarchiaszintjének, a kőzetmintáknak a vizsgálatát is. A Hold esetében ez részben már megvalósult. Az Apollo-expedíciókból is és a Földre hullott meteoritok anyagából is vizsgálhatjuk ma már a Hold anyagait.

NASA holdkőzetek

1969 és 1972 között hat sikeres leszállást hajtottak végre a NASA űrhajósai a Holdon. A begyűjtött kőzetminták összömege 384 kilogramm. Ezek az első tudatosan gyűjtött naprendszerbeli anyagkészletek. Ugyanebben az időszakban három Luna robotűrszonda is hozott talajmintát a Holdról az orosz űrkutató keretében.

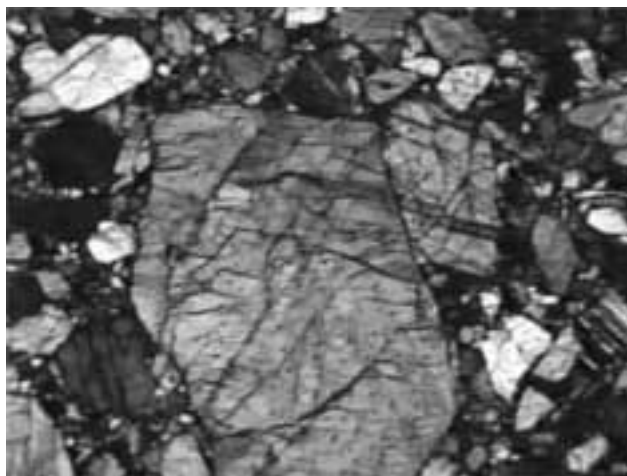
A NASA 20 példányban elkészített egy 12 vékonycsiszolatból álló készletet a felsőoktatás számára (2. ábra). Az oktatási célú holdkőzet-mintasorozat jó áttekintést ad a Hold főbb kőzettípusairól. Vizsgálatuk képet ad a Holdon lejátszódott fontosabb kőzetani folyamatokról. Ezek a holdi kéreg kialakulása (az anortozitminták és a noritminták), a bazaltos mare előntések kialakulása s a bazaltok rétegződése (3 bazaltos minta és egy szitált frakció a narancsszínű talajból, amit lávaszökőkút hozott létre), breccsák keletkezése (3 breccsaminta, egy-egy a felföldi és mare területéről, egy pedig a Fra Mauro formációról) s a holdi regolit keletkezése (2 talajmintából szitált frakció és egy talajbreccsa).

2. ábra. A NASA holdkőzetkészlet két része: balra a holdi mintákat tartalmazó korong látható 6 beöntött anyagmintával. Jobbra a 12 vékonycsiszolatot tartalmazó készlet látható felülnézetben.



Anortozit

A Hold külső kérgé az égitest összeállása után megolvadt. A magmaóceánból kristályosodott ki az *anortozitos* kéreg, amelyet – egységesen – holdi felföldeknek nevezünk. Arra, hogy a holdi magmaóceán a teljes Holdra kiterjedt, az ásványok ritkaföldfém-gyakorisága alapján következtettek: az anortozitok nagy pozitív európiumanomáliájából és a holdi bazaltok nagy negatív európiumanomáliájából. Néhány anortozitmintában még megfigyelhető a kőzet kumulátos szövete is.

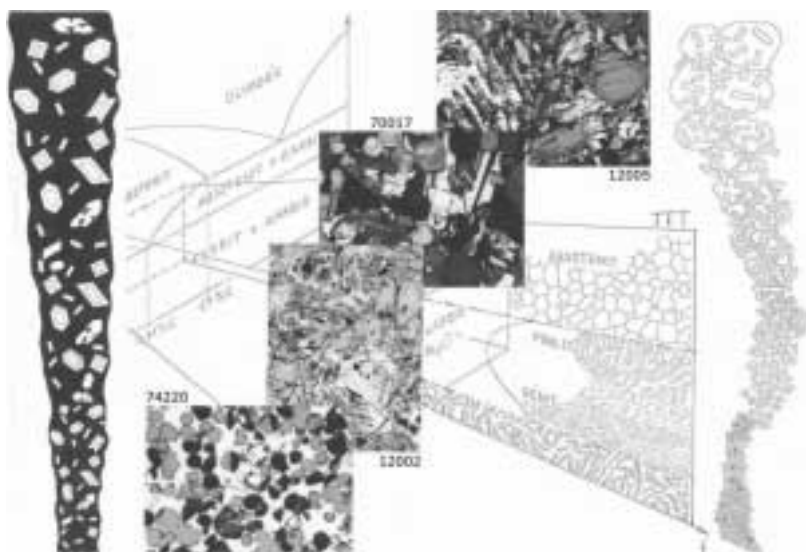


3. ábra. Anortozitminták a NASA-készletből: a 60025 számú kőzetminta részlete.

A Hold anortozitos kérgét a keletkezése utáni fél-milliárd évben több nagyméretű égitest becsapódása érte. Ezek a becsapódások feltördelték az anortozitos kérget, körkörös medencéket hoztak létre, és hatalmas területekre terítették szét a kidobott törmelék-takarót. A hold kérgét alkotó anortozitos kőzetek ezért többségükben breccsás szövetűek. Az Apollo űrhajósai által hozott anortozitminták többségében megfigyelhetjük az összetördelt ásványokat, a breccsás szövetszerkezetet.

A *terra kőzeteket* egy anortozit- és egy noritminták képviseli. Az anortozit a holdi felföldek anyaga, szinte kizárólag csak földpátkristályokból áll. A valamikori nagyméretű (centiméteres) szemcsék a sok ütközéstől, becsapódástól, rengéstől mára összetöredeztek (60025). A vékonycsiszolaton megfigyelhetjük a blokkok elmozdulását, a szemcseperemek összetöredezését, az optikai tulajdonságok (pl. a kioltás) mozaicitá-

4. ábra. A NASA holdkőzetkészlet 4 bazaltmintájának szövete lehülési sebesség szerinti sorozatba rendezve és összevetve az acélok edzésére készített szövetdiagrammal, melyen a különböző szövetű acélok is lehülési sebességük szerint következnek. A szövet mintázata annál apróbb szemcsés, minél közelebb történt a lehülése a felszínhez, s ezért minél nagyobb volt a lehülés sebessége.



sát. Az anortozitok kialakulásának kora 4,4–4,2 milliárd év (3. ábra).

A noritminták felerész rombospiroxénből, felerész plagioklász földpátból áll (78235). Durvaszemcsés kőzet, az ásványok nagysága az 5 millimétert is elérheti. Üveges erek is előfordulnak benne. A becsapódások ütközései nagyon megviselték ezt a kőzetet. A földpát nagy része maszkelynit üveggént található benne. Ma azt feltételezik, hogy a noritok és más terra kőzetek is intrúzióként nyomultak be az anortozitos kéregbe.

Holdi bazaltok

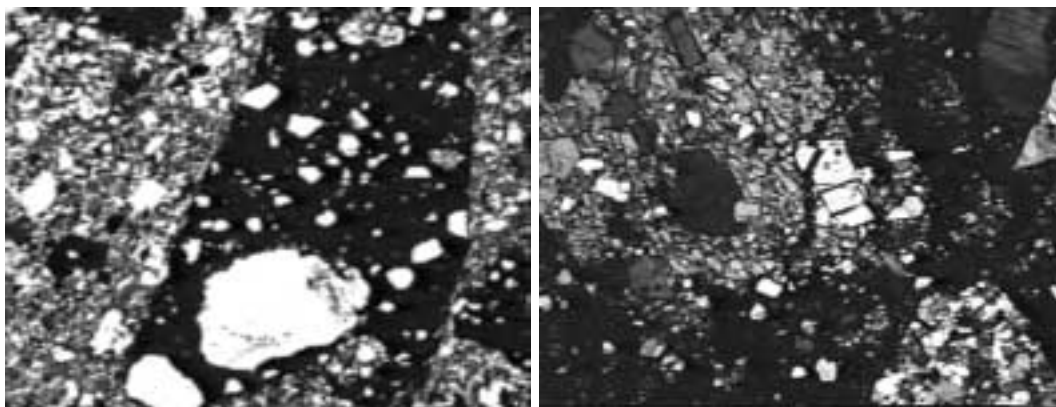
A holdi kéregbe történt nagy becsapódások medencéket alakítottak ki a Holdon. A Hold látható oldalán ezeket a körkörös medencéket bazaltláva-folyások töltötték föl. A holdi vulkanizmus hosszú ideig eltartott, s a higan folyó láva hatalmas távolságokon, vékony rétegekben terült szét. A holdi bazaltok keletkezésének kora csaknem egymilliárd évet fog át az imbriumi korban, de kráter számlálás alapján tudjuk, hogy léteznek olyan láva-folyások is, melyek az eratoszthenészi korban keletkeztek. Ilyenek az Imbrium-medencében föltérképezett láva-folyások is. Az Apollo-expedíciók által a Földre hozott holdkőzetek kora 3,7 és 3,2 milliárd év közé esik.

A holdi lávák vékony rétegekben terültek szét. A holdi bazaltmintákat ezért legcélszerűbb egy vékony láva-folyás felszínétől lefelé haladva sorba rendezni és így bemutatni őket. A felszíntől lefelé haladva más és más jellegű szöveteket találunk egy láva-folyásban. A láva a mélység növekedésével egyre lassabban hűlt le, s ezért a kőzetszövetek a lehülési sebesség csökkenése szerinti sorba lesznek rendezve. A szövetek az üveges elegyrészeket is tartalmazó szferulitos szövet

tól elindulva rendre a következő típusokat tartalmazzák: variolitos szövet, interszertális szövet, intergranuláris szövet, szubofitos szövet, ofitos szövet, poikilitos szövet. A holdi bazaltok között a legtöbb típusra van példa, néha azonban csak úgy, hogy töredékként jelennek meg a breccsákban. Ilyen szövetsort földi ofiolitokban, vagy párnalávákban is találtak kutatók [3].

Három bazaltos vékonycsiszolat van a gyűjteményben, de összetételét tekintve ide tartozik a „narancsszínű” talajminta is, tehát a *bazaltokat* négy minta képviseli a NASA-készletben. Rendezzük el a holdkőzetkészlet négy, bazaltos összetételű mintáját egy olyan tulajdonság alapján, amely jól megfigyelhető a szövetükön: az ásvány-szemcsék mérete alapján. Tudjuk, hogy a lehülés körülményei erősen hatnak a szemcseméretre. A gyorsan hűlő szilikátolvadékból apró kristályok

válnak ki, míg a hosszú ideig (pl. nagy mélységben) kristályosodó kőzetek durva szemcsés szövetűek lesznek. Ha tehát az átlagos szemcseméret, illetve a szemcsék egymáshoz való viszonya alapján készítünk el egy sorozatot a holdi



5. ábra. Holdi breccsák a NASA készletből „breccsa a breccsában” szövettel.

bazaltokból, akkor voltaképpen a lehülési sebesség szerinti anyagterképet is fölvezeltük. A mi lehülési anyagterképünkön (4. ábra) a függőleges tengelyen szerepel a lehülési sebesség, a különféle szövetek pedig egymás alá kerülnek: az apró szemcsés felszínközeli, s rendre az egyre durvább szemcséjű mélységi szövetekkel zárul a sor.

A leggyorsabban lehült anyagot a narancsszínű talajminta üvegcséppjei képviselik a sorozatban (74220). Ezek a holdi ásványi anyagok egyúttal a legszínesebbek is. A narancsszínű talajminta, egy 40–100 mikrométeres szemcsékből, többnyire szferulákból (gömböcskékből) álló szitált frakció. Feltehetően egy lávaszökőkút széjjelfröccsent, parányi olvadékcseppjeiből keletkezett. Üveges alapanyaga mintegy szerkezeti ellentéte a kristályos szerkezetű kőzetmintáknak. A hirtelen megszilárdult cseppek átalakulás nélkül megőrizték a láva forrásvidékének, a holdi köpenynek az olvadékösszetételét.

A lehülési sebesség szerinti szövetsorban alájuk kerül az ugyancsak gyorsan lehült, de már a mélyből jövő lágában nagyobbra nőtt ásvány szemcséket is tartalmazó szövet, melyben ásványnyalábok (plagioklász földpát és piroxén) figyelhetők meg (12002). A piroxéntükrisztályok körbeveszik a korábban a mélyben már megnőtt és a magma által fölhozott olivinkristályokat, s így alakítják ki a porfirós szövetet. A 12002 számú minta porfirós szövete úgy alakult ki, hogy a kristályosodás már a mélyben megkezdődött, s a kiömlő láva már tartalmazta az olvadékból elsőként kristályosodó ásványokat, az olivineket. Ezeket aztán körbevették a szálas-tűs piroxének és a földpátok.

A szövetek sorában harmadik bazaltminta már nagyobb ásványokat is bőven tartalmaz (70017). (Ez a minta a hazai szarvaskői, DNy-bükki gabbrónknak is rokona nagy titántartalma alapján.) A 70017 számú bazaltban a piroxének saját színe a halványrózsaszín barackvirághoz hasonló, de a fekete, átlátszatlan (opak) ilmenit kristályok, melyek fontos elegyrészei a 70017 számú bazaltban, sötétre színezik a vékonycsiszolatot. A spinell szemcsék többnyire négyzetes vagy hatszöges metszetű fekete ásványokként figyelhetők meg, az ilmenitek gyakran vázkristályosak, beöblösödéseket mutatnak a vékonycsiszolatban. Igen ritkán megfigyelhetünk armalcolit ásványokat is, melyek

hosszúkás hordó alakúak. Az armalcolitot a Holdon fedették föl és az elsőként leszállt űrhajósokról (*Armstrong, Aldrin, Collins*) nevezték el.

A lehülési sorban negyedik egy poikilites szövetű minta (12005). Ebben – a lehülésnek immár egy késői szakaszában – nagy szemcsékbe ágyazottan láthatók a korábban kivált kicsiny szemcsék. A korán kiváló kristályszemcséket még olvadékok vette körül, ezért szép, saját alakkal kristályosodtak. A 12005 számú bazaltminta szövetében a nagyméretű földpátok és piroxének kristályosodtak utoljára, s ezért bezárják a szép, sajátalakú olivineket és néhány ilmenit és spinell szemcsét.

Breccsák

Még az anortozitoknál is tördeltebb ásványvilág szökik a szemünkbe a breccsákat megfigyelve a mikroszkópban (5. ábra). A becsapódások ütése összetett átalakító folyamatokat indít el a felszíni kőzeteken. Ipari folyamatok hasonlatával élve: mint a „malom” őrli, mint a „vihár” forgószele teríti, s mint a „kemence” forrósága összesíti a törmelékeket. A breccsák némelyike sokszor átesett ezen a tortúrán, ezért alakított ki soknak a „breccsa a breccsában” szövete (14305, 72275).

Sok breccsában különböző eredetű kőzetszilánkok és töredékek keveredtek össze (polimikt breccsák), míg más breccsák egyetlen megelőző kőzet (protokőzet) összetördeléséből alakultak ki (monomikt breccsa). Sok breccsában a mátrix anyaga megolvadt és újrakristályosodott. A becsapódási kráter közepén találjuk azokat a kőzeteket, amelyek a megolvadt kőzetekből és a rájuk visszahullott törmelékekből alakultak ki. A 65015 számú felföldi breccsában a megolvadt mátrixból olyan nagyméretű piroxén ásványok kristályosodtak ki, amelyek az apró plagioklász földpát szemcséket poikilitesen magukba zárják. Más breccsákban nagyméretű közettöredékeket, kőzetszilánkokat találunk beágyazva. A breccsák jelentőségét az adja, hogy bennük több távoli területről származó idegen kőzetszilánk is megtalálható. Így a 6 expedíciós gyűjtőhely a breccsák révén sokkal nagyobb kiterjedésű gyűjtési területet reprezentál összekeveredett kőzetszilánkjával.

A NASA-készletben a negyedik anyagmintatípus a talajmintaké. A talajminták is a távoli vidékekről odaszállított változatos anyagvilágot, kőzet- és ásványtöredékdarabokat hordozzák, és így a felszíni keveredési folyamatokra is utalnak. Szitált frakciók 60–100 mikrométeres szemcsékkel. A 68501 számú minta a felföldekről, a 70181 számú minta pedig a mare vidékekről tartalmaz töredékeket, kőzetszilánkokat, ásványszemcséket.

A 68501 számú mintában főleg anortozitos szilánkok fordulnak elő, de néhány felföldi típusú bazaltszilánk is megtalálható közöttük. A 70181 számú minta főleg a mare bazaltok ásványtöredékeit tartalmazza. Előfordul a szemcsék között néhány odakeveredett narancstalaj-gömböcske is.

Ugyancsak a talajminták sorába illik a 15299-es számú regolit breccsa. Ebben üveges alapszövetbe beágyazva találhatjuk meg a kőzet- és ásványszilánkokat. Olyan kisméretű gömböcskék (szferulák) is megfigyelhetők bennük, amelyek becsapódások idején keletkeztek. Méretük 10–20 mikrométer, s így észrevehetően kisebbek, mint a lávaszökőkutak 60–100 mikrométeres szferulái.

Összegzés a Hold kőzeteiről

Az űrkutatási módszerekkel megszerzett első expedíciós kozmikusanyag-gyűjtemény a Holdról származik. Az Apollo-expedíciók gyűjtötte 384 kilogrammos készletnek csak egy részét dolgozták föl eddig. A Hold felszíni folyamatairól sok fontos ismeretet gyűjtöttünk már az Apollo-11 anyagának megismerésével. Ezek közül kiemelkedő jelentőségű a holdi anortozitok kéregalkotó szerepe, a nagyon idős holdi kőzetvilág kormegállapításai, a nagy mélységből származó lávaszökőkúti szferulák holdi köpeny eredete, a mare bazaltok sokfélesége és néhány mare bazalt nagy titántartalma.

Ma a holdi kőzeteket összetételük szerint a bázisos-ultrabázisos földi kőzetek közé interpolálhatjuk be. Nagyobb magnéziumtartalma alapján több holdi kőzet már a pikrites ultrabázisos tartományba esik (12002, 70017). Azonban a becsapódások által előidézett anyagkeveredéseknél három fontos csoportot különítenek el a holdi talajok forrásvidékeire. Az egyik a felföldek anortozítja, a másik a viszonylag nagy vastartalmú mare bazaltok csoportja s a harmadik a káliumban, ritka földfémekben és foszforban való gazdagsága miatt KREEP-nek nevezett komponens. Ez utóbbi komponens részaránya a Mare Imbriumtól való távolodással csökken a talajösszetevők között. A három fő forrástípust a későbbi Clementine és Lunar Prospector műholdak sugárzásos összetétel-analizátorai is jól el tudták különíteni. Így ma, a hat leszállás kicsiny felszíni mintavételezése ellenére a Hold egészére kiterjedő összetételi térképek állnak már rendelkezésünkre a holdfelszín anyagairól. (A Hold túlsó oldalán szintén van egy fontos KREEP-forrás, s ez a South Pole Aitken nevű nagy becsapódásos medence.)

A Hold fejlődéstörténete

Azokkal a kőzetmintákkal, amelyeket a térképezésből már ismert geológiai környezetből gyűjtöttek, pontosítani lehetett a sztratigráfiában már megismert holdi fejlődéstörténetet is. A holdi terrák anortozitjai és a bennük mért ritka földfémek eloszlása különös és fontos eseménysort bizonyított. Egykor a Hold külső rétegei megolvadtak, s 4,4 milliárd évvel ezelőtt az egész égitestre kiterjedő magmaóceán borította a Holdat. (A földi külső rétegek kezdeti megolvadására a holdi anortozitos kéreg keletkezésének fölismerése után gondoltak először.) A magmaóceán lehülése során a plagioklász földpát ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) az olvadéköna tetején gyűlt össze, s létrehozta a világos színű felföldek anortozitját. A nagyobb sűrűségű ásványok az olvadéköna aljára süllyedtek. Ez az első holdi differenciálódási korszak mintegy félmilliárd évig tartott.

A vastagodó holdi kéregre történtek a nagy körkörös medencéket létrehozó becsapódások, melyek feltördeltek a holdi kerget. A töréseken át bazaltos láva szivárgott a felszínre, és egy-másfél milliárd éven át működő vulkáni tevékenységgel feltöltötte a Hold látható oldali medencéit. A bazaltok a Hold köpenyéből származnak. Némelyik közülük titánban igen gazdag, mint például az Apollo-11 és -17 leszállási helyéről gyűjtöttek (Meyer, 1987).

A bazaltos vulkanizmus csendesedésével a nagy felszínformáló események elültek a Holdon. Az egyre vastagodó holdi kéregre egyre kevesebb becsapódás történt. A folyamatos kráterbombázás a talajt ma is állandóan őrli, keveri és süti össze breccsákká. A holdi breccsa a breccsában szövetű kőzetek, a talaj anyagából összesült breccsák, a becsapódáskor megolvadt anyagból keletkezett talajbreccsák mind ezt igazolják [7].

Ugyancsak fontos új ismeretek, ritka kőzettípusok származnak a holdi meteoritok ma már 104 példányt is elért készletéből. Ezek között olyan csoportok is szerepelnek, melyek eltérőek a leszállási helyeken gyűjtöttektől. Ilyen például a legidősebb YAMM holdi bazaltok csoportja. Ezekről, illetve a marsi meteoritok vizsgálatáról más cikkekben szövegezzünk majd.

Irodalom

1. Bérczi Sz., *Planetológia*. Egyetemi jegyzet, J3-1154. Tankönyvkiadó, Budapest, 1978
2. Bérczi Sz., *Kristályoktól bolygóttestekig*. (210 o.) Akadémiai Kiadó, Budapest, 1991
3. Józsa S., *Thesis*. Eötvös University, Dept. Petrology/Geochemistry, ELTE, Budapest, 2000
4. Meyer, C., *The Lunar Petrographic Thin Section Set*. NASA JSC Curatorial Branch Publ. No. 76. Houston, Texas, 1987; Magyarul: *Holdkőzetek: Kőzettani vizsgálatok a holdi vékonycsiszolat készletén*. Ford.: Bérczi Sz. ELTE TTK, Kőzetan-Geokémia Tanszék és Csillagászati Tanszék, Budapest, 1994
5. Shoemaker E.M., Hackman R.J., *Stratigraphic Basis for a Lunar Time Scale*. In: Kopal Z., Mihailov Z.K. (szerk), *The Moon*. Academic Press, New York, 289–300, 1962
6. Wilhelms D.E., *Summary of Lunar Stratigraphy – Telescopic Observations*. U.S. Geol. Survey Prof. Papers No. 599-F, Washington, 1970
7. Wilhelms D.E., *The Geologic History of the Moon*. U.S. Geol. Survey Prof. Papers No. 1348, Washington, 1970
8. Wilhelms D.E., McCauley J.F., *Geologic Map of the Near Side of the Moon*. USGS Maps No. I-703, Washington, 1971

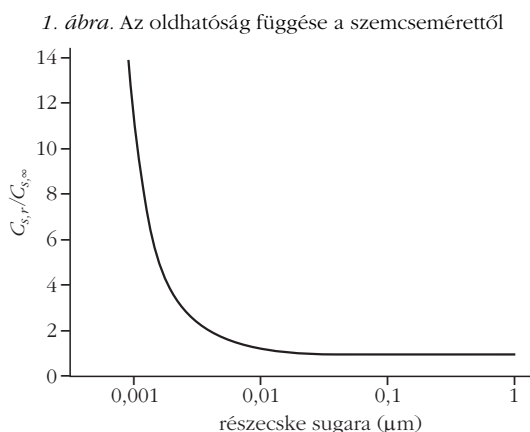
FIZIKA A SZILÁRDFÁZISÚ GYÓGYSZEREK FEJLESZTÉSÉBEN ÉS GYÁRTÁSÁBAN

Pozsgai Imre
Richter Gedeon Nyrt.

A gyógyszergyártás inkább kémia mint fizika, és ezt a tényt nem is szeretném vitatni. Azért ragadtam tollat, hogy megmutassam, milyen sok fizikára van szükség a kémia mellett. Meglepően sokra! Mondandómat a szilárdfázisú gyógyszerekre, porokra és tablettákra szeretném korlátozni és ezen belül is a generikus gyógyszergyártásra. A generikussal szembeállítható originális készítményeknél a kémia erősebben dominál, hiszen a kívánt gyógyhatással rendelkező molekulákat is meg kell keresni, ki kell fejleszteni. Egy originális gyógyszer kifejlesztése nagyon idő- és pénzigényes: 10 év és 1 milliárd dollár ráfordítás jó becslésnek számít. Ezért világszerte elterjedt gyakorlat, hogy az originális készítmények szabadalmi védettségének lejártá után más cégek is elkezdik gyártani az originálissal egyenértékű generikus készítményt.

A generikus gyógyszernek az emberi szervezetben ugyanúgy kell viselkednie, mint az originálisnak. Ahhoz, hogy e ténynek klinikai bizonyítása sikeres legyen, a készítménynek laboratóriumi körülmények között olyan kioldódási tulajdonságokat kell mutatnia, amelyek megegyeznek az originális készítménnyel. Ez a sikerhez szükséges, de nem elégséges feltétel.

A tabletták a hatóanyagon kívül segédanyagokat tartalmaznak, mint például a laktóz (tejcukor), kukorica- vagy burgonyakeményítő, cellulóz stb. A tablettázáshoz felhasznált ható- és segédanyagoknak jól kell folynia – azért, hogy a gyártó gépek ne duguljanak el. A folyás már fizikai tulajdonság, szemcsemérettől és szemcsealaktól függ. A hatóanyag és segédanyag keverékének jól tablettázhatónak kell lennie. Ebben a porkeverék rugalmas és képlékeny tulajdonságai játszanak szerepet. A kész tablettának megfelelő keménységűnek kell lennie és nem szabad morzsolódnia. A hatóanyagnak meghatározott követelményeknek megfelelően kell kioldódnia, és a kioldódás többek között a hatóanyag szemcseméretétől függ. Minél apróbb szemcsés a hatóanyag, annál jobb a kioldódása, legalábbis elméletileg (1. ábra).



Az 1. ábrán az r sugarú részecske oldhatóságát ($C_{s,r}$) hasonlítjuk össze a tömbanyag oldhatóságával ($C_{s,∞}$) 25 °C-on (a feltételezett anyag molekulásúlya 200 g/mol, sűrűsége 2 g/cm³, felületi szabadenergiája 30 mJ/m²).

A szemcseméret meghatározására az egyszerű szitálásán kívül a professzionálisabb lézerdiffrakciót vagy a fény- és elektron-mikroszkópiát alkalmazzák. A tabletták porozitásának meghatározására a higanyporozimetriát, porok, segédanyagok fajlagos felületének meghatározására a BET-módszert (*Brunauer, Emmett, Teller*) használják.

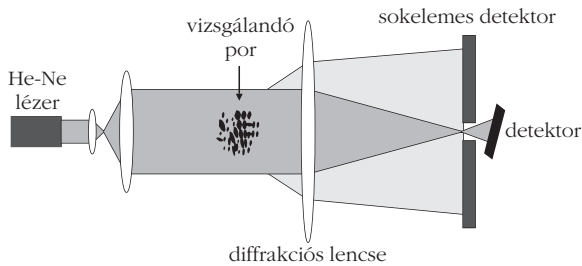
A hatóanyag oldhatósága függ a kristályszerkezettől is. Egy és ugyanazon anyag különböző kristálmódosulatait *polimorfoknak* nevezik. A modern gyógyszergyártás kiemelten fontos területe a polimorfia vizsgálata, tekintettel a polimorfok különböző oldódási tulajdonságaira. Vizsgálatának alapmódszere a röntgendiffrakció, de számos egyéb fizikai módszer (pl. Raman-spektroszkópia, infravörös-spektroszkópia) alkalmas a polimorfia meghatározására. Kicsit meglepő, de az alkalmazott hatóanyag szemcseméret-tartományára vagy polimorfjára is adnak szabadalmi védettséget.

A tablettákban felhasznált anyagok összeférhetőségére (kompatibilitására) és a készítmény időbeli stabilitásának vizsgálatára termikus módszereket alkalmaznak, mint a termo-gravimetria vagy a differenciális pásztázó kalorimetria (DSC). Az összetétel meghatározására szolgáló analitikai kémiai módszerek közül nem kevés a fizikai elveken működő, mint azt a *Fizikai Szemlé*ben közölt *Mikroszkópia és lokális analízis* című cikkemben részleteztem. Ezért jelen írásomban a fizikai elveken működő kémiai analitika alkalmazását, fontossága ellenére, mellőzöm.

A fenti felsorolás, ami a teljesség igénye nélkül történt, azt bizonyítja, hogy a fizika nagyon is fontos szerepet játszik a gyógyszerek fejlesztésében és gyártásában. Íme a felsorolt területek kicsit részletesebben.

Szemcseméret

Mint a bevezetőben említettem, a gyógyszerek hatóanyagának kioldódásában nagy szerepe van a szemcseméretnek, különösképpen a rosszul oldódó anyagok esetében. Ekkor az oldhatóság növelésének egyik eszköze a szemcseméret csökkentése. Sajnos ennek a törekvésnek gátat szab az a körülmény, hogy az apró szemcsés anyagok, porok technológiai szempontból rosszul viselkednek, nem folynak, beleragadnak a gépekbe. A jól kézben tartható (robosztus) technológiának alapkövetelménye, hogy ismerjük az alkalmazott ható- és segédanyagok szemcseméret-eloszlását.



2. ábra. A lézerdiffrakciós szemcsemérés sémája

A szemcseméret meghatározására számos módszer kínálkozik ipari körülmények között: ilyenek például a szitálás, a lézerdiffrakció, a fény- és elektron-mikroszkópia. Különböző lyukméretű szitákkal 38 μm -es szemcseméretnél nagyobb szemcséket (400 mesh-es szita) lehet szétválasztani. Bár a 38 μm helyett 1 μm -es alsó határ lenne kívánatos, ennek ellenére a szitálás hasznos folyamat a gyógyszergyártásban. A leggyakrabban használt ipari módszer a szemcseméret-eloszlás felvételére a lézerdiffrakción alapul (2. ábra).

Fényforrásként 633 nm He-Ne és/vagy 488 nm Argon-ion lézert használnak, és a mérendő szemcséket a fénysugár útjába porlasztják, vagy folyadékban szuszpendálják. Ez utóbbi a gyakoribb. (Az agglomerátumokat képező szemcséket ultrahang segítségével rázzák szét alkotórészeikre.) A Fraunhofer-diffrakcióhoz szükséges párhuzamos fénynyalábot lencse állítja elő, majd a vizsgálandó mintán szórt sugarakat a Fourier-transzformációt végző diffrakciós lencse vetíti a sokelemes szilícium-detektorra, ahol koncentrikus körök jelennek meg. A Fraunhofer-diffrakciót sztatikus fényszórásnak vagy kisszögű előre-szórásnak is nevezik.

A modern szemcseméret-meghatározó berendezésekben a nagy szögben, illetve visszafelé szóródott sugárzást is detektálják, és a szög szerinti szórás leírására a minden hullámhosszra és minden szemcseméretre egzakt Mie-elméletet használják. A Fraunhofer-közelítés a Mie-elméletnek azt a határesetét jelenti, amikor a vizsgálandó szemcsék mérete nagyobb a bejövő fénysugár hullámhosszánál. Fraunhofer-közelítésben a szórt sugárzás intenzitásának a szög szerinti eloszlását a következő képlet írja le:

$$I(\theta) = E \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \left(\frac{d}{2} \right)^4 \left[\frac{J_1 \left(\frac{\pi d \sin \theta}{\lambda} \right)}{\frac{\pi d \sin \theta}{\lambda}} \right]^2, \quad (1)$$

ahol E a besugárzó nyaláb egységnyi időre és felületegységre vonatkozó intenzitása, d a szemcse átmérője, λ a sugárzás hullámhossza, J_1 első rendű Bessel-függvény, θ a lézernyalábnak a besugárzás irányától mért szórási szöge.

A Bessel-függvény sorfejtése miatt

$$I \sim \frac{d^6}{\lambda^2} \sim \frac{V^2}{\lambda^2},$$

(ahol V a szemcse ekvivalens térfogata), ezért a lézerdiffrakció a szemcséknek térfogat szerinti eloszlás-

sát adja, ami egyenlő a súly szerinti eloszlással, ha a sűrűség állandó.

A lézerdiffrakció előnyei: száraz és nedves közegben egyaránt használható, széles dinamikus tartományban használható (0,02 μm – 2000 μm), minthogy a Mie-elméletet használják pontos, gyors, jól reprodukálható, ipari körülményeknek tökéletesen megfelel. Hibája, hogy gyakran nem az egyedi szemcsék, hanem az agglomerátumok méretéről ad információt, és nem ad információt a szemcsék alakjáról.

A fény- vagy elektronmikroszkóp segítségével szintén meg lehet határozni a szemcsék méreteloszlását. A lézerdiffrakcióhoz képest nehézkes, lassú, de a részecskék valódi méretéről és alakjáról ad információt. A szemcsealak is fontos tényező, mégpedig a folyás szempontjából: a gömbhöz hasonló szemcsék jobban folynak, mint a tű alakúak. Az elmondottak miatt a lézerdiffrakciós és mikroszkópos technikák egymást jól kiegészítik a szemcseméret meghatározását illetően.

Fajlagos felület és porozitás

A porok és porózus anyagok nem viselkednek úgy, mint a tömbanyag. A finom por reaktívabb, mint a tömbanyag, oldhatósága, adszorpciós és katalitikus képessége is nagyobb. A por forma okozta eltérő tulajdonságok sokszor legalább oly mértékben esnek latba, mint a kémiai összetétel. Végeredményben a szemcseméret és fajlagos felület meghatározzák a hatóanyag kioldódását és biohasznosulását, technológiai szempontból pedig a porok folyási viselkedésére vannak döntő hatással. Hasonlóképpen nagy befolyással van a technológiára a szilárd anyagban (pl. tablettákban, segédanyagokban) a pórusosság. A porok, segédanyagok, tabletták jól jellemezhetőek a szemcsemérettel, fajlagos felülettel, illetve porozitással.

A fajlagos felület meghatározására leggyakrabban használt módszer a gázok adszorpcióján és deszorpcióján alapul. Langmuir írta le először a gázoknak a felületen monorétegben való megkötődését, majd ezt fejlesztette tovább Brunauer, Emmett és Teller (BET-módszer). A Langmuir-elmélet kiterjesztése abban állt, hogy az említett három tudós feltételezte, hogy azok az erők, amelyek felelősek a gáz monorétegben való megkötődéséért, felelősek a többrétegű molekuláris adszorpcióért is. A BET egyenlet szerint

$$\frac{P}{V(P_0 - P)} = \frac{1}{V_m C} + \frac{C - 1}{V_m C} \frac{P}{P_0}, \quad (2)$$

ahol P az adszorbeált gáz egyensúlyi nyomása, V a P nyomáson adszorbeált gáz térfogata, V_m egy monorétegnyi adszorbeált gáz térfogata, P_0 az adszorbeált gáznak az adszorpció hőmérsékletén lévő telítési nyomása és C az úgynevezett BET állandó.

$$C = \exp \left(\frac{E_1 - E_L}{RT} \right),$$

ahol E_1 az első monoréteg adszorpció hője, E_2 a második, illetve ezt követő rétegek kondenzációs hője.

A mérés úgy történik, hogy a vizsgálandó mintából a gázokat vákuumban eltávolítják, majd semleges gázt, nitrogént vagy kriptonot adszorbeáltatnak a minta felszínére a cseppfolyós nitrogén hőmérsékletén (77 K). A hűtés megszüntetése után hagyják a mintát szobahőmérsékletre felmelegedni, miközben mérik a vizsgált por felületén adszorbeált gáz deszorpcióját. A (2) egyenlet bal oldalán lévő mennyiséget ábrázolják a P/P_0 függvényében, amely rendszerint lineáris a $0,05 < P/P_0 < 0,3$ tartományban, és ebből a V_m és C meghatározható. A V_m -ből a teljes S_t szabad felszín az

$$S_t = \frac{V_m N_0 A_{cs}}{M} \quad (3)$$

képlettel adódik, ahol N_0 az Avogadro-szám, A_{cs} az adszorbens keresztmetszeti felülete ($0,16 \text{ nm}^2$ nitrogénre a cseppfolyós nitrogén hőmérsékletén), M az adszorbens molekulásúlya.

Az S fajlagos felület:

$$S = \frac{S_t}{m}, \quad (4)$$

ahol m a vizsgált porminta tömege.

A szemcsemérettel és fajlagos felülettel minősíthetők a különböző gyártóktól származó segédanyagok, vagy az ugyanazon gyártótól származó, de eltérő típusszámú segédanyagok. Az irodalomban lineáris kapcsolatot írnak le az egyes segédanyagok nedveségfelvétel, tablettát szétejtő tulajdonsága, valamint a fajlagos felület között. Röviden, a felhasznált segédanyagok szemcseméretének, fajlagos felületének ismerete technológiai szempontból nélkülözhetetlen.

A fent tárgyalt, gázadszorpcióval történő felületmeghatározás a $0,3\text{--}300 \text{ nm}$ -es pórusméret-tartományra van korlátozva. Amennyiben nagyobb pórusméretű anyagokat, illetve olyanokat akarnak jellemezni, amelyekben a szemcsék között üregek is vannak, a gázadszorpció helyett higany-porozimetriát alkalmaznak. A higany-porozimetria $3 \text{ nm} - 360 \text{ }\mu\text{m}$ pórusátmérő-tartományban képes a szilárd anyagokat jellemezni. A jellemzés szükségességét az adja, hogy a szilárd anyag pórusszerkezete jelentős szerepet játszik a tabletták szétesésében, kioldódásában és a hatóanyag diffúziójában.

A méréshez a mintát nem nedvesítő folyadékra van szükség, amely nem lép reakcióba a vizsgálandó anyaggal: ezért esett a választás a higanyra. A higany külső nyomás hatására behatol a vizsgálandó anyag pórusaiba. Minél nagyobb nyomást alkalmaznak, annál kisebb pórusokba képes behatolni. A még mérhető legkisebb, 3 nm -es pórusok mérésére mintegy 400 MPa nyomásra van szükség. A minta által felvett higany mennyisége jellemzi a pórusok térfogatát. A higanyfelvétel és nyomásváltozás precíz mérésével a pórusok méreteloszlása határozható meg a Washburn-egyenlet alapján:

$$d = \frac{-4 \gamma \cos \theta}{P}, \quad (5)$$

ahol d a hengeresnek feltételezett pórus átmérője, P az alkalmazott külső nyomás, θ a higany nedvesítési szöge, ami 135° és 142° között változik. Ha külön nem mérik, akkor 140° -nak tételezik fel, γ a higany felületi feszültsége, 485 nN/m .

A mérések előtt – a gázadszorpció mérésekhez hasonlóan – a vizsgálandó mintából a levegőt, illetve gázokat vákuumban el kell távolítani. A gázadszorpció és higany-porozimetria csak látszólag mér azonos mennyiségeket, egyezés legfeljebb a közös méréstartományban, $3\text{--}300 \text{ nm}$, között várható, de ott is csak inkább a pórusok felületét, nem pedig a térfogatát illetően.

Polimorfia

A polimorfia a kristallográfiában az a jelenség, amikor egy szilárd kémiai vegyület egynél több kristályformában fordul elő. Ezek a formák különböznek fizikai tulajdonságukban (néha kémiai tulajdonságukban is), jóllehet oldataik és gőzeik azonosak. Közismert polimorfok a szén és grafit, a kalcit polimorfja az aragonit, a pirité a markazit.

Nagyon sok fizikai tulajdonság függ a polimorfia-tól. Hogy csak néhányat említsünk: higroszkóposság, olvadáspont és szublimációs hőmérséklet, entalpia, gőznyomás, oldhatóság, kioldódási sebesség, szilárdtest-reakciók sebessége, stabilitás, felületi szabadenergia, kristályalak, keménység, tablettázhatóság, folyási tulajdonságok, keverhetőség, mól-térfogat és sűrűség stb.

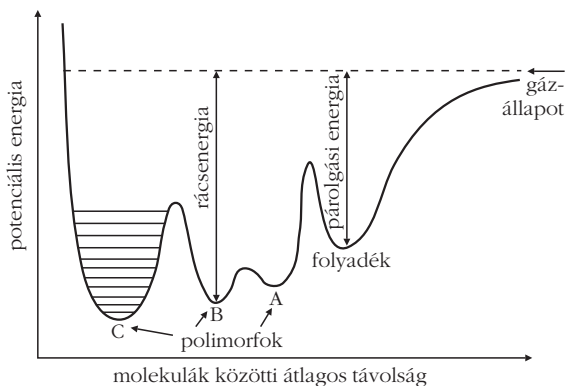
A gyógyszerkutatásban és fejlesztésben a polimorfok három szempontból töltnek be nagyon fontos szerepet: a hatóanyag kioldódása, a hatóanyag stabilitása és szabadalmi oltalom.

A polimorfok szabadalmaztatására érdekes (a pereskedést illetően pedig precendes értékű) példa a nyombélfekély és jóindulatú gyomorfekély kezelésére szolgáló Zantac nevű gyógyszer, amelynek hatóanyaga a ranitidin hidroklorid. A gyártó cég Glaxo (most GlaxoSmithKline) 1978-ban szabadalmaztatta az I-es polimorfját. Két évvel később megjelent a II. forma, amelyet szintén szabadalmaztatott a cég. 1995-ben lejárt az I. módosulat szabadalma, de 1997-ben a GlaxoSmithKline-nak sikerült meghosszabbítania a szabadalmat a II. módosulat révén. Egy közlemény szerint a Zantac 2001-ig évente (!) $3,5$ milliárd dolláros bevételt hozott a cégnek.

A polimorfok potenciális energiáját mutatja a 3. ábra. A polimorfok egymásba való átalakulásának meghatározója a két állapot közötti Gibbs-féle szabadenergia-különbség (ΔG):

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S. \quad (6)$$

ΔH az entalpiakülönbség, T az abszolút hőmérséklet, ΔS az entrópiakülönbség.



3. ábra. A polimorfok potenciális energiája

A tipikus entalpiakülönbség a szerves polimorfok közötti átmenetre 4–8 kJ/mól, szobahőmérsékleten (300 K). A fázisegyensúly miatt ($\Delta G = 0$, így $\Delta H = T\Delta S$) a ΔS entrópiakülönbség 10–20 J/Kmól, olyan kicsi, hogy a mérési pontosság határán van.

A szerves vegyületeknek a kis rácenergia miatt nagyon sok polimorfjuk van, ezzel kapcsolatos *McCrone* híressé vált megjegyzése, amely szerint a szerves vegyületek polimorfjainak száma a kutatásukra fordított pénzzel és idővel arányos.

Kimutatható, hogy a szabadenergia változása és a J oldhatóság között a következő összefüggés áll fenn:

$$\Delta G = G_2 - G_1 = RT \ln \left(\frac{J_2}{J_1} \right). \quad (7)$$

Az átmeneti hőmérséklet alatt az az állapot a stabilabb, amelynek szabadenergiája az adott nyomáson kisebb. Amikor a rendszer az 1 állapotból a 2 állapotba megy át, akkor $G_2 < G_1$, ezért $J_2 < J_1$, azaz a stabilabb állapot oldhatósága kisebb. A gyógyszer technológusnak elvileg az a polimorf a jobb, amelynek nagyobb az oldhatósága, ez az állapot viszont instabilabb.

A polimorf kutatás célja: elméleti alapokon megjósolni, hogy milyen szerkezet fog keletkezni adott kristálynövesztési feltételek mellett, megjósolni ezen polimorfok tulajdonságait, végül, gyakorlati eljárásokat kidolgozni az elméleti elveknek megfelelően.

A polimorfok vizsgálati módszerei:

- diffrakció (röntgen-, elektron-, neutron-diffrakció),
- mikroszkópia (fűthető mintatartóval, polarizációs feltétellel),
- termikus (termo-gravimetria [TGA], differenciális pásztázó kalorimetria [DSC]),
- spektroszkópia (infravörös-, Raman-, impulzusüzemű terahertz spektroszkópia),
- szilárdtest mágneses rezonancia.

A felsorolt vizsgálati módszerek fontosak magának a polimorfoknak a felkutatásában (ún. polimorf szűrésben), a polimorfot tartalmazó termékek hosszú idejű stabilitásának vizsgálatában, végül a szabadalmi visszaélések feltárásában.

A röntgendiffrakció a polimorfok vizsgálatának legalapvetőbb módszere. Közvetlenül a kristályszerkezet és nem a kristályszerkezet megváltozásából adódó má-

sodlagos tulajdonságok mérésén alapul. Az egykristály-diffrakció lenne kívánatos, minthogy az informatívabb, mint a pordiffrakció, de a gyakorlati életben meglévő kötöttségek miatt az esetek túlnyomó többségében poranyagok diffrakciójával kell beérnünk. A röntgendiffrakciónál hátrányként jelentkezik a röntgennyaláb nagy átmérőjéből adódó csekély laterális felbontás, továbbá a közepesnek ítéltető detektálási határok. Gondoljunk arra, milyen jó lenne egy tabletta két közeli szemcséjének azonosítása polimorfia szempontjából, netán a változások időbeli követése. Sajnos ez nem megy. A minimálisan 5%-os koncentráció a röntgendiffrakcióval való kimutathatósághoz szintén olyan követelmény, ami a gyakorlati életben hátrányt jelent. A laboratóriumi röntgenszó hiányosságait, mint például a kis laterális felbontóképességet kiküszöböli a szinkrotron sugárzás. A röntgenszóhoz képesti nagy forrásfolyékonysága és kis nyalábmérete igen sokat javít a helyzeten. Ez esetben csak az elérhetőség, a rendelkezésre állás a probléma.

A felsorolt módszerek közül még az infravörös-spektroszkópia és a Raman-spektroszkópia örvend népszerűségnek a polimorfok vizsgálatában. Ha kritériumként az érzékenységet és a laterális felbontást is figyelembe vesszük, akkor a mérleg a Raman-spektroszkópia javára billen az infravörös-spektroszkópiával szemben. Az alkalmazott lézerforrások hullámhossza miatt az infravörös-spektroszkópiával körülbelül 20 μm -es, a Raman-spektroszkópiával körülbelül 1 μm -es laterális felbontást érhetünk el. E két molekula-spektroszkópiás módszer érzékenysége (0,5–5%) is kívánni valót hagy maga után, különösen akkor, ha a gyakorlat által támasztott követelményekkel vetjük össze. Nagyon fontos, hogy a Raman-spektroszkópiában olyan jelerősítési lehetőségeket találtak, amelyek rezonancia révén akár egyetlen molekula kimutatására is alkalmasá teszik a módszert. Rezonancia léphet fel a besugárzó lézer hullámhosszának hangolása, vagy a vizsgálandó anyagnak fémfelületen (Au, Ag) való előkészítése (a fémekben gerjeszthető plazmonok közvetítésével), vagy az atomerő-mikroszkóp pásztázó tije (nagy elektromos térerő) révén. A felsorolt javítási lehetőségek kombináltan is alkalmazhatók: a pásztázó türe felvitt aranyréteggel dolgozunk, és a lézersugárzás frekvenciáját a vizsgálandó anyaghoz hangoljuk. A tüvel történő stimulálás másik nagy előnye, hogy messze felülmúlhatjuk azt a laterális felbontást, amelyet tű nélkül lehet elérni, az 1 μm -t. A tüvel történő Raman-erősítés a tű alatti néhány nanométerre korlátozódik.

Termikus analízis

Termikus analízis alatt összefoglalóan azokat az eljárásokat értjük, amikor az anyag különféle tulajdonságainak hőmérséklet-változás hatására bekövetkező változásait mérjük. Ezen módszerek közül a gyógyszer-technológiában leggyakrabban a termo-gravimetriát (TG) és a differenciális pásztázó kalorimetriát (DSC) használják. Az első esetben a hőmérséklet ha-

tására bekövetkező tömegváltozást, a második esetben pedig a minta által történő hőfelvételt, illetve hőleadást mérjük. Súlyváltozás következhet be a vizsgált mintában, ha a kristályosítás vagy átkristályosítás során felvett oldószerét elveszti, de a kristályvíznek hőmérséklet hatására bekövetkező elvesztése ugyanígy mérhető a termo-gravimetriával.

A DSC a minta hőtartalmának, illetve változásának mérésére szolgáló módszer: a vizsgált mintához referens minta vagy mintatartó mérése is társul, innen adódik a differenciális szó a módszer elnevezésében. A mintát és a referens mintatartót egyidejűleg felfűtik, és a mintában bekövetkező fizikai és kémiai folyamatok miatt a két mintatartó különböző hőmérsékletű lesz. A hőkiegyenlítésre használt energiát ábrázolják a felfűtési hőmérséklet függvényében. A műszaki megoldások részleteibe nem kívánok belemenni, de az ennek eredményeként előálló mérési lehetőségeket szeretném megmutatni. Példaként egy kereskedelmi berendezést említek, amelyben a hőmérsékletet -120 °C és 700 °C között lehet változtatni programozott módon, eközben a hőmérsékletet $120\text{ vékonyréteg-termoelemmel}$ méri $0,2\text{ °C}$ pontossággal és $0,02\text{ °C}$ reprodukálhatósággal. A minta hőtartalmának mérésében $0,01\text{ }\mu\text{watt}$ felbontást érnek el. Szükség esetén inert vagy reaktív gázok atmoszférájában helyezik el a mintát, miközben a nyomást $0\text{--}10\text{ MPa}$ között lehet beállítani.

Olyan fizikai jellemzők, mint olvadáspont vagy entalpia, olyan fizikai állapotváltozások, mint kristályosodás, polimorf átalakulás, olvadás, párolgás, szublimáció, deszorpció mérhető TG-vel és DSC-vel. A kémiai változások közül a termikus bomlás, stabilitás, oxidáció stb. mérhető, illetve a megfelelő reakcióhők meghatározhatók.

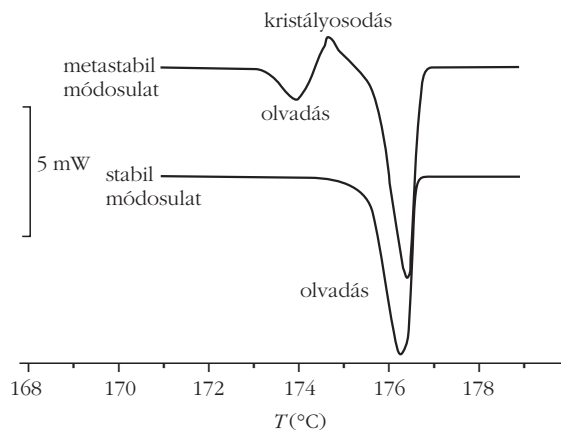
A konvenció (IUPAC) szerint a hőtermeléssel járó folyamatokat felfelé irányuló csúcsok, a hőfelvétellel együtt járó folyamatokat lefelé irányuló csúcsok jelzik. (A gyakorlatban vannak berendezések, melyek nem követik ezt a konvenciót.) Az olvadás, mint endoterm folyamat lefelé irányuló, a kristályosodás, mint exoterm folyamat felfelé irányuló csúcsot ad a 4. ábrán. A két polimorf között körülbelül $2,9\text{ °C}$ olvadáspont-különbség van. (A gyógyszeripari gyakorlatnak megfelelően a közleményekben nem adják meg a hatóanyag nevét.)

A termikus analitikai berendezések napjainkra olyan fejlettséget értek el, hogy a TG és DSC kombinációja, továbbá ezeknek tömegspektrométerrel, infravörös-spektrométerrel vagy gázkromatográffal való kombinációja sem tekinthető különlegességnek.

A termikus módszereket a gyógyszerek fejlesztésében és gyártásában a főként kompatibilitási, stabilitási, kristályszerkezeti és polimorfiai vizsgálatokra használják fel.

A kompatibilitási vizsgálatokat még a fejlesztés során végzik, a hatóanyagjelölteket segédanyagjelöltekkel hozzák össze, és azt vizsgálják, hogy vannak-e olyan kölcsönhatási folyamatok, amelyek egyik vagy másik segédanyag alkalmazását kizárják.

A stabilitási vizsgálatok során a készítményeket szabványokban meghatározott hőmérsékleten megha-



4. ábra. Két hatóanyag-polimorf DSC-görbéje: a két polimorf hőtartalmának változása a hőmérséklet függvényében.

tározott nedvességtartalomnak teszik ki, majd rendszeres időközönként vizsgálják a hatóanyag-tartalom csökkenését. Ebből határozzák meg a gyógyszerek felhasználhatósági időtartamát.

A kristályszerkezeti vizsgálat kiterjedhet arra, hogy vajon az adott anyag tartalmaz-e amorf hányadot, mert az a hatóanyag számos tulajdonságát befolyásolja. Sok esetben az originális készítményhez hasonló kioldódás és biohasznosulás csak amorf hatóanyaggal érhető el. Megjegyzendő, hogy az amorf anyag mindig könnyebben oldódik, mint a megfelelő kristályos anyag, mert amorf anyagok oldásakor a kristályrács felbontásába nem kell külön energiát befektetni. Az amorficitás mértékének meghatározására éppen az oldási hő DSC-vel történő mérését használják fel. A kristályos anyag és amorf anyag oldási hőjének meghatározása után, a kevert anyag oldási hőjének mérése sokszor érzékenyebb módszernek bizonyul az amorf hányad meghatározására, mint a röntgendiffrakció.

A polimorfia meghatározása termikus analízissel napjaink gyógyszergyártásának egyik „forró pontja”. A bevezetőben említett Zantac gyógyszer esete kellőképpen rávilágít ennek jelentőségére.

Az eddigiekben csak a legfontosabb alkalmazásokat említettem, de például az olvadáspont vagy entalpia (ΔH) meghatározása is fontos gyógyszerészeti alkalmazás. Az olvadáskor mért csúcs szélességéből és az alacsonyabb hőmérsékletek felé való eltolódásából (van 't Hoff-egyenlet), bizonyos körülmények között ($98\% < \text{koncentráció} < 100\%$) a vizsgált anyag tisztaságára lehet következtetni, az entalpia ismerete pedig a termodinamikai számítások fontos paramétere.

Összefoglalás

Igyekeztem betekintést adni a gyógyszerek fejlesztésének és gyártásának világába azon fizikus és tanárkollegák számára, akik a gyógyszerekkel legfeljebb csak magánéletükben találkoznak. Meg szerettem volna mutatni, hogy nagyon sok fizikára van szükség ezen a területen. Az áttekintés meglehetősen önkényes, de megmutatja, hogy fizika nélkül nincs gyógyszerünk.

BÚCSÚ KETSKEMÉTY ISTVÁN PROFESSZORTÓL

Tisztelt Gyászoló Család, Tisztelt kollégák!
Hölgyeim és uraim!

Összeszoruló szívvel, megilletődve, és riadtan állunk itt kiszolgáltatva a fájdalomnak, melyet a könyörtelen természet okoz nekünk mindannyiszor, amikor egy kollégánk örökre elköltözik tőlünk. Itt hagyott bennünket az egyik utolsó, ha nem a legutolsó igazi professzor, akinek nem a köztársasági elnök kinevezése adta ezt a rangot, hanem habitusa, minden mozdulata, minden mondata. Soha egy hangos szava nem volt, leszámítva a Budó tanteremben tartott előadásait. Mindig nyakkendőben, mindig szerényen, mindig megértően fordult embertársaihoz, és mindig volt a fejében az adott helyzethez megfelelő bibliai idézet. Szándékosan nem mondom, hogy beosztottjaihoz, mert a főnök voltát soha nem érezte senkivel.

Tisztelt Professzor Úr!

Az egész siralmas huszadik század nevében kell elnézést kérnem Tőled, mert ez a század bőven adott alkalmat arra, amit Pál apostol írt a korintusiaknak: „A reménységben örvendeztek, a nyomorúságban legyetek béketűrők”. Azt hiszem, egész életed során mindkettőben bőven volt részed, mégis meg tudtál maradni szelíd, udvarias úriembernek. Pedig minden olyan jól indult. 1927-ben a dombegyházi elemi iskola tanítójának fiaként születél, ezért iskolásként példamutatóan minden tárgyból, így hittanból is kiválóan meg kellett felelni, nyilván innen a Biblia mély ismerete. A Klauzál Gábor Gimnáziumban megkezdett tanulmányok is szebb jövővel kecsegtettek. Időközben az ország belépett a második világháborúba, majd az egyre romló hadi helyzet miatt, amikor a szovjet csapatok átlépték a magyar határt, leventeként a visszavonuló német/magyar csapatok magukkal vittek. Bekövetkezett az elkerülhetetlen, szovjet hadifogságba estél. A háború miatt a körülmények mindenütt nagyon rosszak voltak, de még mindig sokkal jobbak, mint egy hadifogolytáborban. Az ott szerzett szívizomgyulladás gyógyítására kevés esély volt a táborban, ezért egyszerűen hazaengedtek a szüleidhez. Végül is sikerült ebből meggyógyulni, és

Ketskemény István, a Szegedi Tudományegyetem Természettudományi Kar Optikai és Kvantumelektronikai Tanszékének nyugalmazott tanszékvezető egyetemi tanára, Professor Emeritus, életének 79. évében, türelemmel viselt hosszú, súlyos betegségben 2007. február 3-án elhunyt. Emlékének adózunk *Rácz Béla* rektorhelyettesnek a temetésén mondott búcsúbeszédével.

a Budapesti Egyetemre beiratkozni, majd 1950-ben matematika-fizika szakos okleveles középiskolai tanári képesítést szerezni Szegeden. Már az egyetemi tanulmányok alatt kiderült tehetséged és vonzalmad a matematika iránt. Így életed első publikációját *Fodor Géza* barátoddal publikáltad a halmazelmélet tárgyában. Az ígéretes pályakezdés aztán úgy folytatódott, hogy éjjel jött a fekete autó. Az abban ülők egyike közölte Veled: „Ketskemény elvtárs, fizikus aspiráns leszel” (kandidátus-jelölt, szovjet mintára). A bátortalan ellenkezésre az volt a válasz: „Ketskemény elvtárs, honnan tudhatnád te azt, mi kell a magyar népnek?” A



magyar népnek ekkor a *Budó Ágoston* által folytatott lumineszcenciavizsgálatok kellettek, így kerültél a Kísérleti Fizikai Tanszékre. Az aspiránsoknak a tudományos munka mellett ideológiai képzése is fontos volt, erre pedig csak egy hely volt alkalmas, Budapest. A képzés időpontja úgy volt megválasztva, hogy az éjszakai személyvonattal fel kellett utazni, nyitásra már az Állatkert kapujában lehetett lenni, és télen a trópusi állatok istállójában elfogadható hőmérsékleten eltölteni egy órát. A tudományos munkában szerencsésebben alakultak az események, így rövid időn belül a szekunder fluoreszcenciáról és a polarizációról publikált eredmények alapján kandidátus

lettél. 1964-ben pedig a fizikai tudomány doktora, egy év múlva pedig egyetemi tanár. Közben, mint dékánhelyettes a Kar hivatalos ügyeivel is foglalkoztál. Oktattál, mint a mechanika, optika és hőtan alapkollégium és a spektroszkópia tárgy előadója. Ekkorra az is látszott, hogy a lumineszcenciavizsgálatok túl vannak a csúcson, és valamilyen irányváltoztatás szükséges. Sokan vagyunk, *Bor Zsolt*, *Szabó Gábor*, *Szattmári Sándor* és jómagam, akik közvetlenül Neked tartozunk köszönettel, hogy jó érzékkel a rokon terület felfutó ágába kapcsolódhattunk be az 1965-ben megindult lézerfizikai kutatásokba. Az 1965-ben elkezdett irányváltás olyan sikeres volt, hogy 1969-ben, a festéklézerek felfedezése után két évvel már Szegeden is volt működő festéklézer. A sors ismét nem volt kegyes, mert 1969. december 20-án meghalt Budó Ágoston, így a Tanszék szellemi vezetése mellé Rád szakadt az adminisztratív vezetése is. Ezekben az időkben a tudományos közéletben is igen aktív voltál: a SZAB ügyvezető titkára, matematikai és fizikai szakbizottságának az elnöke, a tudományos minősítő bizottság fizikai és csillagászati szakbizottság tagja, az MTA Fizikai Osztály Spektroszkópiái Albizottságnak és az

Atomhéjfizikai Albizottságnak a tagja. Közben kitüntettek az Oktatásügy Kiváló dolgozója címmel, a Schmid Rezső díjjal, a Munka Érdemrend ezüst, majd arany fokozatával, az Eötvös Társulat emlékérmével, Április Negyedike érdemrenddel és Eötvös József koszorúval. Időközben életed a Tanszékével és a Kutatócsoportéval egygyé vált. Így folytatódott tovább akkor is, amikor 1987-ben nyugdíjba mentél. Azóta is minden nap bejöttél, dolgoztál, ha mégsem, akkor minden esetben szabadságot vettél ki.

Tisztelt Professor Úr! Őszinte fájdalommal búcsúzom Tőled az Egyetem, a Kar és az összes fizikus nevében!

Mit ígérhetünk Neked mi, akik itt maradtunk Nélküled? Azt, hogy minden módon igyekszünk elkerülni azokat a történelmi zsákutcákat, amelyekben Neked volt részed az elmúlt 79 évben. Azt, hogy nem felejtjük el mélyenszántó, sokszor mosolyra fakasztó böl-

cességeidet. Azt, hogy az általad elindított kutatási irányt sikeresen fogjuk művelni, amíg csak értelme van. Azt, hogy emlékeidet megőrizzük, életed pályáját példának tekintve tesszük azt, amit tenni kell, ahogyan Te is tetted.

Isten Veled Professor Úr!

Ketskemény István a Fizikai Szemlében

Ketskemény István: *Jedlik Ányos István (1800–1895) — 1975/115*

Ketskemény István: *A Budó-féle lumineszcencia-iskoláról különös tekintettel a kutatás megszervezésére — 1989/347*

Ketskemény István: *Emlékezés Budó Ágoston születésének 75. évfordulója alkalmából — 1989/360*

Ketskemény István: *Budó emlékülés — 1989/361*

Ketskemény István, Hilbert Margit: *A folyadékok felületi feszültségéről — 1999/412*

Ketskemény István, Farkas Zsuzsa: *Az árapályjelenségek fizikai hátteréről — 2003/320*

BIRÓ GÁBOR (1925–2007)

Hat évtizeden keresztül oktatott. Oktatói munkáját a budapesti tudományegyetem fizika tanszékén demonstrátorként kezdte 1948-ban. Óráit 2007 januárjában még megtartotta.

Biró (Goitein) Gábor Budapesten, 1925. szeptember 26-án született. Az ELTE matematika-fizika tanár szakán 1950-ben végzett. Rövid kísérleti fizikusi munkásság után a fizika elvi kérdései iránti érdeklődése 1953-ban a fizika tanszékről, ahol tanársegéd volt, az egyetem filozófiai tanszékére vezetete. A filozófia szakot is elvégezte 1957-ben. Következetes magatartása miatt könnyen támadhatóvá vált. Így került 1959 júliusában tanársegédként a BME (akkor ÉKMűE) Kísérleti Fizikai Tanszékére, melyet *Gyulai Zoltán* akadémikus vezetett.

Kezdetben itt is kísérleti munkával foglalkozott, ionos kristályok elektromos vezetését mérte. A filozófia iránti vonzalma azonban nem hagyta el. Először a klasszikus fizika kutatás-módszertani kérdéseit, kiteljesedését és túlhaladását vizsgálta. Ezután fordult mindezen kérdések hazai vetületei felé. A klasszikus fizika túlhaladása vezette el a relativitáselmélet történeti-interpretációs kérdéseinek kutatásához, majd ismét a hazai vonatkozásokhoz. Kandidátusi disszertációját *Fenomenológia és modell alkotás szerepe a fizikai kutatás történetében* címmel 1969-ban védte meg. A Nemzetközi Tudománytörténeti Unió (IUHPS) számos kongresszusán szerepelt előadásaival 1965 és 1989 között, a szerve-



zet magyar nemzeti bizottságának titkára volt. 1987 és 2001 között több ciklusban vezetett OTKA-témát. Munkacsoportjában tanszéken kívüli munkatársak, köztük akadémikus, országos múzeum főigazgatója is részt vettek. Eredményeiket százas nagyságrendű publikációban tették közzé.

Fizikatörténeti vizsgálatait meszeszemenően hasznosította a műegyetemi fizika oktatásában. Tanszéki munkatársaival hét jegyzetet írt. Sikeresen megvalósította azt az elképzelést, hogy a fizika ne csak a mérnöki tárgyak alapozó tárgya legyen, hanem a mérnöki tárgyak el-sajátítása után, a negyedik és ötödik évfolyamon, összegező, általános áttekintést nyújtó tantárgy is. Így felső éves közlekedésmérnök-hallgatóknak kvantummechanikát, relativitáselméletet tanított több évtizeden keresztül.

Jó vezetőnek is bizonyult. Szinte akarata ellenére nevezték ki tanszék-vezetőnek 1975-ben, amikor az ak-

kori tudománypolitikára jellemző átgondolatlan átszervezések valamint váratlan halálesetek miatt mint az egyetlen minősített docens maradt a tanszéken, ahol addig (*Mátrai né Zemplén Jolán* halála után) a négytagú Tudomány- és Technikatörténeti Kutatócsoportot vezette. Először is címzetes, illetve félállású docensként három minősített akadémiai kutatót kapcsolt be a tanszék munkájába. A tanszék nem alakította át saját képére, nem tette kutatási irányát a tanszék egyedüli kutatási irányává. Így folytatódtak a még Gyulai Zoltán

indította kristályfizikai kutatások. Több oktató szerzett ebből a témából kandidátusi fokozatot. A BME TTK jelenlegi dékánja is ebben a csoportban dolgozott. Támogatta az egyetem profiljának megfelelő épületfizikai vizsgálatokat, amelyek nemcsak pénzt jelentettek a tanszéknek és az oktatóknak, hanem többeknek tudományos előmenetelt. Ebből a témakörből is került ki kandidátus. Az ő tanszékvezetése idején indultak el a kvantumoptikai kutatások. A tanszéken kezdte munkáját olyan fiatal, aki ma egy Max Planck intézet igazgatója. Közvetlen munkatársaiból is lett más tudományos intézetekben igazgató, illetve igazgatóhelyettes. Egyik munkatársa a bostoni egyetemen *Einstein* összegyűjtött munkáinak szerkesztői közé került. Igyekezett az oktató és kutatómunka tárgyi feltételeit is javítani. Átépitette a tanszékot, kihasználatlan folyosórészek felhasználásával jelentősen növekedett a tanszéki szobák száma. Egyetemi tanárrá 1981-ben nevezték ki. A tanszékvezetésről 1988-ban leköszönt.

Nemcsak a saját tanszékével törődött. Mint a BME egyik rektorhelyettese (1978–1987) sokat tett azért, hogy a BME-n létrejöhessen a Természet- és Társadalomtudományi Kar 1987-ben. Apróság, de sokrétű munkájára jellemző, hogy az ő javaslatára került *id. Szily Kálmán* arcképe a dékáni láncra.

Országos szinten is részt vett a szakmai közéletben. A MTA Tudomány- és Technikatörténeti Komplex Bizottságának, az ELFT Fizikatörténeti Szakcsoportjának, az OTKA Tudomány- és Technikatörténeti Zsűrijének elnöke volt. Számos nemzetközi szervezet magyar nemzeti bizottságának volt tagja.

Hetven éves korában, 1995-ben, a BME-n nyugdíjazták. 1996-tól a Gábor Dénes Főiskolán az Alaptudományi Tanszék vezetője lett. A Főiskolán és a LSI Informatikai Oktatóközpontban a tudományos főigazgató-helyettesi posztot is betöltötte. Kapcsolata a BME-vel sem szűnt meg: A BME TTK Doktori Bizottságának tagja volt, és a Fizikai Intézet keretében nyugállományú egyetemi tanárként akkreditált speciálkollégiumokat tartott.

A *Fizikai Szemlében* bő kéttucatnyi cikke, recenziója jelent meg. A hő problémájáról írt 1960-ban. Tavaly márciusban adta közre ebben a folyóiratban *Gábor Dénes* és M. Zemplén Jolán 1961-es levélváltását.

Szakmai elismerésként megkapta a „Felsőoktatás Kiváló Dolgozója” címet (1975), az MTESZ-díjat (1985),

a BME Emlékérmét (1987). Az MTESZ Emlékérmét 1996-ban a köztársasági elnök adta át neki.

Nagyon szerette családját. 1962-ben nősült meg. Lánya 1966-ban, fia 1971-ben született.

Tartalmas élete 2007. március 8-án ért véget.

Hartmann Ervin
MTA SZFKI

Biró Gábor a Fizikai Szemlében

- Biró Gábor: *A hő problémája* — 1960/165
 Biró Gábor: *A hőtan fejlődése; az első fizikai atomelmélet kialakulása a XIX. század derekán* — 1962/11
 Biró Gábor: *Az entrópiafogalom kialakulásának történetéhez* — 1963/84
 Biró Gábor: *A fenomenológia és a modellalkotás szerepe a fizikai kutatás történetében* — 1965/205
 Biró Gábor: *Az elektromágneses tér fogalmának kialakulása (Faraday és Maxwell)* — 1967/292
 Müller A.: *Quantum Mechanics (Biró Gábor)* — 1974/320
 Biró Gábor: *Fizika és mérés* — 1976/374
 Biró Gábor: *Szily Kálmán (1838–1924) 150 éve született* — 1989/207
 Radnai Gyula, Kunfalvi Rezső: *Európaiságunk egy történeti metszete* (Biró Gábor) — 1989/320
 Nagy Ferenc: *Magyarok a természettudomány és a technika történetében* (Biró Gábor) — 1993/80
 Kovács László: *Fejezetek a magyar fizika elmúlt 100 esztendejéből (1891–1991)* (Biró Gábor) — 1993/212
 Nagy Ferenc: *Bay Zoltán pályája és példája* (Biró Gábor) — 1993/469
 Nagy Ferenc: *Szent-Györgyi Albert és a magyar Nobel-díjasok* (Biró Gábor) — 1993/514
 Marx György, Ronyecz József (szerk.): *Lánczos Kornél 1893 / 1993* (Biró Gábor) — 1994/123
 Biró Gábor: *Nemzetközi Lánczos-centenárium* — 1995/34
 Tarján Imre: *Emlékezés (1994)* (Biró Gábor) — 1996/108
 Endrei Walter (szerk.): *Műszaki innovációk sorsa Magyarországon* (Biró Gábor) — 1996/368
 Biró Gábor: *Farkas Gyula mai olvasata* — 1997/322
Three fundamental papers of Loránd Eötvös (Biró Gábor) — 1998/405
 Biró Gábor, Szász Gábor, Vargha Magda: *Tudomány és technika kapcsolatának történeti változásai* — 2000/212
 Gábor Dénes: *Tudományos, műszaki és társadalmi innovációk* (Biró Gábor) — 2000/214
 Simonyi Károly: *A magyarországi fizika kultúrtörténete (XIX. sz.)* (Biró Gábor) — 2001/138
 Biró Gábor: *Benne van-e az elektrodinamika törvényeiben a relativitáselmélet?* (reflexió a Blészer-Gnädig-Varga cikkekre) — 2001/297
 Jéki László: *KFKI* (Biró Gábor) — 2002/68
 Feynman Richard P.: *A dolgok értelme* (Biró Gábor) — 2002/132
 Kovács László: *Eugene P. Wigner and his Hungarian teachers* (Biró Gábor) — 2002/324
 Biró Gábor: *Gábor Dénes és M. Zemplén Jolán 1961-es levélváltása* — 2006/94

ATOMOKTÓL A CSILLAGOKIG – 2007 ŐSZI PROGRAM

Az előadások délután 5 órakor kezdődnek az ELTE TTK látványos északi tömbjében (1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A), az Eötvös-teremben (földszint 0.83 terem). A tervezett program:

Szeptember 27. – *Fodor Zoltán*: Az elemi részek fizikája és az anyag eredete az Univerzumban, bevettét mond: *Lendvai János*, a Fizikai Intézet vezetője

Október 11. – *Csörgő Tamás*: Magyarok Amerikában – Forró nyomon az Ősanyag nyomában

Október 25. – *Groma István*: Virtuális anyag!?, Valóság?

November 8. – *Frei Zoltán*: A gravitációs hullámok kutatása földi és űreszközökkel

November 22. – *Geszti Tamás*: A szép és hasznos kvantummechanika

December 6. – *Sólyom Jenő*: Szupravezetés

December 20. – *Veres Gábor*: Milyen eszközökkel figyelhetők meg a világ legkisebb alkotórészei?

ÚJ ROVAT A FIZIKAI SZEMLÉBEN: »ATOMOKTÓL A CSILLAGOKIG«

Vitathatatlan tény, hogy a fizika felfedezései nélkül sokkal szegényebb lenne civilizációnk: nem lenne villany, távközlés, számítógép, repülés, műhold, internet, bankkártya, tomográfia és még rengeteg más, napjainkban megszokott berendezés és eljárás. Mégis, a fizika iránti társadalmi érdeklődés az utóbbi évtizedekben jelentősen csökkent. A jelenség érinti a természettudományi és mérnöki felsőoktatás egészét: az Eurostat 2003-as adata szerint a 20–29 éves korosztályban az ilyen képzésben diplomát szerzők száma Magyarországon 4,8 fő ezer lakosonként, míg az EU 25 tagállamában az átlag 12,2. Ezzel a számmal Magyarország az utolsó helyet foglalta el az Európai Unióban. Ha ez így marad, akkor valószínűleg le kell mondanunk a fejlett országokhoz való felzárkózásról.

Az okok széleskörűek, nem orvosolhatóak könnyen és gyorsan, de biztosan szerepe van a középiskolai fizikaoktatás mennyiségi, és sajnos – persze fontos kivételektől eltekintve – minőségi hanyatlásának is. E problémát felismerve határoztuk el az Eötvös Loránd Tudományegyetem Fizikai Intézetében egy elsősorban, de nem kizárólag, középiskolásoknak szóló, ingyenes ismeretterjesztő előadássorozat beindítását 2005 decemberében. A sorozat megszervezéséért és lebonyolításáért elsősorban *Cserti Józsefet* illeti köszönet, de sokan segítettek mind oktatóink, mind pedig hallgatóink közül is. Az előadásokon az ELTE Fizikai Intézetének munkatársai általában a modern fizikai kutatások általuk is művelt, rendkívül szerteágazó területeit mutatták és mutatják be közérthető módon. Az előadássorozatnak az *Atomoktól a csillagokig* címet adtuk, hogy érzékeltessük a fizika sokszínűségét. Az előadásokon érintett témák mostanra még ezeket a tág határokat is szétfeszítették. Az előadássorozat folyamatosan frissített honlapján (www.atomcsill.elte.hu) az elhangzott és a tervezett előadások előadói, témái megtekinthetők, sőt, minden megtartott előadás anyaga letölthető módon fenn van az interneten, és a legtöbb előadás videofelvétele is letölthető.

Minden tőlünk telhetőt megtettünk, hogy az előadások híre eljusson a „címzettekhez”, a középiskolásokhoz. Az érdeklődés, legnagyobb örömeinkre, felülmúlta várakozásainkat, nemegyszer a 160 ülőhelyes Eötvös-

terem lépcsői is megteltek. Az előadások sorozata immáron a negyedik félévben, jelenleg is, tart, túl a 25. előadáson, és eddig még nem ismétlődött téma. Néhány esetben az ELTE más intézményeinek munkatársait is felkértük előadásra például a csillagászat, föld- és környezettudomány területéről, hiszen a fizika alapképzésen diplomát szerzők számára az ELTE-n ezeken a mesterszakokon is nyitva áll a továbbtanulás lehetősége. Az előadások után a Csodák Palotája munkatársai látványos és érdekes kísérleti bemutatókat tartanak, amelyek ugyancsak rendkívül népszerűek a hallgatóság körében. Az előadás-sorozatot természetesen folytatjuk a következő tanévben is, az előzetes program már olvasható a honlapon.

Nagy örömeinkre szolgál, és úgy gondolom, hogy az előadások elismerését jelenti, hogy két folyóirat, a *Természet Világa* és a *Fizikai Szemle* szerkesztői is felajánlották, hogy lapjukban az előadók nyomtatásban is közöljék előadásuk anyagát. A cikkeket e két folyóirat között nagyjából fele-fele arányban osztjuk meg,

ami azért is kedvező, mert így az előadások nyomtatott változata rövidebb idő alatt juthat el az érdeklődőkhöz. Ugyanakkor a két folyóirat sajátosságait igyekeztünk a cikkek elhelyezésénél tartalmilag és az írások stílusában is figyelembe venni. Reményeink szerint a nyomtatásban megjelenő változatok, esetleg kiegészítve a sorozat honlapján található anyagokkal, még érthetőbbé és elérhetőbbé teszik minden érdeklődő számára a bemutatott területeket. A hozzáférhetőséget különösen fontosnak tartjuk, hiszen az előadásokra földrajzi vagy időpont-egyeztetési nehézségek miatt nem juthat el minden érdeklődő. (Az ilyen nehézségek leküzdésére ezúton is felajánljuk, hogy az érdeklődő középiskolák meghívására munkatársaink bárhova szívesen ellátogatnak előadást tartani.)

A fenti gondolatokkal örömmel bocsátom útjára az előadássorozat címét átvevő cikksorozatot a *Fizikai Szemlében*, minden olvasónak hasznos és kellemes időöltést kívánva a cikkek tanulmányozásához. Minden kérdést, észrevételt, javaslatot szívesen fogadunk, és nem hagyjuk válasz nélkül.

Lendvai János
ELTE Fizikai Intézet



Hosszú évek tapasztalata, hogy a fizika felsőfokú tanulását választó középiskolások első számú ösztönzői a csillagos éghez kapcsolódó jelenségek és azok megfigyelésének egyre gazdagodó eszköztára. Az Univerzumról szerzett ismereteink jórészt elektromágneses hullámok észlelése révén bővülnek. A rádióhullámoktól az infravörösön és a látható spektrumon át a röntgen- és gamma-sugárzás tartományáig a földi és a légkörön kívüli megfigyelések sokasága ad rendszeres képet a Világegyetemben állandósultan jelenlévő sugárzásokról, csakúgy, mint a néhány hetes vagy hónapos fénygörbével jellemezhető, óriási energiát felszabadító robbanásszerű jelenségekről.

Ebben az előadásban a *nem-elektromágneses* sugárzás két fajtáját mutatom be. Az alapvető ismeretek összefoglalásán túl az is célom, hogy a hallgatóság megismerhesse az Eötvös Egyetem Fizikai Intézetének folyamatos szerepét e kutatások élvonalában. A két jelenségkör, amellyel foglalkozni kívánok: a kozmikus sugárzás és a természetes eredetű neutrínósugárzás.

A kozmikus sugárzás

1912-ben *V.F. Hess* osztrák–amerikai fizikus 5000 méter magasra emelkedő léggömbjén a sztatikus elektromossággal feltöltött elektroszkópok kisülésének sebességét vizsgálta (1. ábra). A lamellák töltésvesztését a levegőben lévő szabad töltéshordozók előfordulási gyakorisága határozza meg. Azt tapasztalta, hogy a magasság növekedésével e töltéshordozók sűrűsége nőtt. Következtetése szerint a levegő alkotórészeit a Földet kívülről érő „nagy áthatolóképességű sugárzás” ionizálja.

A kozmikus sugárzás Nobel-díjjal jutalmazott megfigyelését követően e sugárzás összetevőinek vizsgálata az elemi részek korai történetének legfontosabb felfedezéseire vezetett. 1932-ben *C. Anderson* a sugárzás ködkamrás megfigyelése során felfedezte az elektron antirészecskéjét, a *Dirac* által alig valamivel korábban megjósolt pozitront. 1937-ben ugyanő *S. Neddermayer*-ral kimutatta a „nehéz elektron”, azaz a müon létét is (az akkori kevésbé következetes névadási szokások miatt kezdetben mü-mezonként emlegették, de már a negyvenes években kiderült, hogy az erősen is kölcsönható mezonokhoz e részecskének semmi köze).

A kozmikus sugárzás vizsgálatában a Hess-t követő legnagyobb jelentőségű felfedezést *Pierre Auger* tette 1938-ban. Ő értette meg, hogy a kozmikus sugárzás bejövő részecskéi óriási energiájukat nem egyetlen ütközésben, hanem ütközések sorozatában veszítik el. Mind-egyik ütközésben a légkör atomjainak nagy energiát adnak át, amelyet a létrejött ionok további, lavinaszerű

ütközéssorozatban részecskék ezreinek terítenek szét. Így jönnek létre a sok négyzetkilométernyi területet befedő kozmikus záporok. A jelenséget Auger-vel egyidőben felismerte egy Manchesterben pályáját kezdő fiatal, emigráns családban felnövekedett magyar fizikus, *János Lajos* is, aki a II. világháború után hazatelepítette a kozmikus sugárzások kutatását, és az ELTE Atomfizikai Tanszékének alapító vezetője volt. Az ő közleménye a méréseknek a matematikai statisztika törvényeit kielégítő gondos értékelése miatt néhány hét késéssel jelent meg. A tudománytörténet így is „kötelezően” említi őt a kozmikus sugárzás szisztematikus vizsgálata első nagy egyéniségei között, a manchesteri laboratóriumában készült fénykép nem hiányzik az ottani egyetem fizikai intézetének fényképgalériájából.

Az egyre nagyobb kiterjedésű detektormezőkön egymással összefüggésben (koincidenciában) észlelt részecskék energiáinak összességéből rekonstruálható a záport indító részecske energiája. A végső részecskék energiáját a víztartályokbeli ütközésük során meglökött töltött részecskék Cserenkov-sugárzásának elemzéséből lehet megmérni, amivel még a bejövő részecske érzékelési irányára is következtetni lehet. A sok évtizedes, egyre tökéletesedő észlelési technikát használó kutatás eredménye az, hogy mindig találtak egy előzetesen elképzelt többszöröse határenergiát meghaladó energiájú elsődleges részecskét, bár az energia növekedésével egyre csökkent előfordulási gyakoriságuk. Így 1991-ben a Utah állambeli (Egyesült Államok) Fly's Eye (összetett légy szemre emlékeztető struktúrájú) detektorral (2. ábra) 10^{19} eV összenergiájú záport észleltek. Összehasonlításul: 2007 őszén kezd meg működését a mindaddig legnagyobb energiá-

1. ábra. V.F. Hess (középen) léghajójával, amelyen a Föld magaslégkörében jelenlévő ionizáló sugárzást felfedezte.



Az ELTE Fizikai Intézet *Atomtól a csillagokig* előadássorozatán 2006. februárban tartott előadás írott változata.



2. ábra. A Légyszem (Fly's Eye) kozmikus sugárzási detektortelep. A jól megkülönböztethető tartályokban haladó töltött részecskék keltette Cserenkov-sugárzás révén mérik a zápor részecskéinek sebességét, amelyből számított mozgási energia segítségével számolják vissza a záport indító kozmikus részecske energiáját.

jú földi részecskegyorsító, a Nagy Hadron Ütköztető (LHC) Genfben, amellyel 100 TeV-es (10^{14} eV-os) protonokat állítanak majd elő. A 1990-es évtized elején angliai és japán kutatók 10^{21} eV-ot meghaladó energiájú zápor-események méréséről is beszámoltak.

Elfogadhatóak-e ezek a felfedezések? Nincs-e mégis valamilyen felső korlát a kozmikus sugárzás részecskéinek energiájára? Az egyik válaszlehetőséget a kozmikus sugárzás forrásainak számbavétele jelentheti. Ezekre vonatkozóan azonban nincs világos, megfigyelésekkel egyértelműen alátámasztott elképzelés. A legbiztosabbnak tekinthető *E. Fermi* 1950-ben tett gyorsítási javaslata, amely a felrobbanó csillagokból kiáramló és lökeshullámot képező plazmából történő energiaátadást feltételez. Lökeshullámok világos nyomát többször sikerült lefényképezni szupernóva maradványok áramlását követve. Egy másik, nagy energiatartalmú forrás az aktív galaxismagokból (AGN) sugárszerűen kiáramló anyag lehet. A legnagyobb energiakibocsátással (10^{53} J) járó, robbanásszerű eseményeket, a gamma-kitöréseket kísérő részecskeáram megértése kezdeti lépéseinél tart.

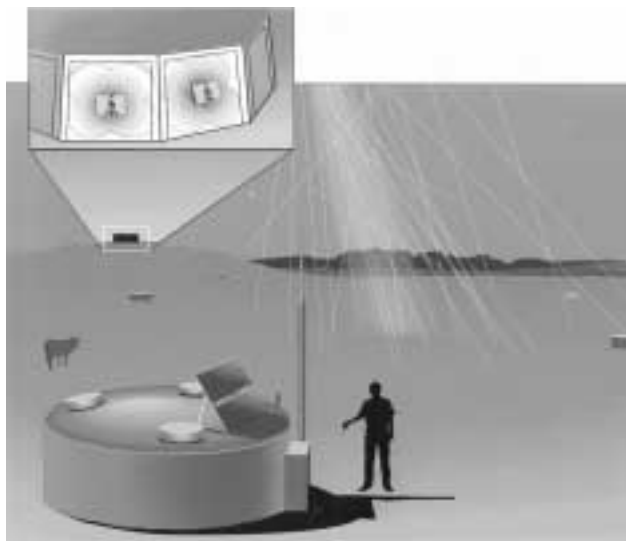
Biztosabb kép alakult ki a kozmoszon átszáguldó részecskék energiájának változásáról az út során bekövetkező kölcsönhatások okán. A Világegyetemet a korai forró korszakban elemi részecskék sokasága töltötte meg. A forró Univerzumban ezek reverzibilis részecskereakcióival állandósult a sűrűségük, amely egyensúlyi koncentráció a tágulás során a reakció-egyensúly eltolódása miatt csökkent, majd a reakciók egyirányúvá válását követően az instabil részecskék elbomlásával egyensúlyi koncentrációjuk a zérushoz került közel. Mára a stabil részecskék egyre kisebb átlagenergiájú gáza vesz körül bennünket, közülük is elsősorban a fotonoké és a neutrínóké.

A hideg kozmikus fotongáz létét a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzással 1965-ben kimutatták, a neutrínógáz létének bizonyítása még előttünk álló feladat. Már 1966-ban, egymástól függetlenül az USA-beli *Greisen*, valamint a szovjet *Zatsepin* és *Kuzmin* rámutattak arra, hogy egy 10^{20} eV-ot meghaladó energiájú kozmikus sugárzásbeli protonnak a háttérsugárzás tipi-

kus fotonjával való ütközése akkora összenergiának felel meg, amely meghaladja a pion nyugalmi energiáját, tehát ezen energia fölötti kozmikus sugárzás részecskéi energiát veszítenek pionok fotoprodukciónál ($p + \gamma \rightarrow p + \pi^0$). Kiszámolták, hogy e folyamat szabad úthossza, azaz az a távolság, amelynek megtétele során legalább egy reakció várhatóan bekövetkezik, nagyjából 50 Mpc (150–160 millió fényév). Ha tehát a sugárzás forrása ennél távolabb van, akkor földi obszervatóriumokban nem szabad 10^{20} eV-nál nagyobb energiájú eseményeket regisztrálni. A kilencvenes években észlelt tucatnyi nagyobb energiájú esemény nem hozható kapcsolatba semmilyen, e távolságon belüli szupernóva-robbanással vagy kozmikus katasztrófával.

Rejtély tehát, hogyan keletkezhetnek ilyen óriási energiájú záporok a földi légkörben. Vizsgálatának elméleti útja sok feltételezett mechanizmusra mutatott rá. Itt az 1990-es évek második felében nagy figyelmet kapott magyar javaslatot említtem meg, amelyet *Fodor Zoltán* és *Katz Sándor* az ELTE Fizikai Intézet Elméleti Fizikai Intézetének munkatársai *Andreas Ringwald* hamburgi kutatóval együtt dolgoztak ki. Ez a javaslat a kozmikus fotongáznál kissé hidegebb (kb. 1,96 K-es) kozmikus antineutrínó-gáz létén alapszik. Ezt ugyan még nem sikerült kísérletileg láthatóvá tenni (szemben a mikrohullámú háttérsugárzás kiemelkedően informatív eredményekre vezető tanulmányozásával), de létezésében abszolút biztosak a forró Univerzum történetének szakértői. Ugyanakkor neutrínók nagy intenzitással keletkeznek például a szupernóva-robbanások során is. Ezek a részecskék csak gyenge kölcsönhatásban vesznek részt, ezért energiájukat nem korlátozza a Greisen–Kuzmin–Zatsepin-határ. A Fodor–Katz–Ringwald-javaslat lényege, hogy a nagy energiájú kozmikus neutrínók a Föld közelében antirészecskéjükkel fuzionálhatnak (összeolvadhatnak) a gyenge kölcsönhatás erőterkvantumába, a Z-bozonba, amelynek óriási energiáját aztán bomlása olyan nagyenergiájú részecskékbe konvertálja, amelyek képesek kozmikus zápor indítására. Ennek a szép gondolati építménynek az elejéről hiányzik a neutrínók „gyorsítási” mechanizmusa, azaz arra a kérdésre a válasz, hogy mekkora lehet a kozmikus neutrínók maximális energiája? Ez jelenleg intenzíven kutatott asztro-részecskefizikai kérdéskör.

A fenti és egy-két hasonló magyarázatot adó elméleti mechanizmus mellett nem zárható ki az a lehetőség sem, hogy az 1994-es japán mérés valamilyen, a berendezés energiaskálájának hitelesítésében előfordult hibát tükröz, és a Greisen–Kuzmin–Zatsepin határ mégis érvényesül. Erre a kételyre csak újabb, nagyobb energiájú záporok észlelésére alkalmas, a jelenleginél megbízhatóbban kalibrált mérések adhatnak választ. Ennek a feladatnak kíván megfelelni a 2005 óta működő Auger Kozmikus Sugárzás Obszervatórium. Argentínában, az Andok vörösbortermő lábainál, Mendoza városának környékére telepítették azt a Párizsénál nagyobb területet beborító detektorhálózatot, amely Cserenkov-detektorainak jelét egyesítve eldönthető lesz a 10^{20} eV-ot meghaladó összenergiájú záporok létezésének gyakorisága. A Cseren-



3. ábra. Plakátszerű ábrázolás az argentinai Pierre Auger Kozmikus Sugárzási Observatórium bemutatására. A Cserenkov-tartály mellett egy magaslat tetején kinagyítva ábrázolja az atmoszférára irányított fotodetektorokat, amelyek észlelik a záporbeli ütközésekkel gerjesztett légköri atomok, molekulák lumineszcens fénykibocsátását. A két észlelés megnövelt biztonsággal rekonstruálja a zápor kifejlődésének téridő-szerkezetét.

kov-detektorokból származó információt kiegészítik a légköri molekulák röntgenfluoreszcens sugárzását 15 km magasságig észlelni képes teleszkópok (3. ábra). Ezekkel a záporok légköri kifejlődését lehet nyomon követni, amivel a Cserenkov-detektorok közötti tartományban leérkező (tehát általuk nem észlelt) részecskék eloszlására kiegészítő információ kapható. A széles nemzetközi együttműködésben felépített és működtetett intézményhez az érdeklődő hazai asztrofizikusok *Mészáros Péterrel*, a Pennsylvania State University magyar–amerikai–argentín professzorával, az ELTE vendégprofesszorával végzett közös kutatómunka révén tudnak kapcsolódni.

4. ábra. A Sudbury Neutrino Observatory (Kanada) 1000 t nehézvízzel feltöltött tartálya, amelyben a Naphól érkező neutrínók bármely fajtája reakciót vált ki, így lehetőség van a teljes neutrínófluxus észlelésére.



Kozmikus neutrínók

A neutrínók létezésére az első közvetlen bizonyítékot *Cowan* és *Reines* adta 1956-ban, amikor a reaktorokban végbemenő béta-bomlási reakciókból feltételezett neutrínóáramot használva a láthatatlan nyalábbal fordított (inverz) béta-bomlást idézték elő. Alig négy év múlva jelent meg az első cikk, amely sorbavette a természet lehetséges neutrínóforrásait. *Marx György* és *Menyhárd Nóra* német nyelven írott cikke a Csillagászati Kutató Intézet közleményei között jelent meg, ennek ellenére komoly figyelmet keltett. A *Science*-ben közzétett rövid változatára mint a neutrínócsillagászat első tudományos publikációjára szokás hivatkozni.

Marx és Menyhárd a következő neutrínóforrásokat jelölték meg:

- A Nap fúziós folyamatai.
- A kozmikus záporokban keletkező részecskék bomlástermékei.
- Szupernóva-robbanásoknak a neutroncsillagállapothoz vezető reakciói.
- A Föld anyaga radioaktív összetevőinek béta-bomlásai.
- A forró Univerzumban zajló gyenge kölcsönhatási folyamatokból visszamaradt kozmikus háttér.

Az elmúlt fél évszázadban a lista első négy helyén álló folyamatokat sikeresen megfigyelték, sőt segítségével alapvető információkat szereztek a neutrínók tulajdonságairól. Elsőként *R. Davis* követte nyomon egy uszodányi mennyiségű szén-tetraklorid klóratomjainak a neutrínósugárzás hatására bekövetkező átalakulását argonná. Első eredményeit 1964-ben tette közzé. Kísérletének a hetvenes évek elejére véglegesített tanulsága az volt, hogy a Napban zajló fúziós folyamatok *Hans Bethe* által javasolt modelljével számított gyakoriságnak harmadrészét észlelte. A sokféle értelmezési próbálkozás közül a *B. Pontecorvo* által már 1957-ben felvetett lehetőség bizonyult a helyes útnak: a különféle neutrínófajták egymásba alakulása miatt a Naphól induló fajta a Földre csökkentett intenzitással érkezik meg. A végső bizonyíték 2003-ban született meg, a kanadai Sudbury bányában 1000 köbméter nehézvíz felhasználásával végzett megfigyelések eredményeként (4. ábra). A deuteron nemcsak az eredeti neutrínófajtaival (az elektron-neutrínóval) lép reakcióba, hanem a nyalábban az átalakulás eredményeképpen megjelenő müon-neutrínókkal is. A két reakció összesített gyakorisága csodálatosan egyezik a Nap-modell alapján várt teljes áram által kiváltott reakciók várt számával.

A szupernóva-robbanás energiájának jelentős részét képviselő neutrínólökést 1987. február 23-án a japánbeli Kamioka hegység mélyére rejtett óriási víztartályt határoló Cserenkov-detektorok (*címkép*) jeleztek először. A Magellán-felhőben történt robbanás közelsége lehetővé tette a váratlan esemény különösebb felkészülés nélküli észlelését. A kísérlet vezetője *M. Koshiba* 2002-ben kapott *R. Davisszel* megosztva Nobel-díjat. Ezt követően a Kamiokande-kísérlet továbbfejlesztett változatával, a Szuperkamiokande-kísérlettel az atmoszférába belépő kozmikus sugárzás által keltett pio-

nok elbomlásából származó neutrínók tulajdonságait vizsgálták. A 2001-ben közzétett megfigyelések szerint a megfigyelt elektron-típusú és müon-típusú neutrínók aránya irányfüggő volt. A függést tökéletesen lehetett értelmezni a két fajta neutrínónak egymásba és egy harmadik fajta (a tau-típusú) neutrínóba történő átalakulásával, amelynek mértéke a keletkezés és az észlelés közötti távolság periodikus függvénye. Ezt a függvényt Pontecorvo és *Gribov* 1969-es elméletének finomításával úgy lehetett meghatározni, hogy a Föld levegőburkának különböző pontjaiból (tehát különböző távolságról) érkező neutrínók átváltozásának mértékét és a Napból érkező neutrínók átalakulását egyszerre tudták segítségével értelmezni.

Az átváltozási valószínűség így meghatározott távolságfüggését teljes mértékben földi forrásokkal is ellenőrizni kívánták. A Kamioka körzetében lévő 13 atomerőmű teljesítményére vonatkozóan a kísérleti csoportnak időben nagy pontosságú információt sikerült kapni. Ebből kiszámítható volt az erőművekben zajló hasadási folyamatokból származó induló elektron-antineutrínó áram. Az egyes erőművek távolságát ismerve a korábbi kísérletekben meghatározott függvényt arra használták, hogy a beérkező nyaláb átváltozás miatti gyengülését megjósolják. A 2005-ben közzétett eredmény gyönyörűen egyezett a várakozással (egy alább részletezendő kis korrekció erejéig, amelyre a kísérletezők előre készültek).

Az átváltozási jelenség (a neutrínóoszilláció) csak akkor lehetséges, ha a három fajta neutrínó közül legalább kettőnek nullától különbözik a tömege. Ez bizonyossá teszi, hogy a részecskefizika Standard Modelljén, amely az elemi részek közötti kölcsönhatásokat mindaddig tökéletesen látszott leírni, túl kell lépni! Eddig ez az egyetlen kísérleti utalás új fizikai törvények szükségességére. (Elméleti utalás sok van, de nem mind ennyire közvetlenül értelmezhető, mondhatnánk, hogy nem ennyire közérthető.)

A negyedik forrás figyelembevételének szükségessége éppen a neutrínóoszillációk tisztán földi kísérletben történő kimutatásakor vált elkerülhetetlenné. Ugyanis a reaktorok mellett van egy elkerülhetetlen, 14. neutrínóforrás, a Kamioka hegység anyagában, valamint a Japán tenger üledékes aljzatában található radioaktív izotópok (^{232}Th , ^{238}U , ^{40}K) bomlásából származó antineutrínók. Ez a mennyiség intenzitásában sokkal kisebb a Nap-neutrínókéénál, de szerencsére a Napból az ő antirészecskéik árama érkezik, amely más reakciókat képes kiváltani, ezért megkülönböztethető. A Szuperkamiokande-kísérlet előkészítői két klasszikus munkára támaszkodtak, amikor megbecsülték ezt a természetes háttérrel. Az egyik *G. Eder* 1966-os cikke, a másik Marx György 1969-ben írott cikke. Az Ederék által tartott konferencia-prezentációk fóliáiból egyértelműen látszik, hogy ismerték Marx és Menyhárd 1960-as *Science*-beli cikkét, sőt megjegyzik, hogy az általuk adott intenzitásbecslés nagyságrendileg jól egyezik a mai számításokkal.

Az említett izotópok bomlásaiból meghatározott energiatarományokban összesen 4 többletneutrínó

észlelését várták, ami pontosan be is következett. Ezzel először sikerült kimutatni a földi kőzetből származó neutrínókat. Ezt az eredményt a *Nature* magazin a 2005. év 25 legfontosabb fizikai eredménye közé sorolta (korábban címlapján hozta a jelenség kimutatásának híretét).

Ahogy 1987. február 23. a neutrínócsillagászat születésnapja, ugyanúgy tekinthető 2005. május 25. a neutrínó-geofizika kezdő dátumának. Bár egyelőre a tudományos álmódosítások közé sorolható, mégis komoly lehetőség a radioaktív elemek földi eloszlásának neutrínósugárzásuk révén történő megállapítása, amelynek a földkéreg kialakulását leíró modellek értékelése szempontjából fontos szerepe lehet. Még fontosabb a Föld hőhőhőhő tartása szempontjából annak megértése, hogy a körülbelül 40 TW-nyi teljesítmény milyen jellegű energiából származik. Nem becsülhető le a Föld ma is változó anyageloszlásában felhalmozott rugalmas energia, de sokaknak az a véleménye, hogy a hőteljesítmény szinte teljes mértékben radioaktív eredetű.

A kozmológiai háttér neutrínógázának kimutatása maradt az egyetlen hátralévő felfedezési feladat. Az említett Fodor–Katz–Ringwald folyamat kimutatására vagy megcáfolására a Hold talajának lumineszcens sugárzását igyekeznek megfigyelni, amelyet az oda becsapódó Z-részecskék okozhatnak. *Zeldovics* és *Gerstein* már a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás felfedezésének másnapján felvetették, hogy elegendően nagy tömeggel rendelkező neutrínók jelentős mértékben részesedhetnek az Univerzum átlagos energiasűrűségéből. Marx és *Szalay* az 1970-es évek elején vizsgálták meg, hogy mekkora tömeget enged meg az a tény, hogy az általunk megfigyelt kozmikus környezet nagyjából 13–14 milliárd éves és még jelenleg is tágul. A kapott érték (kb. 10 eV) a legújabb mérések tükrében túl nagy (a háttérsugárzás 2003 és 2006 közötti újabb megfigyelése a WMAP-misszióban a neutrínók össztömegére 0,3 eV-ot enged meg). Ennek ellenére a magyar kutatók közel negyven évvel ezelőtti becslése fontos mérföldkő volt a neutrínó tömegére vonatkozó elméleti és kísérleti kutatásokban. A legújabb becslések alapján a kozmikus neutrínók által ma hordozott energiasűrűség a teljes energiasűrűségnek körülbelül ezredrésze. Ez kozmológiai jelentőségét illetően túl kicsi, de nem felejthető el, hogy az Univerzum anyagának aktuálisan fényt kibocsátó hányada (a csillagok és a csillagközi gáz anyaga) ugyanebbe a nagyságrendbe esik.

A neutrínók asztrofizikájának legújabb kísérleti eszköze az Antarktiszon épül. A legnagyobb víztartályok térfogatát ezerszer meghaladó méretű Cserenkov-detektort építenek, amelynek anyaga a természetes állapotában meghagyott jég. Az Icecube kísérlet térfogata 1 km³. Ez a berendezés együttműködik majd a bányák, valamint a tengerek-tavak (Bajkál-tó, Földközi-tenger, Csendes-óceán) mélyére rejtett Cserenkov-detektorokkal. Hálózatuk együttes észlelései esetén komoly esély van arra, hogy nemcsak a Nap, de a nem túl távoli szupernóvák természetét is lehet majd neutrínócsillagászati eszközökkel tanulmányozni.

A MOTIVÁCIÓ ÉS KÖRNYEZETÜNK FIZIKÁJA

Zátonyi Sándor
ny. tanár, Sopron

A tanuló a környezetével való folytonos, aktív kölcsönhatásban fejlődik. Az elmúlt évtizedekben azonban jelentős mértékben megváltozott a tanuló környezete. Ez a tény nyilvánvalóan befolyásolja a tanulók iskolán kívüli előismereteit, tapasztalatait, a „környezetükkel való kölcsönhatásukat” is. Mindebből adódóan megváltoztak a *motivációs lehetőségek* is [1].

Tudjuk, hogy a tanuló személyisége tevékenység révén fejlődik. Ezért a fizikatanítás, -tanulás folyamatában biztosítanunk kell a tanulói tevékenységet: a manuális (külső) és a gondolkodási (belső) tevékenységet egyaránt. A tanulói tevékenység (és ezen belül a kísérletezés) nemcsak az ismeretszerzés és képességfejlesztés hatékony eszköze, hanem kiváló *motivációs* alap is. A következőkben e két gondolatkörhöz kapcsolódva szeretnék szólni az általános iskolai fizikaoktatás néhány *motivációs lehetőségéről*.

Környezetünk fizikája

Az általános iskolai fizikaoktatás alapvető problémája, hogy a tananyag tartalma és mennyisége az utóbbi évtizedekben lényegében nem változott. Ugyanakkor a fizika oktatására száma az 1978-as tanterv heti 6 órája helyett (6–8. évfolyam: 2 + 2 + 2 óra) most az iskolák többségében heti 3 óra áll rendelkezésünkre (7–8. évfolyam: 1,5 + 1,5 óra). Megszűnt (vagy megszünnőben van) az 5–6. évfolyamon a környezetismeret tantárgyon belül a fizikai alapismeretek oktatása is. Ez azt jelenti, hogy nagyon visszafogottan, a lényegre koncentráltan dolgozhatjuk fel a tananyagot. Ugyanakkor elodázhatatlan feladat a tananyaghoz kapcsolódó követelményrendszer újragondolása és a tartalom korszerűsítése is. Ezzel párhuzamosan időt kell biztosítanunk a környezetünkben található korszerű, új fizikai alkalmazások megismertetésére is. Fontos, hogy a mindenki által használt eszközök és a körülöttünk levő, mindenki számára hasznos létesítményekben felismerjék és értékeljék a tanulók a fizika eredményeit. Ehhez – más tényezők mellett – szükséges, hogy ezen eszközök megismertetése megfelelő szinten és mértékben szerepeljen a fizika oktatásában is.

A fizika iránti érdeklődés felkeltésének, fokozásának egyik lehetséges módja annak szemléletes bemutatása, tudatosítása, hogy a rádió, a televízió, a magnó-, a videófelvevő és -lejátszó, a CD- és DVD-lejátszó, a számítógép, a nyomtató és sok más eszköz nem jöhetett volna létre a fizika tudományos eredményeinek alkalmazása nélkül. Az általános iskolában nyilvánvalóan csak azokra az alkotásokra térhetünk ki,

amelyek a tananyaghoz valami módon kapcsolódnak, és érthetőek a tanulók számára is. Célszerű olyan jellemzőket, érdekes adatokat is bemutatnunk a tanulóknak ezekkel kapcsolatosan, amelyek érdekesek, meglepőek számukra.

Mindezt nem az ellenőrzés és számonkérés igényével ajánlatos megtennünk, hanem a *motiváció* fokozása érdekében. Ha érdekesnek tartják a fizikát a tanulók, az ilyen érdekességek ismertetésére fordított idő sokszorosan megtérül a fizika iránti fokozottabb érdeklődésben, a hatékonyabb ismeretsajátításban. A tankönyvek egy része egyébként számos, ilyen célzattal megfogalmazott olvasmányt, tájékoztató anyagot közöl, de sok olyan ismeretterjesztő könyv is van forgalomban, amely jól felhasználható ilyen céllal.

Néhány példa a *motivációra*, a közvetlen vagy távolabbi környezetünkben található eszközökről, létesítményekről:

A tanulók által ismert és használt eszköz a *CD- és DVD-lemezjátszó*. Elgondolkodtató lehet számukra annak megismerése, hogy a hangfelvételnél a mikrofonból kilépő hangjelből másodpercenként több mint negyvenezereszer vesznek mintát, s ezt alakítják át olyan jellé, amely rögzíthető a lemezen. A 12 cm átmérőjű DVD-lemez spirális sávja vékonyabb a házszálnál, és kiegyenesítve körülbelül 12 km hosszú lenne. A lemezjátszó motorja változó fordulatszámmal forgatja a lemezt. A hangsáv a lemez közepénél kezdődik. Itt a fordulatszám 500/perc. Innen kifelé halad az érzékelő, közben a lemez fordulatszáma csökken. A lemez szélénél 200/perc a fordulatszám.

1. ábra. A tintasugaras nyomtató tintapatronja





2. ábra. Fényképezőgép infravörös távolságmérővel

Ahol a leolvasó fej elhalad a lemez közelében, abban a vonalban állandó a sebesség. Érdekes, ha a zene-szám harmadik tételével indítjuk a lejátszást, akkor a lemez éppen annak a résznek megfelelő fordulatszámmal indul [2, 3].

A párologással kapcsolatosan érdekességként ismertetjük a tanulókkal a számítógéphez kapcsolt *tintasugaras nyomtató* működését. A nyomtatóban parányi kis fűtőlappkák vannak, amelyek felmelegítik a zárt térben levő folyékony festéket. A folyadékban buborék képződik, s a festék kilövedik a hajszálvékony nyílásokon át a papírra a számítógépről érkező „parancsnak” megfelelően (1. ábra). Mindezt olyan gyorsan végzi a gép, hogy alig lehet követni.

A mai fényképezőgépek többsége automatikusan képes beállítani a gép, a lencse és a film (érzékelő lemez) közötti távolságot, a lencse és a tárgy közötti távolságnak megfelelően. E fényképezőgépek egy része infravörös sugarak segítségével végzi a beállítást. Amikor kissé lenyomjuk az exponáló gombot, a gép infravörös sugarakat bocsát ki magából (2. ábra). E sugarak a tárgyról visszaverődnek, s ezt érzékeli a fényképezőgép. Ha például egy tárgy 1,2 méter távolságra van a fényképezőgép lencsétől, akkor az infravörös sugarak 0,000 000 008 másodperc alatt teszik meg oda-vissza a 2,4 m hosszú utat. A gép ezt az időtartamot érzékeli, és ennek megfelelően automatikusan állítja be a lencse és a film (érzékelő lemez) közötti távolságot. Elgondolkodtató, milyen magas szintű fizikai tudásra, technikai pontosságra van szükség az ilyen gépek megtervezéséhez és megalkotásához!

Napjainkban egyre több településen látható az út mellett olyan sebességmérő készülék, amely a közeledő autó sebességét méri, figyelmeztetve a vezetőt, hogy megfelelő tempóban halad-e az úton. A készülék érzékeli a jármű közeledtét, majd a távolság csökkenésének a mértékéből és az időből automatikusan meghatározza a sebességet. A pillanatnyi sebességet a jelzőtábla mutatja (3. ábra).

A súrlódási erővel kapcsolatos ismeretek feldolgozásakor célszerű néhány szót szólnunk az autókba beépített *blokkolásgátlóról*, az ABS-ről (Anti-Block-System). Ez a rendszer megakadályozza, hogy az



3. ábra. Sebességjelző tábla Nagycenken, az út mellett

autó hirtelen fékezésekor a kerekek „leblokkoljanak”, és ezáltal az autó megcsúszson. A kerekeknél elhelyezett érzékelők automatikusan jelzik fékezés közben a kerekek gördülését, illetve csúszását. Az ABS nem várja meg a kerekek hirtelen blokkolását, hanem automatikusan (a vezetőtől függetlenül) a csúszás előtt álló keréknél csökkenti a fékre ható erőt. Ezáltal az autó nem csúszik meg és kormányozható marad [4].

Ismert a tanulók számára, hogy a tv-közvetítések egy része műholdak segítségével jut el hozzánk. A Föld felszínén kiépített adóállomások parabolaantennái a műholdakra sugározzák a műsorokat, a műholdakon levő adók pedig a Földre továbbítják ezeket az adásokat. Közép-Európában Ausztria területén, Bruck an der Mur várostól északra, légvonalban körülbelül 12 km-re, *Aflenz Kurort* közelében, *Graßnitz* falu mellett építettek ki egy ilyen földi állomást. A falu feletti dombon két nagy és számos kisebb parabolaantenna látható. Ezek közül kettő 30 m átmérőjű, a többinek 20 m, 18 m és 10 m az átmérője (4. ábra). Az antennák – többek között – az EUTELSAT és az INTELSAT műholdakkal napi 24 órán át tartják a kapcsolatot. E műholdak a Föld felszínétől számítva, 36 000 km magasságban keringenek az Egyenlítő felett, a Föld forgásával megegyező irányban. Akkora a sebességük, hogy a Földről nézve az égboltnak meg-

4. ábra. Az egyik 30 m átmérőjű parabolaantenna





5. ábra. Napkollektor az egyik csepregi családi házon



6. ábra. A napkollektorok egy részlete a zatonai üdülőtelep mellett

közelítőleg mindig ugyanazon a helyén látszanak. A földi antennák közelében belépődíj nélkül látogatható, 60 személyes bemutató terem van. A látogatók által indítható videóvetítés tájékoztatást nyújt a műholdakról és a parabolaantennákról.

A „hagyományos” energiaforrások csökkenő mennyiségben állnak rendelkezésünkre, ugyanakkor felhasználásuk során szennyezik környezetünket. Ezért ezek mellett egyre sürgetőbbé válik a megújuló energiaforrások felhasználása. Az egyik ilyen lehetőség a napenergia hasznosítása.

A *napkollektorokkal* a napsugarak hőhatását lehet hasznosítani. A napsugarak irányára megközelítőleg merőlegesen elhelyezett csőrendszerben keringő folyadék a Nap sugaraitól felmelegszik (5. ábra). A csőrendszerben keringő fagyálló folyadék a „hőcserélőben” melegíti fel az épületben felhasználásra kerülő vizet, amelyet részben a háztartás melegvízellátására, részben a lakás fűtésére lehet felhasználni. Amikor kisebb a napsugárzás, akkor olajtüzeléssel vagy fahulladék eltüzelésével lehet pótolni az energiát [5]. Horvátországban, a tengerparton, a *Zadar* város melletti *Zaton* településen napkollektorral biztosítják az üdülőfalu és a kemping melegvízellátását (6. ábra). Az állványokra rögzített napkollektor összesen 48 sorból áll és minden sorban 16 darab napkollektortábla van.

7. ábra. A welsi vásárváros irodaépülete



A napkollektorban felmelegített folyadékot egy külön épületben elhelyezett hőcserélőbe vezetik. Innen továbbítják a felmelegített vizet az üdülőfaluba és kempingbe.

A napenergiát *napelemek* segítségével is hasznosíthatjuk. A napelemek közvetlenül elektromos energiává alakítják át a Nap energiáját. Szélesebb körű elterjedésük azért lassú, mert viszonylag kicsi a hatásfokuk és drága az előállításuk. A kutatások majd e téren is meghozzák a pozitív eredményeket.

Az egyik osztrák kisvárosban, *Welsben* minden év márciusában, a hónap első hetében nemzetközi kiállítást szerveznek az energiagazdálkodásról. Itt a napelemek sokoldalú felhasználásáról is széles körű áttekintést nyújtanak a kiállítók. Stílusosan, a vásárváros irodájának homlokzatát – a bejárat és az ablakok kivételével – is napelemek borítják (7. ábra). A sokféle gyakorlati alkalmazás mellett a kiállítók nagyszámú, napelemmel működő gyerekjátékot is bemutatnak. Ezek a helyszínen meg is vásárolhatók. Így a gyerekek már korán közvetlen tapasztalat útján is megismerkedhetnek a napelemekkel.

Egy másik osztrák kisváros, *Altausee* közelében épített naperőmű elektromos energiát szolgáltat a sífelvonókhoz. A naperőművet a *Loser* hegycsúcs (1838 m) alatt építették fel, 1500 m magasságban (8. ábra). Az

8. ábra. Naperőmű az ausztriai Loser hegyen





9. ábra. Napelemek a Vas megyei Ivánc község templomának kivilágításához

építkezést 1988-ban fejezték be, azóta termel elektromos energiát az erőmű. A napelemtáblák felülete 263 m^2 , az erőmű csúcsteljesítménye $33\,000 \text{ W}$, évi energiatermelése $37\,000 \text{ kWh}$.

A napelemek érdekes alkalmazása található nálunk, Vas megyében, *Ivánc*-on. A község templomának díszkivilágításához napelemek biztosítják az elektromos energiát. A napelemeket a szomszédos posta épületén helyezték el a cseréptető két oldalán és a bejárat feletti függőleges falon. Így gyakorlatilag egész nap érik napsugarak valamelyik napelemtáblát (9. ábra). A napközben felvett energiát akkumulátor tárolja, és azt az esti órákban a reflektorok működtetéséhez használják fel [6].

A *szél energiájának* a hasznosítására elsősorban olyan helyeken nyílik lehetőség, ahol gyakori az erős szél [7]. Nálunk a Dunántúl, ezen belül is főleg az északnyugati rész az ilyen terület. Magyarországon az első szélerőmű a *Várpalotához* tartozó *Inota* mellett épült, 2001. január 1-jén helyezték üzembe. A torony 30 m magas, a szélkerék átmérője $29,7 \text{ m}$, tömege 4350 kg . A szélturbina 3 m/s és 25 m/s szélsősebesség között működik. A generátor teljesítménye 250 kW . A következő szélerőművek Dunaújvárostól északra, Kulcs község közelében, Mosonmagyaróvár és Mo-

11. ábra. Digitális háztartási mérleg



10. ábra. Nyolc szélkerék Burgenlandban, Gattendorf közelében

sonszolnok közelében épültek. Több száz szélerőmű termel elektromos energiát osztrák területen, Burgenlandban, a határ közelében, többek között Zurndorf, Parndorf és Gattendorf térségében (10. ábra).

Elgondolkodtató, hogy a külföldi tankönyvek egy részében már az 1970-es évek közepén megjelentek a megújuló energiaforrásokkal kapcsolatos fizikai ismeretek. Van olyan német tankönyv, amelyik már 1975-ben hírt ad a napkollektorok alkalmazásáról [8]. Egy másik tankönyv 1979-es kiadásában ismerteti a napelemeket, és fényképeket is közöl azok alkalmazásáról a műholdon, a számológépen, a tv-adókon [9]. Egy további, 1984-ben megjelent tankönyv pedig a szélerőművek működési elvét ismerteti, röviddel az első ilyen létesítmények megjelenése után [10].

Tanulói és tanári kísérletek

Az elmúlt években egyre elterjedtebbeké váltak a számkijelzéses (digitális) készülékek, műszerek. Célszerű ezeket az eszközöket az iskolai oktatásba is bevonni, annál is inkább, mert az iskolát elhagyva, leendő munkahelyükön ilyen készülékeket használnak majd a tanulók közül nagyon sokan. Ajánlatos ezért azokat a képességeket is fejleszteni, amelyek ezen készülékek, műszerek használatával kapcsolatosan alakíthatók ki. A digitális készülékek, műszerek ára az elmúlt évek során fokozatosan csökkent, így már többségük olcsóbb, mint a hagyományosak [11]. Természetesen, didaktikai szempontból továbbra is szükségessé válhat egy-egy hagyományos eszköz bemutatása is (például a karos mérleg szemléltetése az egyszerű gépek tanításakor).

Napjainkban *digitális mérleget* használnak a boltokban, a postán, a piacon és sok más területen is. Az általános iskolai fizikaoktatásban jól használható az olyan digitális háztartási mérleg, amelynek 2 kg a mérés határa, és 1 g a mérési pontossága (11. ábra). Ez a mérési pontosság elegendő, ha arra gondolunk, hogy a sűrűség meghatározásakor a térfogatot is csak egész cm^3 -ekben tudjuk mérni. A digitális mérlegek nagy előnye, hogy a mérési idő drasztikusan lerövidül. Egy



12. ábra. Mérés a digitális hőmérővel

test tömegének megmérése a hagyományos tanulókísérleti karos mérlegen 3–5 perc, digitális mérlegen 8–10 másodperc.

A hőmérséklet mérésére is egyre szélesebb körben alkalmaznak *digitális hőmérőt*. Az iskolai gyakorlatban jól használható az autókhoz árusított digitális hőmérő. E készüléken két kijelző van. Az egyik (az eredeti rendeltetése szerint) a készülék környezetében levő levegő hőmérsékletét méri, a másik a karoszérián kívüli levegő hőmérsékletét jelzi a készülékhez kapcsolódó, körülbelül 2 m hosszú vezeték végén levő érzékelővel. Az ilyen hőmérő iskolai használatának nagy előnye, hogy pontossága egytized foknyi, másrészt egyidejűleg két helyen is mérhetünk vele hőmérsékletet. Ha a vezeték végén levő érzékelőt például a sóval megszórt jég és víz keverékébe tesszük, akkor az az ott kialakuló hőmérsékletet, a másik érzékelő pedig a levegő hőmérsékletét mutatja. Az egyik ilyen mérésünk során 37 °C hőmérséklet-különbség adódott (12. ábra). Célszerű bemutat-

13. ábra. Ellenállásmérés digitális műszerrel



nunk a digitális lázmérőt is, amely sokkal könnyebb leolvasást tesz lehetővé, mint a hagyományos higanys lázmérő.

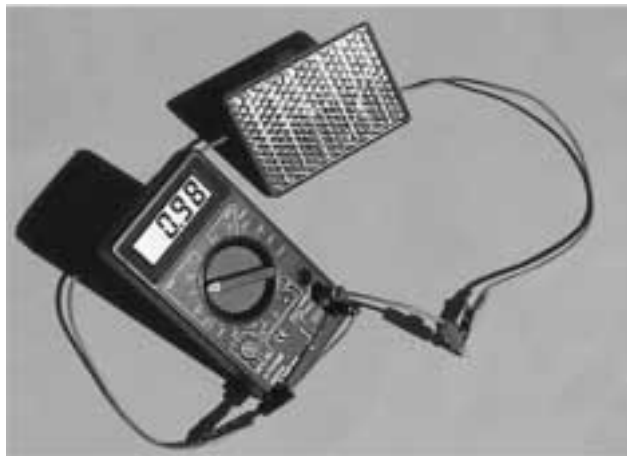
A rádió- és tv-szerelők, a villanszerelők többsége ma már *digitális mérőműszert* használ. E készülékek nagy előnye, hogy nincs szükség a különböző méréshatárok és a skála összevetése után átszámításokat végezni, hanem közvetlen leolvasással megállapítható a mért feszültség, illetve áramerősség. Ezen kívül e műszerek alkalmasak az ellenállás közvetlen mérésére is. A műszert e méréshez külön áramforrás nélkül, közvetlenül a fogyasztóhoz kapcsoljuk, és azonnal leolvashatjuk az ellenállást.

Az ellenállás fogalmának kialakításához szükséges, hogy az ellenállást a feszültség és az áramerősség megmérése alapján, a kapott mennyiségekből számítás útján határozzuk meg. Ez mintegy 10–12 manuális és logikai művelet elvégzését teszi szükségessé. Ezért az ismeretek alkalmazása során, ha újabb fogyasztók ellenállásának meghatározása szükséges, célszerű digitális műszert alkalmaznunk.

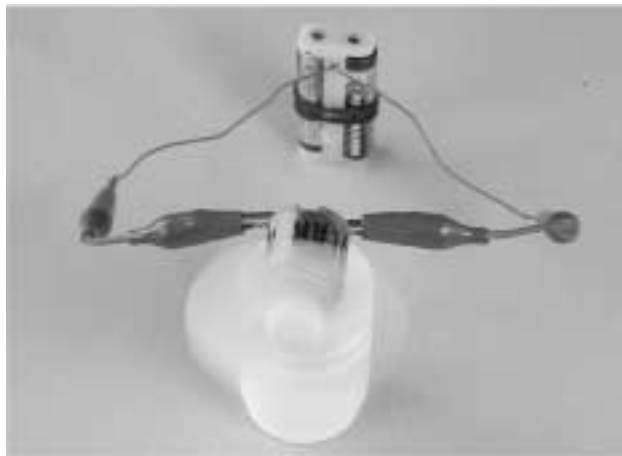
E műszerrel nagyon egyszerűvé válik a párhuzamosan kapcsolt fogyasztók ellenállásának meghatározása. Megmérjük az egyik, majd a másik fogyasztó ellenállását, majd a két ellenállást összekapcsoljuk, és így ismételjük meg a mérést (13. ábra). Ez a mérések számát és az időt tekintve is igen nagy megtakarítást jelent. Ugyanakkor a tanulóknak nem jelent problémát a végzett műveletek áttekintése.

Napjainkban a 8–10 éves gyerekek számos elektromossággal működő játékkal játszanak, közülük sokan számos elektromos eszközt (mobiltelefon, zsebrádió, magnó stb.) használnak. Ugyanakkor az általános iskolai oktatás keretében csak a 8. évfolyamon tananyag az elektromosságtan. Furcsa e tanulóknak a 8. osztályban azt tanítani és kísérlettel „igazolni”, hogy a vas, a réz, az alumínium vezeti az elektromos áramot. Pszichológiai szempontból ez nagyon elkésett, és nincs semmiféle motiváló hatása, sőt. Egy korábbi vizsgálatunk azt mutatta, hogy az 5. évfolyamos tanulóknak a többsége tudja, hogy az alumínium, a vas, a réz és a többi fém vezeti az elektromos áramot.

A 70-es években az NSzK-ban és Csehszlovákiában is kísérleti tanítás folyt annak kimunkálása érdekében, hogy miként lehetne egyszerű, hétköznapi eszközökkel az elektromossággal kapcsolatos, praktikus alapismereteket a 3. osztályban (8 éves korban) tanítani. A 80-as évek elején mi magunk is szerveztünk az 5. osztályban kísérleti tanítást az elektromosságtani alapismeretek feldolgozására. A kísérleti tanítás keretében 63 feladatból álló részletes programot dolgoztunk ki. Az öt 5. osztályos kísérleti csoportban elért eredményeket öt 8. osztályos kontrollcsoport eredményével hasonlítottuk össze. Az utófelmérés azt mutatta, hogy az adott témakörben az 5. osztályos tanulók 64,1%-os, a 8. osztályos tanulók 59,6%-os átlageredményt értek el. Bár a különbség 4,5%-kal jobb volt az 5. osztályos tanulók javára, a különbség nem szignifikáns. A kísérleti tanítás eredményei azt igazolták, hogy a 10 éves tanulók is rendelkeznek annyi elektromosságtani elő-



14. ábra. A napelem feszültségének mérése



15. ábra. A motormodell forgásirányának megfigyelése

ismerettel, amelyre biztonsággal lehet építeni az adott ismeretkör feldolgozása során. Ugyanakkor gondolkodásuk is eléggé fejlett az új ismeretek befogadásához. Pozitívan befolyásolta az 5. osztályos tanulók eredményeit az a tény, hogy akkor került sor az elektromosságtani ismeretek feldolgozására, amikor érdeklődésük éppen e kérdések felé fordult [12].

Az elektromosságtan jelenlegi, késői oktatásából egy olyan probléma is adódik, hogy a tanulók túl későn kapnak tájékoztatást az elektromossággal kapcsolatos baleset-megelőzési szabályokról. Mindezt célszerű figyelembe vennünk akkor, ha majd lehetővé és esedékessé válik a tantervek újragondolása, a tartalom korszerűsítése. Addig is ajánlatos a tanulók előismereteit a kapcsolódó tantervi anyag feldolgozásakor minél jobban megismernünk és felhasználnunk.

Néhány javaslat újszerű, általános iskolai, elektromosságtani kísérletre

Ma már nálunk is van olyan tanszer-értékesítő cég, amelynél 700–800 Ft-ért kaphatók kísérletezésre alkalmas napelemek, 200–300 Ft-ért pedig kis motormodellek.

A 95×65 mm nagyságú *napelemmel* számos érdekes kísérletet tudunk bemutatni. Megmérhetjük például feszültségét (14. ábra), vagy izzólámpát, kis motort kapcsolhatunk hozzá. Közben változtathatjuk a napelem megvilágítását, és megfigyelhetjük, miként változik az elem feszültsége, vagy miként változik az izzó fényereje, illetve a motor fordulatszám.

Példaértékű, hogy a technika tantárgyból szervezett általános iskolai országos versenyek döntőjén 2002 óta évről-évre olyan feladatot is kaptak a versenyzők, amelyben napelemmel működő modellt kellett építeniük [13, 14].

Nagyon sokféle mechanikai és elektromosságtani kísérlethez használhatjuk a kis *motormodellt*. Az elektromos áram mágneses hatásának megismerése után például a következő kísérletet mutathatjuk be. A motormodell tengelyére egy kis ventillátort rögzítünk. Két, sorba kapcsolt, 1,5 voltos elemhez kapcsoljuk a

motormodellt. Megfigyeljük, hogy melyik irányban forog a forgórész (15. ábra). Ezután felcseréljük az áramforrás pólusait, és most is megfigyeljük a forgásirányt. Azt látjuk, hogy megváltozott a forgásirány. Kérdés: mire következtethetünk a forgásirány megváltozásából? A feladat annak megállapítása, hogy a motor álló- és forgórésze is elektromágnes, vagy csak az egyik elektromágnes és a másik állandó mágnes. A megoldáshoz természetesen hozzátartozik a válasz indoklása is.

A köznapi gyakorlatban nagyon sok olyan eszközt használunk, amelyben *félvezetők* vannak. Számos, érdekes kísérletet lehet ezek alkalmazásával bemutatni. Tapasztalataink szerint a tanulók számára érdekes, hogy az áramkörbe a dióddal sorosan kapcsolt izzólámpa – a feltételektől függően – hol világít, hol nem. Ugyancsak érdekesek a tanulók számára a *világító diódákkal* (LED-ekkel) végzett kísérletek is (16. ábra). A háztartási eszközökön, számítógépeken és sok más készüléken láthatók olyan LED-ek, amelyek az eszközök működésének egyes fázisairól adnak tájékoztatást. Célszerű arra is felhívni a tanulók figyelmét, hogy az újonnan gyártott autókban is egyre nagyobb arányban ilyen LED-ek vannak a helyzetjelző, fék- és irányjelző lámpákban a „hagyományos” izzólámpák helyett.

16. ábra. Kísérlet LED-del





17. ábra. A kiömlő víz hatására forgásba jön a műanyag palack

Az új ismeretek elsajátítása után a kísérletek elsődleges célja az ismeretek megerősítése és a kapcsolódó képességek fejlesztése lehet. Az ilyen kísérletek egy része otthon is elvégezhető a tanulók környezetében található eszközökkel.

Néhány javaslat az otthoni kísérletezésre

A műanyag palack kis átalakításával *Segner-kereket* készíthetünk. A palack alján levő öt kis domború részre egy-egy lyukat fúrunk, mindegyik rész azonos oldalára. Lyukat fúrunk a palack nyílásának két, ellentétes oldalára is. Ezekbe vékony fonalat fűzünk. A palackot egy nagy edény vagy a mosdókagyló fölé teleöntjük vízzel, és a fonalnál fogva a palackot megemeljük. A palack forgásba jön (17. ábra).

A másfél literes műanyag palackkal jól érzékeltethetjük azt, hogy a szabadon eső testnek *nincs súlya*. A palack oldalára, az aljától számítva körülbelül 5 cm-nyire egy 1 mm átmérőjű lyukat fúrunk. A palackot füves területre visszük. Befogjuk a palack oldalán levő nyílást, és teleöntjük a palackot vízzel. Ha a nyílást elengedjük, a víz vékony sugárban folyik a földre. Ezután elengedjük a palackot. Megfigyelhetjük, hogy esés közben nem folyik ki a palackból a víz

20. ábra. Fazék a fonalon függő tapadókorongon



18. ábra. A kézben tartott palackból víz ömlik ki a földre



19. ábra. Az elengedett palackból a súlytalanság miatt nem folyik ki a víz

(18., 19. ábra). E tapasztalatot azzal magyarázhatjuk, hogy esés közben nincs súlya a víznek, ebből adódóan nem hat nyomás a palack oldalfalára, s így nem folyik ki a víz a palackból.

A *légnnyomás* tanításához kapcsolódóan javasoljuk a következő kísérlet elvégzését. Az akváriumok belső falára tapadókoronggal rögzítik a vízhőmérőt. Fonalat fűzünk egy ilyen tapadókorongba, majd megnevelítjük és a fémfazék aljához nyomjuk. A levegő kiszorul a tapadókorong és a fazék közül. A fonalnál fogva megemeljük a fazekat. A fazék nem esik le a tapadókorongról (20. ábra). A kísérletünkhöz használt tapadókorong átmérője 3 cm, a fazék tömege 1,5 kg volt [15].

Ugyancsak a *légnnyomással* kapcsolatos ismeretek feldolgozásához kapcsolódva hasznosíthatjuk azt a légszivattyút, amelyet nagyobb áruházakban árusítanak. A felbontott boros palackban hamar megromlik a bor. Ennek megelőzésére gyártanak olyan légszivattyút, amelyekkel a palack bor feletti részéből ki lehet szivattyúzni a levegőt. Egy gumírozott szelepet kell az üveg nyílására helyezni, s ahhoz minden külön csatlakoztatás nélkül csak hozzá kell szorítani a szivattyút. Ezt a készüléket sokféle célra használhatjuk fizikaórán. Segítségével a levegő nagy részét kiszorítjuk.



21. ábra. A levegő kiszivattyúzása a műanyag palackból

vattyúzhatjuk a műanyag palackból. Ennek következtében a palack a külső légnyomás hatására összehúsgorodik (21. ábra).

A légszivattyút felhasználhatjuk a levegő tömegének érzékeltesére. Megmérjük egy 2 literes palack tömegét a szivattyú szelepeivel együtt. Ezután, amennyire csak lehet, kiszivattyúzzuk a levegőt a palackból. Ismét megmérjük a palack tömegét. Körülbelül 2 grammal kisebb az így mért tömeg, ami az eltávolított levegő tömegével egyenlő.

A tömeg mérésével kapcsolatosan érdekes lehet az a kérdés, hogy 300 g száraz virágföld, illetve 300 g moha mennyi vizet képes „megtartani”. Lehetséges-e, hogy saját tömegüknél több vizet tároljanak magukban ezek az anyagok?

A mérés elvégzéséhez egy üres műanyag palackot használhatunk. A palack felső részét levágjuk. A méréshez tölcsernek használjuk ezt a részt. A lecsurgó víz részére pedig egy műanyag edényt használhatunk felfogó edényként. Szűrőpapírral vagy háztartási papírtörővel béleljük ki a tölcserét. Ebbe tesszük a 300 g földet. A tölcserét a műanyag edényre helyezzük, és mérleggel megmérjük az együttes tömeget. Ezután vizet öntünk a tölcserben levő földre, és megvárjuk, míg a felesleges víz lecsorog. Megismételjük a tömegmérést. A különbségből és a föld eredeti tömegéből

23. ábra. „Levegő” mágnes a pohárban



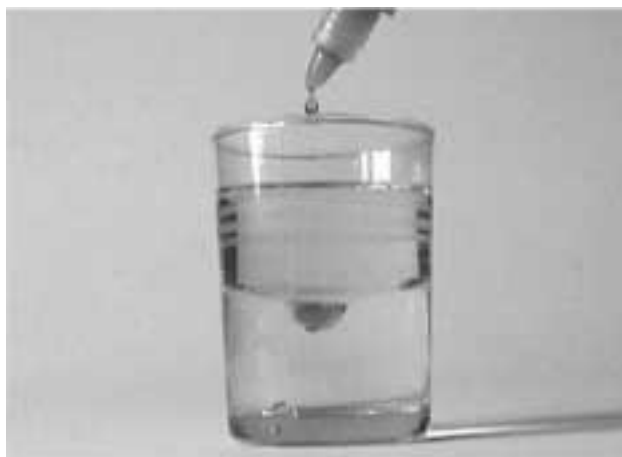
22. ábra. A moha vízmegtartó képességének vizsgálata

kiszámítjuk, hogy a föld eredeti tömegéhez viszonyítva hány százalék volt a megtartott víz tömege. Ugyanezt megismételjük a mohával is (22. ábra). Az egyik ilyen mérésünk alkalmával azt kaptuk, hogy a virágföld vízmegtartó képessége 81%, a moha vízmegtartó képessége pedig 135%. A moha tehát a saját tömegénél nagyobb tömegű vizet is képes megtartani.

A mágneses kölcsönhatás érzékelteséhez jól használhatjuk azt a 4 cm átmérőjű „táblamágnes”, amely a papírboltokban kapható. Az egyik ilyen mágneszt a pohár aljára tesszük, a másikat pedig gyurmaragasztóval a ceruza végére rögzítjük. A ceruzánál fogva ezt a mágneszt is a pohárba helyezzük. A két mágnes akkora erővel taszítja egymást, hogy a ceruzához rögzített mágnes a levegőben „lebeg” (23. ábra) [15].

Az úszás jelenségének tanításakor mutathatjuk be a következő, meglepő kísérletet. Vizet és étolajat öntünk egy üveg pohárba. Az étolaj a víz fölött helyezkedik el. A pohárba málnaszörpöt csepegtetünk a folyadékfelszín ugyanazon helyére. A málnaszörp-cseppek közvetlenül a víz és az étolaj határfelülete alatt gyűlnek össze, nem merülnek le a folyadék aljára (24. ábra). Úgy tűnik, mintha a málnaszörp sűrűsége nagyobb lenne az étolaj sűrűségénél, és kisebb a víz sűrűségénél. A 10–12. csepp után azonban a málnaszörpcseppek lemerülnek az edény aljára. Sűrűségük

24. ábra. Málnaszörpcseppek az étolaj és a víz határfelületénél





25. ábra. Foucault-inga Sankt-Ruprecht faluban

tehát nagyobb mindkét folyadék sűrűségénél. A két folyadék határfelületénél tulajdonképpen a felületi feszültség miatt kialakult hártya tartotta fenn időlegesen a málnaszörpcseppeket.



Befejezésül szeretnék egy érdekes, szép példát említeni a fizika népszerűsítésére. Ausztriában, Graztól északkeletre, légvonalban 20 km-nyire, a Mura folyó mellett fekszik *Sankt-Ruprecht* település. E néhány száz lélekszámú kis falu lakossága elhatározta, hogy a

főterre egy Foucault-ingát állíttat fel. Olyan alkotást, amely nincs is közvetlen kapcsolatban a falu életével, de nap mint nap emlékeztet egy nagyszerű tudományos felismerésre. Az ingát szponzorok segítségével állíttatták fel (25. ábra). A tervezést a grazi egyetem szakemberei végezték. Az inga lengési síkjában kis jelzőlámpák mutatják a Föld forgásából adódó elfordulást. Szép lenne, ha a jövőben minél több, hasonló példáról adhatnánk hírt...

Irodalom

1. Nagy J., *XXI. század és nevelés*. Osiris, Budapest, (2000) 129
2. Macaulay, D., Ardley, N., *Hogy is működik?* Park, Budapest, (1991) 242–243
3. Horváth A. (szerk.), *Írjunk CD-t, DVD-t!* Computer Panoráma, Budapest (é.n.) 6–13
4. Zátanyi S., *Fizika 7*. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest (2002) 68, 145, 170, 181
5. Sudár E., Bio-solar fűtőművek. *Fűtéstechnika, Megújuló energiaforrások* (2001) 59.
6. Zátanyi S., *Fizika 8*. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest (2003) 22, 131
7. Tóth L., Horváth G., Tóth G., A szélenergia hasznosítása. *Fűtéstechnika, Megújuló energiaforrások* (2001) 73
8. *Natur und Technik. Physik und Chemie (5–6. Schuljahr.)* Cornelsen-Velhangen & Klasing, Berlin (1975) 47; *Natur und Technik I. kötet. (7–10. Schuljahr.)* Cornelsen-Velhangen & Klasing, Berlin (1976) 102
9. *Natur und Technik II. kötet. (7–10. Schuljahr.)* Cornelsen-Velhangen & Klasing, Berlin, 2. kiadás (1979) 92–93
10. *Physik*. Ernst Klett Verlag, Stuttgart (1984) 62
11. www.fizkapu.hu. Digitális eszközök alkalmazása az iskolában.
12. Zátanyi S., *Képességfejlesztő fizikatanítás*. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest (2001) 17–26
13. Kundermann R., Vesztróczy L., Napelemes ventilátormodell építése. *A Technika Tanítása* (2002) 4; Napelemes festékszóró elszívómodell építése. *A Technika Tanítása* (2003) 4
14. Vesztróczy L., Napkollektormodell építése. *A Technika Tanítása* (2004) 4; Napelemes malom modellje. *A Technika Tanítása* (2005) 4
15. Zátanyi S., *Fizikai kísérletek környezetünk tárgyaival*. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest (2001) 9, 12, 21, 31, 33, 44

CSODÁK PEDIG VANNAK – ÉS TERJEDNEK

ELFT klubdelután a hazai tudásházak (Science Centerek) jelenéről és jövőjéről

Az Eötvös Társulat 2007. április 25-re szervezett kibővített elnökségi ülésének témája a hazai tudományos játszóházak, múzeumok, Science Centerek helyzetének áttekintése volt (talán a legjobb magyar elnevezés, *Gyulai József* professzor javaslatára, a „tudásház”). Több okból is időszerű volt a tudomány népszerűsítését célzó hazai intézmények működésének megismerése, tapasztalatainak átadása, a jövő tervei megismerése. Egyrészt az egyre gyarapodó számú, már működő tudásházak létrejöttében az Eötvös Loránd Fizikai Társulat meghatározó szerepet játszott (pl. a Csodák Palotájánál, ahol alapító tag a Kuratóriumban, vagy Szegeden, ahol a megyei csoport vállalta a Csodatorony muzeális kísérleti gyűjteményének elvi és gyakorlati megvalósítását). Az aktualitás másik indoka az, hogy a már működő létesítmények mellett

előkészületben vannak Szombathelyen, Pécsen, Miskolcon hasonló, a természettudományos értékeket bemutatni szándékozó, a tudományos ismeretterjesztést szolgáló intézmények, amelyek kialakításához a Társulat szintén kész segítséget nyújtani.

A beszélgetés résztvevői között (kb. 30 fő), az elnökség tagjain kívül, a megyei csoportok, a szakcsoportok képviselőit, tanár kollégákat fedezhettünk fel, de képviseltette magát például az MTA is *Fábrí György* személyében. Bevezetőként *Papp Katalin*, az ELFT alelnöke áttekintést adott a hasonló profilú külföldi, reneszánszokat élő tudásházakról, szerepükről a természettudományos nevelésben. A neveléstudományi, tantárgy-pedagógiai kutatások legújabb nemzetközi irányzatai: az iskolán kívüli természettudomány (outdoors science), az iskola utáni természettu-

domány (afterschool science), a társadalomhoz igazodó természettudomány (science and technology society), az élethosszig tartó tanulás (lifelong learning) valamilyen nyien támaszkodnak a Science Centerek által felkínált speciális tudásátadásra. Egyre több nemzetközi kutatási projekt tűzi ki célul a tanulói érdeklődés növelése érdekében a tudásházak esetében kézenfekvő tanulói aktivitásra épülő speciális stratégiák átültetését a hagyományos iskolai tanításba.

Az érdeklődők „első kézből” kaptak információt a már működő hazai létesítmények képviselőitől, *Egyed Lászlótól* (Csodák Palotája), *Nagy Mihálytól* (Debrecen, Varázskuckó), *Härtlein Károlytól* (Vida Józsefet helyettesítve, Eger, Varázstorony) és Papp Katalintól (Szeged, Csodatorony).

A bemutatásokból kiderült, hogy sokszínű a kép, a tudásházak különböznek egymástól méretben (négyzetméter és anyagi javak), az üzemeltetésben, a tulajdonosban, a látogatók fogadásában, de sok a közös öröm (pl. népszerűség), a feladat és a gond (pl. a fenntartás és fejlesztés anyagi hátterének biztosítása). Egyed Lászlótól megtudtuk, hogy a nemrég 10. születésnapját ünneplő Csodák Palotája aktív tagja a Science Centrumok és múzeumok nemzetközi hálózatának (ECSITE), amely – ezzel együttjáró – nemzetközi projektekben való rendszeres részvételt igényel. Ezek közül a CONNECT-program EU-támogatással azt tűzte ki célul, hogy a Science Centrumokban alkalmazott módszereket, stratégiákat (kísérletezés, aktív szemléltetés, interaktív manuális tapasztalás stb.) integrálja a formális és informális tanulás keretei közé. A Csodák Palotájának a matematikaoktatás területén van meghatározó szerepe ebben a nemzetközi együttműködésben (*Fizikai Szemle* 2007/4).

A 2001-ben alapított debreceni Varázskuckó, ahogy Nagy Mihály tanár úr fogalmazott, nemcsak az interaktív kísérletezés színtere. A református egyház gimnáziumának épületében működve rendeznek itt tematikus kiállításokat, Hatvani István örökségén alapuló, egyetemi oktatók által tartott demonstrációkat, és időnként a Református Kollégium természettudományi gyűjteményeit is bemutatják. Legutóbb az 1857-ben lehullott világhírű kabai meteorit történetét feldolgozó színpadi diákelőadás aratott sikert a meteorit évfordulója köré szervezett események között (www.drk.hu/varazskucko).

Az Egerben 2006 tavaszától működő Varázstorony megszervezése Vida József főiskolai tanár személyéhez kötődik. Fő profilja az interaktív kísérletezés (Hands-on Science), de a barokk csillagvizsgálótorony és a Líceum-történeti Múzeum közelsége történelmi közegbe helyezi

a közvetlenül tapasztalható jelenségeket. A sikeres működést a magas látogatói szám (1600 fő/hó) is tanúsítja. (www.ektf.hu/hir/varazstorony.htm, *Fizikai Szemle* 2006/6).

Papp Katalin mutatta be a Szegeden 2006 őszén, a 100 éves, felújított Szent István téri Víztorony 7. szintjén, patinás környezetben megnyílt, az egyetem és a szegedi gimnáziumok régi kísérleti eszközeit bemutató kiállítást. A több mint 100 kísérleti eszköz nagy része működőképes, így nem csak a vitrinekben gyönyörködhetnek műves kivitelükben, hanem például rendhagyó fizikaórákon, városi kulturális, közéleti rendezvényeken is van lehetőség a „kincsek” bemutatására, a fizika népszerűsítésére (*Fizikai Szemle* 2006/11).

Az előkészületben lévő tudásházak közül kétségkívül a szombathelyi tűnik a legnagyobb „formatumúnak”: *Jankovics István* professzor úr, a Gothard Observatórium igazgatója mutatta be a Kámonai Arborétum közelében egy romos vízimalom felújított épületében helyet kapó „Föld és Ég” kiállítás terveit, amely a közoktatás, a felsőoktatás és az ismeretterjesztés nagyvonalú, nemzetközi támogatással segített, fejlesztésének terveibe illeszkedik.

Sebestyén Zoltán tanár úr a pécsi terveket ismertette, amelyek alapja egy városi támogatású pályázat. A tudásház helyszínül *Fejér Lipót* Pécs-belvárosi szülőházát szemelték ki, ahol a matematikai fogalmakat, törvényeket szemléltető eszközöket, interaktív játékokat terveznek a magyar matematika történetét Fejértől *Neumann János*on át *Erdős Pál*ig megjelenítő kiállítás tárlói közé. Remélhető, hogy a 2010-es Pécs Európa Kulturális fővárosa program is elősegíti majd a kezdeményezés megvalósulását.

A nem teljesen összehangolt miskolci terveket *Mester András* mutatta be, amelyhez *Paripás Béla* (Miskolci Egyetem) fűzött kiegészítést. A helyhez

illeszkedő, a műszaki, mérnöki hagyományokat bemutató kiállítást tervez egy kft., de az önkormányzat támogatását igénylő, a Fény Palotája tervről is hallottunk az egyetemi és kutatóintézeti fejlesztési tervek mellett.

A Társulat elnöke, *Patkós András* a közel három órás kötetlen eszmecsere zárásaként a tudásházak tudománynépszerűsítő funkciója mellett kiemelte azok „missziós” szerepét az egyetemi városok és térségük kulturális életében.

Valami tehát elindult. Ahogy hallottuk, az út rögös, de a nemzetközi tapasztalatok és a kezdeti sikerek igazolják a tudásházak létjogosultságát.

Papp Katalin
Szegedi Tudományegyetem



Némethné Papp Kornélia: RÁTZ LÁSZLÓ TANÁR ÚR

Studia Physica Savariensia XIII.

„Sohasem fogom elfelejteni régi tanárait, közöttük Rátz Lászlót, egy igaz pedagógust és melegszívű embert, aki először ébresztette fel bennem tárgyának, a matematikának szeretetét.” (Wigner Jenő)

A szombathelyi Berzsényi Dániel Főiskola Fizika Tanszéke 1995 óta adja ki *Studia Physica Savariensia* címmel fizikatörténeti sorozatát Kovács László szerkesztésében. A sorozatnak ebben, a XIII., kötetében Némethné Papp Kornélia Rátz Lászlónak, a Fasori Evangélikus Gimnázium legendás tanárának életét, munkásságát mutatja be igen gazdag forrásanyagra támaszkodva.

A részletes életrajzot a tanítványok, kollégák visszaemlékezései vezetik be. A családi háttér és a környezet bemutatása után a diákevek következnek. Részletesen megismerhetjük Rátz László iskoláit, a soproni magyar királyi állami Főreáltanodát, a soproni Lyceumot, az ott tanító híres és kevésbé ismert tanárokat.

Rátz László munkásságáról kaphatunk képet az életrajz központi fejezetéből. A maga korában valószínűleg a világ legjobb iskolái közé tartozó Fasori Evangélikus Gimnáziumban kiváló kollégák között dolgozhatott. A szintén neves kortársak visszaemlékezéseiből a tananyagról, a tanári módszerekről alkothatunk fogalmat és arról, mitől lesz egy iskola világhírű. Az iskola tanárai szakmailag magas szinten, a kor tudományát követve tudtak tanítani, és emellett nagy figyelmet fordítottak a tehetséges diákok gondozására, a lemaradók buzdítására. Mikola Sándor jellemezte így Rátz tanári személyiségét:

„A legkülönbözőbb képességű és hajlamú gyermeki elméket, melyekből egy-egy osztály rendszeren állani szokott, Rátz László bámulatra méltó ügyességgel tudta egységbe forrasztani, a gyengébbeket támogatni, az ingadozókat bátorítani, az ellanygulókat korholni, a kiválóakat problémák felvetésével serkenteni, mégis mindig valamennyinek figyelmét leköttni, és felettük szellemileg uralkodni.”

Rátz László „legnagyobb felfedezései” természetesen rendkívüli tanítványai, sok tehetség között a leg híresebbek: Neumann János és Wigner Jenő. A *Középiszkolai Matematikai Lapok* szerkesztése és megújítása révén pedig az egész országra terjeszthette ki tehetséggondozó munkásságát.

Rátz László kivette részét a századelő oktatási reformjaiból, a matematika oktatásának megújításából is. A munkáltató matematikatanítás bevezetésével együtt a tananyag tartalmát és a tanítás módszereit is sikerült korszerűsíteni. Külön érték és érdekesség a

szakmabeli olvasónak a kötet mellékleteként facsimilében közölt tankönyv, a Rátz László és Mikola Sándor által közösen írt *Infinitezimális számítások elemei a középiskolában*, amely ennek a munkának egyik eredménye. Az akkori tananyag színvonala, és a két szerző óriási szakmai és didaktikai tudása egyaránt tanulságot jelenthet számunkra.

Rátz László gondolatai a reform céljairól azóta sem vesztek aktualitásukból: „Azt akarjuk, hogy a középiskolából kikerülő tanuló tudományos fokú matematikai iskolázottságot vigyen az életbe: az a reményünk, hogy ily módon a matematikai gondolkozásmód behatol a közéletbe. A tanulónak látnia kell, hogy a matematika mennyi szálal van összekapcsolva a gyakorlati élettel, a tudományokkal és egész világfelfogásunkkal... Nem az a célunk, hogy a technikára és egyéb szakiskolába menő tanuló nagyobb matematikai ismeretanyagot vigyen magával, hanem hogy éppen azok, akiknek matematikai képzésük a középiskolában befejeződik, oly fogalmat kapjanak a matematikáról, a mely méltó ehhez a nagy tudományhoz.”

Rátz László tanári tevékenysége nem korlátozódott a matematikára. Renner János visszaemlékezései szerint: „Még szorosabbra fűzte a viszonyt tanítványaival a sok együttesen megtett kisebb-nagyobb kirándulás, külföldi tanulmányút, továbbá a zene, amit, mint az Ifjúsági Dal- és Zeneegyesület tanárelnöke, tanítványaival együtt művelt.”

Az életrajz mellett igen gazdag adattárat találhatunk a könyvben. Az országban található Rátz-emlékek felsorolása mellett a *KöMaL* megoldóinak, valamint a *Rátz tanár úr életműdíj* eddigi díjazottainak névsorát is megtalálhatjuk a kötetben. Kovács László *Teacher László Rátz* című angol nyelvű tanulmánya, amely a Rátz László életmű fő vonalát tárja elénk, egészíti ki a szerző munkáját.

A könyv bőségesen tartalmaz illusztrációkat. Fényképek, eredeti formában beillesztett korabeli dolgozatok, bizonyítványok, levelek teszik elevenné, színessé. Ezek közül nagyon sokat Némethné Papp Kornélia talált meg kutatása során, így nyomtatásban most láthatók először (Rátz László szülőháza, családfája, a Soproni Líceumban eltöltött két évet megelőző hét tanév dokumentumai, tanárának, *id. Renner Jánosnak*: „Nulla bácsinak” jellemzése és így tovább).

A könyvet ajánlhatjuk tanárszakos hallgatónak, tanároknak egyaránt, de az élvezetes stílus, a kor középiskoláját, tanári habitusát több oldalról bemutató életrajz más szakosok számára is érdekes, tanulságos lehet.

Ujvári Sándor

HÍREK ITTHONRÓL

Nukleáris szaktábor középiskolásoknak

Budakeszi, 2007. június 27. – július 3.

A Magyar Nukleáris Társaság 25 fő részvételével 6 napos nukleáris szaktábort szervez középiskolásoknak a budakeszi Phoenix Ifjúsági Szállóban (<http://www.hotelphoenix.hu>).

Tervezett programok

Szakmai előadások: Magfizikai ismeretek • Nukleáris technika történet • Nukleáris technika a mindennapi életben (pl. Litvinyenko-ügy) • Atomerőművek működése • Nukleáris fegyverek • Fúzió: a jövő energiája? • Atomenergia az űrkutatásban • Klímaváltozás és energetika • Orvosi alkalmazások.

Egyéb: Szimulációs programok megismerése • Tanulói kísérletek • Filmvetítés, vetélkedők • Találkozás ismert szakemberekkel • Közös dolgozat, prezentáció készítése.

Látogatások nukleáris létesítményekben: Kórházi izotóp intézet, MRI, PET/CT • BME Oktatóreaktor • KFKI Kutatóreaktor.

Részvételi díj (5 éj, 2 ágyas szobákban, napi 3 étkezés) 25 000 Ft/fő, jelentkezni lehet 2007. május 28-ig *Mester András*nál, e-mail: xkibandi@uni-miskolc.hu, telefon: 70/338-7912. Túljelentkezés esetén a korábban jelentkezőknek van előnyük, a többiek „várólistára” (tartalék) kerülnek.

Indul az LHC! – Elméleti Fizikai Iskola

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat Részecskefizikai és Gravitációkutatási Szakcsoportja *Indul az LHC!* címmel ebben az évben is megrendezi hagyományos Elméleti Fizikai Iskoláját október 27. és 31. között, Gyöngyöstarjánban. Az iskola honlapja (részletes és rendszeresen frissülő információval): http://www.kfki.hu/~elftrfsz/iskola_2007.html

Jelentkezési határidő: 2007. augusztus 31., várható költség: 36 000 Ft/fő.

Részletes tematika (a felkért előadók nevével): *Bevezetés a standard modellbe* (Trócsányi Zoltán) • *Az LHC kísérleteinek összefoglalója* (Siklér Ferenc) • *Bevezetés*

a standard modellen túli fizikába (Csikor Ferenc) • *A LEP és a Tevatron kísérleti eredményeinek összefoglalása* (Pásztor Gabriella) • *Nebéz kvarkok fizikája* (Ligeti Zoltán) • *SM Higgs keresése* (Trócsányi Zoltán) • *Nem-SM Higgs keresése* (Horváth Dezső) • *Extra dimenziók, fekete lyukak* (Cynolter Gábor) • *MSSM/SUSY az LHC-ben* (Horváth Dezső) • *Nebézion-fizika* (Lévai Péter) • *Diffraktív fizika* (Csörgő Tamás) • *Asztrofizikai várakozások és következmények* (Patkós András) • *Higgs vákuum stabilitása* (Nógrádi Dániel)

Minden érdeklődőt szeretettel várnak a szervezők: *Takács Gábor* és *Veres Gábor*

50 éves az űrkorszak – vetélkedő diákoknak

A Magyar Asztronautikai Társaság a Nemzeti Kutatási és Technológiai Hivatal támogatásával az első mesterséges hold, a Szputnyik-1 felbocsátásának fél évszázados évfordulója alkalmából országos ifjúsági vetélkedőt szervez *50 éves az űrkorszak* címmel az űrkutatás iránt érdeklődő diákok 3 fős csapatai számára. A vetélkedő fővédnöke: *Charles Simonyi* űrhajós. A verseny internetes honlapja: www.orkorszak50.hu.

A vetélkedő célja, hogy a fiatal korosztály – játékos formában – minél több ismeretre tegyen szert az űrkutatás eredményeiről. Tudatosuljon bennünk, hogy számos területen hazánk is részt vesz az űrkutatásban, az eredmények hasznosításában. Egy kis kutatómunkával, utánajárással minden feladat megoldható!

A vetélkedő fordulói magyar nyelven zajlanak. A csapatok tagjainak életkora 12-től (2007. október 4-ig be nem töltött) 18 év lehet. Jelentkezni a verseny internetes honlapján történő regisztrációval lehet, végső határideje 2007. szeptember 15.

A vetélkedő első két fordulója az interneten zajlik. A csapatoknak tesztkérdésekre kell válaszolniuk. A tesztsorozatok megoldása mellett válaszolniuk kell néhány más kérdésre is.

A vetélkedő döntője várhatóan 2007. októberben lesz Budapesten. Ezen az első és második fordulóban legjobban szerepelt csapatok vehetnek részt.

További információk – részletes feltételek, nyerevények – a www.orkorszak50.hu honlapon.

A FEKETE LYUKAK

A fekete lyuk a téridő olyan tartománya, amelyik nem tud a szokásos módon kommunikálni a külső univerzummal. Kívülről részecskék bejuthatnak, de a lyukban olyan erős a gravitációs tér, hogy belülről semmi nem kerül ki. Mivel fény sem jöhet ki, kívülről a lyuk nem látható, egy fekete hézag az űrben. A tartomány határa a fekete lyuk felülete, amit eseményhorizontnak neveznek.

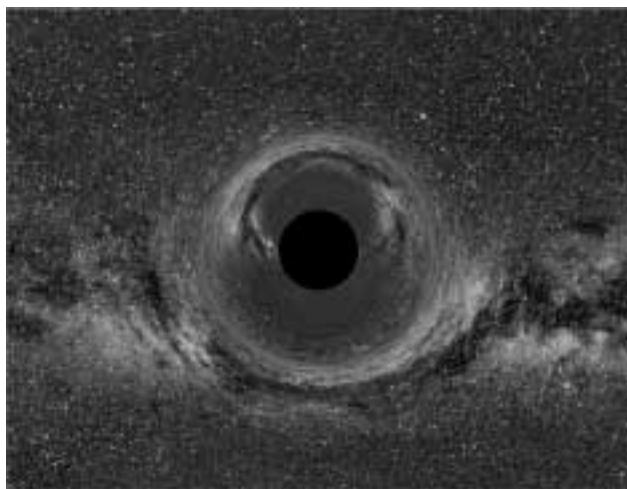
A fekete lyuk problémája a 20. század második felétől kezdve egyre jobban foglalkoztatja a kutatókat. Ennek az az oka, hogy a fekete lyuk vizsgálatához a kvantummechanikai és az általános relativitáselméleti ismereteink egyaránt szükségesek.

A kvantum fogalmát *Max Planck* vezette be a 20. század legelején, 1925-ben pedig *Werner Heisenberg* megalapozta a kvantummechanikát. Közismert *Albert Einstein* mondása, akinek nem tetszett a kvantummechanika: az Isten nem kockázik. A kvantummechanika továbbfejlesztése a kvantumtérelmélet, amely a kvantummechanikát és a speciális relativitáselméletet kapcsolja össze, és szubatomi szintig jó egyezést ad a kísérletekkel. A „legegyszerűbb”, gyakorlati szempontból talán legfontosabb kvantumtérelmélet, a kvantum-elektrodinamika, renormálható, azaz megmondja, kis skálán mi történik. Érvényes az ok-okozat sorrend, azaz egy jó elmélet. Az általános relativitáselmélet is jó elmélet: a speciális relativitáselmélet levezethető belőle, és az ok-okozat sorrend fennáll.

Jelenleg a kettő összekapcsolására jó elmélet még nem létezik, bár egyre komolyabb erőfeszítéseket tesznek erre a kutatók. Problémák például:

1. a kvantum-általános relativitáselmélet nem renormalizálható,
2. a Planck-skálán (10^{-33}) nem látható ok-okozat sorrend.

Egy 10 naptömegnyi fekete lyuk, amint 600 km távolságról látszana, a háttérben a Tejútrendszer.



A fekete lyuk fogalma nem új gondolat. Már a 18. század vége felé jelezte az angol *John Michell*, hogy sűrű rendszerből semmi sem jöhet ki. *Laplace* a század végén *Newton* törvénye alapján kiszámolta, hogy ha a fény részecske (ezt a gondolatot támogatta *Newton*), milyen feltételek mellett jöhetne ki sűrű anyagból. A fekete lyukkal kapcsolatos első igazán tudományos elmélet azonban csak a 20. század elejéről származik, amikor *Karl Schwarzschild* az általános relativitáselmélet alapján definiálta a fekete lyuk horizontját, azaz meghatározta azt a sűrű tértartományt, amelyből semmi nem tud kijutni, ha abba belekerült. Ennek egyszerű az oka: a tömeg meggörbíti a teret, és nagyon sűrű anyag körül rendkívül görbe lesz a tér.

A fekete lyuk valós, létező fogalom akkor vált, amikor 1931-ben *Subrahmanyan Chandrasekhar* meghatározta egy csillag stabilitásának kritikus tömegértékét (számítása szerint ez a Nap tömegének másfélszerese). A kisebb tömegű csillagokat az elektronok taszítása menti meg az összeroskadástól, de nagyobb tömegű csillagok összeroskadnak. Ezután *Arthur Eddington* azonnal megmondta, hogy ha ez igaz, létezik fekete lyuk. Később a neutronok és protonok szerepe, azaz a magfizika módosított ezen az elképzelésen (jóval sűrűbb neutroncsillagok is létezhetnek), de az alapgondolat megmaradt: a nagyon nagy tömegű csillagok összeroskadnak. A fekete lyukakkal az 1960-as évektől kezdtek el igazán foglalkozni, amikor rájöttek, hogy azok tényleg létezhetnek.

A fekete lyukak nagy tudósa a 20. században *Stephen Hawking* volt. Híres felfedezése a Hawking-sugárzás, amely azt bizonyította, hogy az alapdefiníció nem jó, valami mégis kijön a lyukból. Ennek oka a kvantummechanika.

Hawking érvelése szerint az üres tér a kvantummechanika törvényei szerint soha nem teljesen üres, részecske-antirészecske párok keletkezhetnek benne, amelyek azonnal újra megsemmisülnek. Természetesen ez a párkeltés nem olyan, mint amelyet fizikai kísérleteinkben megszoktunk, ahol van elég energia: itt a pár összenergiája zérus, ami azt eredményezi, hogy az antirészecskéknek negatív energiájúaknak kell lenniük, ezért partnerüktől nem távolodhatnak nagyon el. A fekete lyuk környékén azonban a nagy gravitációs energia miatt nagyon nagy lesz a részecskék energiája, és így bekövetkezhet, hogy a pozitív energiájú részecske el tud távolodni a fekete lyuktól, miközben a negatív energiájú partnere beleesik abba. A kilépő részek sugárzását nevezik Hawking-sugárzásnak. A lyukba beleesett részecske a sűrű rendszerben azonnal talál ugyanolyan kvantumszámokkal jellemezhető partnert, mint az eltávozott párja volt, és azzal szétsugárzik. A sugárzás egyik következménye,

hogy a fekete lyuk energiája nagyon kicsit csökken. Egy egykilós, azaz 10^{-27} méter sugarú fekete lyuk anyaga 10^{-21} másodperc alatt teljesen eltűnik. A sugárzás nagyon nagy energiájú gammasugárzás lesz. A nagy lyukak sokkal lassúbb ütemben vesztik el az energiájukat, mint a kisebbek.

Vita volt a kutatók között, hogy ez a sugárzás képes-e információt közölni a rendszerről. Hawking fogadott kollégáival, hogy nem, mert az elvitt információ véletlenszerű, nem jól meghatározott. Három évvel ezelőtt azonban beismerte, hogy nincs igaza, és megadta az elvesztett fogadás tétjét: egy baseball-enciklopédiát.

A fekete lyuk jellemzői

A fekete lyukat két asztrofizikailag fontos adat jellemzi: a tömege és az impulzuszórája (spinje), azaz a forgása. A gömb alakú, nem forgó fekete lyukat Schwarzschild-féle fekete lyuknak (SFL) nevezik, a forgót Kerr-féle fekete lyuknak (KFL), mert *Roy Kerr* volt az, aki a forgó test körül kialakult teret először leírta, és olyan megoldást talált, mely forgás nélküli esetben a Schwarzschild-féle leírásba megy át. A legtöbb fekete lyuk forog.

Az eseményhorizont SFL esetén gömb alakú és csak a tömegtől függ, KFL esetén forgási ellipszoid, a tömegtől és a spintől is függ. A lyuknak lehet töltése is, de asztrofizikailag az nem fontos.

A fekete lyukak megfigyelése

Két fő típusa van a fekete lyukaknak:

1. kis fekete lyukak, tömegük kisebb, mint 8–10 naptömeg,

2. szupernagy tömegű fekete lyukak, amelyek a galaxisok közepében vannak, és a tömegük meghaladja a százezer, sőt millió naptömeget.

A kis tömegű fekete lyuk olyan csillag végállapota, amely végigment a csillagfejlődés különböző stádiumain, és a szupernóva-robbanás után még mindig túlságosan nagy tömege maradt, a csillaganyag nyomása nem tudott egyensúlyt tartani a gravitációval. Az ilyen fekete lyukat akkor könnyű megfigyelni, ha kettőscsillaghoz tartozik, és a két csillag egymáshoz közel kering egymás körül. Ilyenkor ugyanis egyrészt a fekete lyuk a partnerétől anyagot vonz magához, és a felszabadult energia kisugárzódik, másrészt megfigyelhető a partner rendkívül gyors keringése láthatatlan társa körül (a Cygnus X-1 körül 5,6 nap alatt kering a kísérője).

Különösen fontos volt 2005-ben a Chandra röntgenobszervatórium észlelése, ugyanis a mágneses effektusok fontosságát sikerült igazolniuk. Egy fekete



A Cygnus X-1 fekete lyuk

lyuk nagy gravitációs terével anyagot vonz magához, ami által anyaggyűrű alakul ki körülötte. Azonban ez a forgó gáz nem tud gravitációsan bezuhanni a csillagra, először valamilyen módon el kell veszítenie impulzuszóráját. A Chandra-megfigyelések igazolták azt a korábban már gyanított feltevést, hogy az anyag beáramlásánál a mágneses térnek van jelentős szerepe. A mágneses turbulencia súrlódást okoz a korongon belül, és az eközben keletkezett szél elviszi az impulzuszóráját.

Mai ismeretünk és hitünk szerint a legtöbb galaxisban van szupernagy tömegű fekete lyuk. Ezek valószínűleg a galaxisok közepén vannak. Ha két galaxis összeolvad, a két fekete lyuk előbb-utóbb egy nagygyá egyesül.

A szupernagy tömegű fekete lyukak megfigyelése több módon lehetséges. Az egyik legfontosabb módszer itt is az, hogy a fekete lyuk közelébe kerülő mozgó objektum érzi a nagy gravitációs potenciált, és gyorsan kering körülötte. 2005-ben brit és ausztrál tudósok először figyeltek meg gázfelhőket, amelyek teljesen körbekeríttek egy fekete lyukat. A gáz sebességéből meghatározták a fekete lyuk tömegét (legalább 300 000 naptömeg). A keringés ideje 27 óra volt (a Jupiter 12 év alatt kerüli meg a Napot).

Fontos észlelési lehetőség a relativisztikus spektroszkópiai módszerek alkalmazása. Megfigyelték, hogy egy távoli laboratórium színképében a szupernagy tömegű fekete lyuk nagy gravitációs tere miatt a vas atommag spektrumvonalai például jelentősen eltolódnak (6,4 keV-vel).

A kutatók célja jelenleg gravitációs hullámok mérése (erre készül a LISA megfigyelő állomás) és az általános relativitáselmélet tesztelése. Ha két szupernagy tömegű fekete lyuk egyesül, akkor olyan erős gravitációs sugárzásnak kell keletkeznie, hogy a gravitációs hullámok már mérhetőek lehetnek.

Németh Judit

ELTE, Elméleti Fizikai Tanszék

Fizikai Szemle
MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

megjelenését anyagilag támogatják:

