

fizikai szemle



2011/11

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

Főszerkesztő:

Szatmáry Zoltán

Szerkesztőbizottság:

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

Szerkesztő:

Füstöss László

Műszaki szerkesztő:

Kármán Tamás

A folyóirat e-mail címe:

szerkesztok@fizikaiszemle.hu

A lapba szánt írásokat erre a címre kérjük.

A folyóirat honlapja:

<http://www.fizikaiszemle.hu>

A címlapon:

A Nagy Magellán-felhőben 1987 februárjában
felfénylött szupernóva (SN1987A) maradványa
napjainkban. A Hubble-űrtávcsővel készített
felvételen látható fénylő gyűrű a jóval a csillag
felrobbanása előtt távozott anyag a robbanás
fényétől megvilágítva, míg a táguló szupernóva-
maradvány (azaz a csillag ledobott anyaga)
a gyűrűn belül egyre nagyobb méretet ölt
az egykori csillag körül. Az elmúlt négy
évszázadban ez a legközelebbi szupernóva,
amelyet sikerült megfigyelni.

A Hubble-űrtávcsővel végzett rendszeres
megfigyeléseknek köszönhetően a jelenség
időbeli lefolyását is sikerült részletesen
tanulmányozni. (A felvételt a NASA, ESA és
P. Challis [Harvard-Smithsonian Center for
Astrophysics] szíves engedélyével közöljük.)

TARTALOM

<i>Ralph W. Moir, Teller Ede:</i> Tórium alapon működő, sóolvadékos, föld alá telepített atomreaktor lehetősége	365
<i>Balázs Lajos, Horváth István, Kelemen János:</i> Gammakitérősek	371
<i>Szalai Tamás:</i> Fizikai Nobel-díj 2011: Szupernóvák és a gyorsuló táguló Univerzum	377
<i>Hargittai István:</i> Újabb anyagtudományi Nobel-díj: Dan Shechtman és a kvázikristályok felfedezése	381

A FIZIKA TANÍTÁSA

<i>Egri Ádám, Blabó Miklós, Horváth Gábor, Barta András, Kriska György, Antoni Györgyi:</i> Sztereóhatás időképlettel forgással	385
<i>Vannay László, Fülöp Ferenc:</i> Fizika OKTV harmadik fordulója, a második kategória részére – 2011	387
<i>Härtlein Károly:</i> Kísérletezzünk otthon!	392

KÖNYVESPOLC

HÍREK – ESEMÉNYEK	398
--------------------------	-----

<i>R. W. Moir, E. Teller:</i> Thorium-fueled underground nuclear power plant based on molten salt technology	
<i>L. Balázs, I. Horváth, J. Kelemen:</i> Gamma ray bursts	
<i>T. Szalai:</i> Nobel price in physics 2011: Supernovae and the accelerated expansion of the Universe	
<i>I. Hargittai:</i> One more Nobel price honouring progress in materials science: Dan Shechtman and the discovery of quasi-crystals	

TEACHING PHYSICS

<i>A. Egri, M. Blabó, G. Horváth, A. Barta, G. Kriska, G. Antoni:</i> 3D-motion data determination using delayed 2D pictures of rotated objects	
<i>L. Vannay, F. Fülöp:</i> The 3rd round (2nd category) of the secondary school pupils' contest in physics – 2011	
<i>K. Härtlein:</i> Physical experiments to be performed at home	

BOOKS, EVENTS

<i>R. W. Moir, E. Teller:</i> Über die Möglichkeit, Atomenergie aus Thorium mit einen unterirdischen, Salzschnmelzen bearbeitenden Reaktor zu gewinnen	
<i>L. Balázs, I. Horváth, J. Kelemen:</i> Gamma-Ausbrüche	
<i>T. Szalai:</i> Nobelpreis in Physik 2011: Supernovas und die beschleunigte Expansion des Weltalls	
<i>I. Hargittai:</i> Ein weiterer Nobelpreis für Fortschritte in der Materialkunde: Dan Shechtman und die Entdeckung der Quasi-Kristalle	

PHYSIKUNTERRICHT

<i>A. Egri, M. Blabó, G. Horváth, A. Barta, G. Kriska, G. Antoni:</i> Die Bestimmung dreidimensionaler Daten der Bewegung rotierender Objekte aus zeitverschobenen 2D-Aufnahmen	
<i>L. Vannay, F. Fülöp:</i> Die dritte Runde (zweite Kategorie) des Schüler-Wettbewerbs in Physik – 2011	
<i>K. Härtlein:</i> Zu Hause ausgeführte Experimente	

BÜCHER, EREIGNISSE

<i>P. B. Moir, Э. Теллер:</i> О возможности добытия атомной энергии тория в специальном, обрабатывающем плавки солей погруженном реакторе	
<i>Л. Балаж, И. Хорват, Я. Кэлемен:</i> Гамма-высипки	
<i>Т. Салаи:</i> Нобелевская премия 2011 г. Сверх-новые и ускоренное расширение Вселенной	
<i>И. Харгиттай:</i> Очередная Нобелевская премия по науке материалов: Дан Шехтман и изобретение квази-кристаллов	

BUCHUNG FIZIKAI

<i>A. Egri, M. Blabó, G. Horváth, A. Barta, D. Kriska, D. Antoni:</i> Определение 3D-данных движения вращающихся предметов на основе временных рядов 2D снимков	
<i>Л. Ванны, Ф. Фюльп:</i> Третий раунд конкурса учеников средних школ по физике – 2011	
<i>К. Гэртлейн:</i> Эксперименты для выполнения дома	

KNIGI, PROISKHODYASHIE SOBYITIYA

Fizikai Szemle
MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

megjelenését anyagilag támogatják:



paksi atomerőmű



Nemzeti
Kulturális
Alap

NCA
Nemzeti Civil Alapprogram



Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

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

LXI. évfolyam

11. szám

2011. november

TÓRIUM ALAPON MŰKÖDŐ, SÓOLVADÉKOS, FÖLD ALÁ TELEPÍTETT ATOMREAKTOR LEHETŐSÉGE

Ralph W. Moir, Teller Edet

Lawrence Livermore Nemzeti Laboratórium, California, USA

Jelen cikk az egyre fogyatkozó fosszilis tüzelőanyagok és az üvegházhatású gázok által okozott környezeti problémákra kínál megoldást a manapság használt uránnál sokkal nagyobb mennyiségben előforduló tórium energetikai hasznosítását javasolva. LiF és BeF_2 olvadt sókeverék minimális viszkozitású elegyében oldott tórium-fluorid használatát javasoljuk, egy kevés ^{235}U - vagy ^{239}Pu -fluorid segítségével indítva be a folyamatot. Magát a reaktort 10 méterrel a föld alá építve képzeljük el, ahol a keletkező hasadványokat is lehetne tárolni. A grafit pótlásával, vagy a teljes zóna időnkénti cseréjével és a folyékony üzemanyag átirányításával az erőmű akár 200 évig is működhetne a hasadóanyag pótlása, vagy a keletkező hulladékok elszállítása nélkül. A technológia előnyei között említendő a nagy mennyiségben rendelkezésre álló üzemanyag és annak terroristáktól való védelme, mivel ez fegyvergyártásra alkalmatlan; a kedvező gazdasági és biztonsági jellemzők, mint például a föld alá telepítés, amely csökkentheti a lakossági aggodalmakat is. Célunk egy kis méretű, tórium alapon üzemelő reaktor-prototípus építésének elősegítése.

Az erőmű terve

Írásunk több létező nukleáris technikai vonást ötvöz. Új kombinációját javasoljuk a nukleáris fegyverkezés megakadályozásának, a föld alá telepítésnek, a mérsékelt elválasztásnak és a hosszú távú, mégis ideiglenes hulladéktárolásnak. Mindegyik ötlet az erőmű gazdaságosságát, terrorista akcióktól való védettségét és a jelenleg ismert készletek megvédését igyekszik elősegíteni annak érdekében, hogy az atomenergia a IV. generációs terveknek megfelelően jelentősen elterjedhessen.

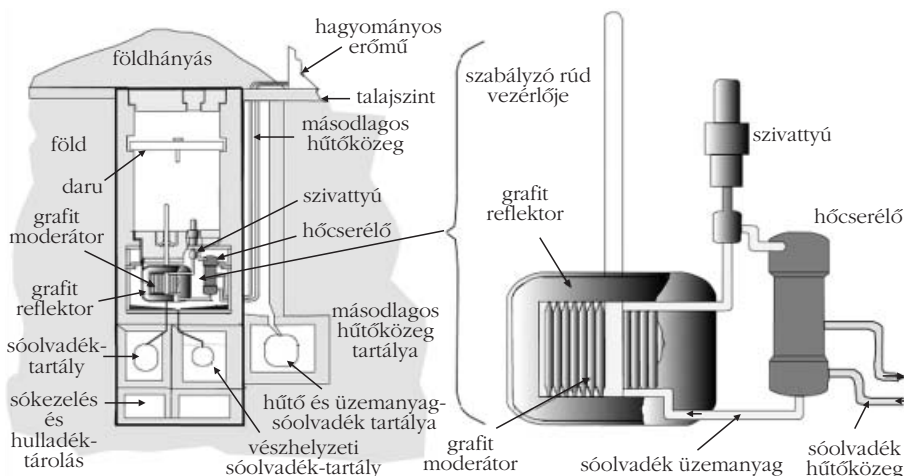
A sóolvadékos tórium reaktor alkalmazását javasoljuk, amelyben a folyékony, olvadt állapotú sók fűtőanyagként és hűtőközegként is működnek. A sóolvadékos reaktor feltalálói *E. S. Bettis* és *R. C. Briant* voltak, kifejlesztését pedig az Oak Ridge Nemzeti Laboratóriumban végezték *A. Weinberg* vezetésével [1]. A jelenleg javasolt reaktor is a Sóolvadékos Reaktor Kísérleten (Molten Salt Reactor Experiment) alapul [2–4], amely 1965 és 1969 között üzemelt ugyanitt¹, 7 MW termikus teljesítménnyel (*1. ábra*). Az olvadt elegy fő komponensként ~70 mol% LiF -ot és 20 mol% BeF_2 -ot tartalmazott, továbbá emellett 8 mol% ThF_4 -ot, 1 mol% ^{238}U - és 0,2 mol% ^{235}U -fluoridot, UF_4 és UF_3 formában

Megjelent a *Nuclear Technology* folyóiratban 2005 szeptemberében a 334–340. oldalakon. Fordította *Király Márton*, BME vegyészmérnök MSc hallgató. A cikket a szerző engedélyével közöljük.

Ez a kutatás az USA Energiaügyi Minisztériuma és a California Egyetem által üzemeltetett Lawrence Livermore National Laboratory együttműködése keretében készült a W-7405-Eng-48 jelű szerződésnek megfelelően.

¹ Több tízezer oldalnyi részletes kutatási napló érhető el az Oak Ridge-i kísérletről (1958–1976) féléves jelentések formájában az interneten: <http://www.energyfromthorium.com/pdf/> (a fordító megjegyzése).

($UF_3/UF_4 \geq 0,025$).² Ezt az elegyet 560 °C körüli hőmérsékleten vezették a reaktorba, ahol ~700 °C-ra hevült a hasadási reakciók következtében, mindvégig közel atmoszférikus körülmények között. A tartály, a csövek, a szivattyúk és a hőcserélők mind nikkel-ötvözetből készültek³ [5, 6]. Az olvadt sók gőznyomása ezen a hőmérsékleten is igen alacsony (<10 kPa), és a várható atmoszférikus forráspont nagyon magas (~1400 °C). A hő a hőcserélőkön keresztül adódott át a szekunder, nem radioaktív, hagyományos erőmű föld fölött található. Az erőmű sok egysége nem látszik, a rajz csupán illusztráció. 30 év üzemeltetés után újabb aktív zónák létrehozása szükséges, amelynek egyik lehetséges módja a grafit cseréje.



1. ábra. Az sóolvadékkal működő atomerőmű föld alá telepített nukleáris egységének rajza [7]. Az erre települő, nem radioaktív, hagyományos erőmű a föld fölött található. Az erőmű sok egysége nem látszik, a rajz csupán illusztráció. 30 év üzemeltetés után újabb aktív zónák létrehozása szükséges, amelynek egyik lehetséges módja a grafit cseréje.

A fluidum közepes, 0,5 m/s-os sebességgel cirkulált 5 cm átmérőjű csövekben, amelyek a teljes reaktortérfogat 10–20%-át tették ki a néhány méter magas grafitömbök között.

A felsorolt anyagok közül csak a grafit éghető, és az is viszonylag lassan ég. A víz és a levegő bejutását a sóolvadékba minimalizálni kell a korrózió visszaszorítása végett, mivel a jelen lévő anyagok oxidációs állapotai alacsonyak. Baleset esetén az üzemanyag passzívan elválasztható a grafitól, egyszerűen a sóolvadék elvezetésével egy tartályba, így akadályozva meg, hogy a bomlási hő tovább melegítse a grafitot.

A grafit lassítja le a gyors neutronokat, amelyek a hasadási reakcióban keletkeznek. A lassú neutronok újabb hasadást és újabb neutronokat eredményeznek, így tartva fenn a láncreakciót. Egy ^{232}Th atommag befog egy lassú neutron, ^{233}Th keletkezik, amely 22 perces felezési idő után béta-bomlással ^{233}Pa -má alakul. A ^{233}Pa 27 napos felezési idővel béta-bomláson keresztül ^{233}U izotóppá alakul, amely egy további lassú neutronnal képes a maghasadásra és újraindítja a ciklust. A reakciót a 2. ábra mutatja be. Figyeljük meg, hogy a kör nem tartalmaz ^{235}U -t, amely csak a folyamat elindí-

tásához szükséges. Ennek eredményeképpen drasztikusan lecsökken az igény a bányászott urán iránt.

A folyamatot indító töltet lehet bányászott és ^{235}U -ban dúsított urán (~3500 kg szükséges 1000 MW elektromos teljesítmény esetén). Alternatíva lehet még a hagyományos atomerőművek kiégett fűtőanyaga, főleg annak ^{239}Pu tartalma.⁵ A ^{239}Pu transzurán elemként a radioaktív hulladékokban található, amelyek megfelelő elhelyezése tetemes pénzbe kerül. Az erőmű működése során a ^{235}U és a transzuránok fokozatosan elhasadnának és a ^{233}U fokozatosan termelődne, amely jobb üzemanyag, mint a ^{235}U , mivel a hasadásra nem vezető termikus neutronbefogás ennél az izotóp-nál fele olyan gyakori.

Javaslatunk egyik fontos sajátja, hogy legalább 10 méterrel a föld alatt képzeljük el a radioaktív anyagok és a reaktor elhelyezését, míg az elektromos erőmű a föld fölött található és a forró, de nem radioaktív sóolvadékkal üzemel. A reaktor hőtermelő zónája minimális emberi közreműködéssel és fűtőelem-pótlással működhet évtizedeken át. A föld alatti kiképzés három lehetséges módja; az alagútúrás, a mélyfúrás és a felszíni ásás közül [8] a felszíni ásást és utólagos betakarást tartjuk a legjobb megoldásnak, ahogy az az 1. ábrán is látható. A föld alá telepítés légibalesetek esetén is megakadályozhatná a környezet radioaktív szennyezését. A 10 méter vastag beton és a fölé hordott földréteg elég a legtöbb tárgy megállítására. Ki-

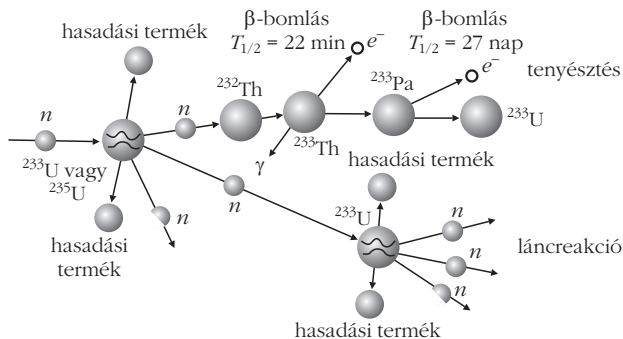
² A Be és Li keverék helyett inkább Na és Zr fluoridok használatát javasolnánk a berillium és a lítiumból keletkező trícium veszélyeinek csökkentése érdekében.

³ Valószínű, hogy az összes komponens lecserélhető lenne nikkelről szén-alapú anyagokra, így emelve meg az üzemi hőmérsékletet és ezzel lehetővé téve egy héliumturbina (~900 °C) alkalmazását a hagyományos gőzturbinák helyett, vagy hidrogént lehetne termokémiai úton előállítani (~1050 °C). Egy kisebb kutatási program megvizsgálhatná ezen magas hőmérsékletű alkalmazások megvalósíthatóságát.

⁴ A szekunder körben keringő keverék lehetne NaBF_4 és NaF olvadt keveréke. Más anyagok is szóba jöhetnek a tervezési követelményeknek megfelelően, mint az alacsony olvadáspont a befagyás elkerülése végett.

⁵ Új reaktorok indításához használható a már meglévő reaktorokban termelt ^{235}U egy részének kivétele fluorinációval, ebben az esetben indítótöltetre (urán vagy plutónium) sincs szükség, csak kezdeti neutronforrásra. Ez a folyamat azonban lassú, mivel csak kis mennyiség vehető ki egyszerre leállás nélkül. Becslések szerint úgy 8 évre van szükség egy működő reaktorból egy új indításához szükséges mennyiségű ^{235}U összegyűjtéséhez. Az USA jelenleg négy nagy reaktor indításához elegendő stratégiai ^{235}U készlettel rendelkezik (a fordító megjegyzése).

Forrás: C. W. Forsburg and L. C. Lewis (1999-09-24): Uses For Uranium-233: What Should Be Kept for Future Needs? ORNL-6952 (Oak Ridge National Laboratory, USA). <http://moltensalt.org/references/static/downloads/pdf/ORNL-6952.pdf>.



2. ábra. A tenyésztési reakció bemutatása: a tórium egy neutron befogásával két lépésben átalakul a hasadóanyaggá, ^{233}U -ná, amelynek hasadása átlagosan 2,5 neutront eredményez (ezt jelzik az ábrán a „fél neutronok”).

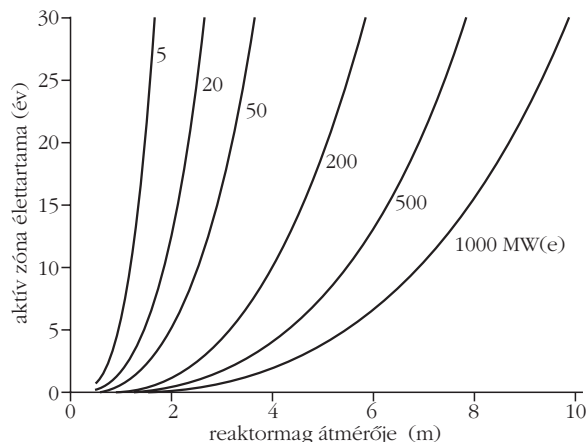
küszöbölne a tornádók és terrorista támadások jelentette veszélyt is. Baleset esetén a szokásos biztonsági konténmenten felül jobban elszigetelné a radioaktív anyagokat. A 10 méter mély telepítés kompromisszum a biztonság növelése és az építési költségek között. Reményeink szerint ez a telepítési mód mindössze 10%-kal növelné meg az építési költséget.

A '60-as években működött sóolvadékos reaktornak egyik nagy előnye, hogy több keletkező hasadványt könnyen el lehetett távolítani. Hélium áramoltatásával a gázok (Kr és Xe) egyszerűen kibuborékolnak az elegyből, majd a héliumtól elválasztva egy tartályban bomlanak tovább. A nemesfémek és a félnemesfémek kicsapódnak.⁶ Az újonnan tervezett reaktorokban ez a megoldás a légzemű termékek elvételére ismét felhasználható lehetne. A kicsapási eljárást jelentősen fel lehetne javítani centrifugák és szűrők alkalmazásával az ellenőrizetlen kicsapódás helyett. A többi hasadási termék, mint a ritkaföldfémek (Sm, Pm, Nd, Pr, Eu, Ce) és az alkáliföldfémek két vagy háromértékű fluoridokat képeznek, amelyek oldódnak a sókeverékben, így szeparálásukat elég akár 30 évente elvégezni. Ezen elemek felhalmozódása csekély hatással van a neutronokra és az elegy kémiai tulajdonságaira, (például korróziós hajlam). Hosszabb távú vizsgálatok szükségesek ezek felmerítésére és pontos felmérésére.

A legtöbb hasadvány 30 évnél rövidebb felezési idővel rendelkezik. Ezek a rövid élettartamú hasadványok az erőmű területén tárolhatók és ellenőrizhetők akár évszázadokig is, miközben veszélyességük legalább három nagyságrenddel csökken a radioaktív bomlás miatt. Három elem izotópját azonban szeparálni kell a hosszú élettartam miatt: ^{99}Tc (210 000 év felezési idő, 20 barn⁷ neutronbefogási keresztmetszet, 23 kg/GW(e)·év), ^{129}I , (1,6 millió év, 30 barn, 3,8 kg/GW(e)·év) és a ^{135}Cs (2,3 millió év, 9 barn, 34 kg/GW(e)·év). Új megoldásokat kell találni ezen rövid (≤ 30 év felezési idő) és hosszú életű (> 30 év felezési idő) hasadási termékek elválasztására.

⁶ Az itt felmerülő nemes- és félnemesfémek: Zn, Ga, Ge, As, Nb, Mo, Tc, Ru, Rh, Pd, Ag, Cd, In, Sn, Sb. A félnemesfém kifejezés itt azt jelenti, hogy nem alkotnak fluoridokat, hanem elemi formában csapódnak ki az olvadékból.

⁷ 1 barn = 10^{-24} cm².



3. ábra. Az aktív zóna élettartama az átmérő függvényében. A grafit mállását mutatja be a kimeneti elektromos teljesítmény széles skálája mellett.

Hosszabb idejű üzemeltetés után, amely akár 30 év is lehet, a grafitömbök mállása miatt a reaktort le kell állítani (3. ábra). Az itt vizsgált jellemzők [4, 9]: 30 év üzemeltetési idő, 10 méter átmérőjű aktív zóna és 1000 MW elektromos teljesítmény, a neutronfluencia $3 \cdot 10^{26}$ n/m² 50 keV-nél nagyobb energiájú neutronokra és 3%-os mállás 750 °C-on 85%-os erőművi kihasználtság esetén. A robotika gyors fejlődése miatt a grafit cseréje gyors és olcsó művelet lehet. A másik élettartam-meghatározó tényező a korrózió. Amikor a reaktor lelkét adó grafitmoderátor helyreállításra vagy cseréjére szorul, a sóban oldott üzemanyagot folyékony állapotban el lehet vezetni a reaktorból. Ekkor ki lehet cserélni a korrodálódott alkatrészeket és szeparálni lehet az olvadtsóból a megmaradt bomlástermékeket redukív extrakció segítségével, így csökkentve a nem kívánatos neutronabszorpciót. Ezen műveletek elvégzése után a sóban oldott üzemanyagot egyszerűen vissza lehet vezetni a reaktorba, akár évtizedekkel hosszabbítva meg az erőmű élettartamát. A főtömeget kitevő anyagok (lítium-, berillium- és tórium-fluoridok) akár több száz évig is kitartanak, mielőtt nukleáris reakciók során más elemekké alakulnának.

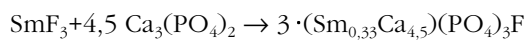
Ez a folyamat addig ismételhető, ameddig csak létezik az erőmű, amely fenntartása és üzemeltetése szempontjából leginkább egy gáthoz hasonlítható, de még annál is kisebb a várt környezeti terhelés. A hasadványokat az üzem területén biztonságosan lehetne elválasztani és tárolni, vagy akár elszállíthatóak egy végleges tárolóba. Szerintünk a radioaktív anyagok tárolását célszerűbb lenne az erőmű területén megoldani, egyrészt mivel a komplexum már önmagában is a föld alatt helyezkedne el, másrészt az erőmű biztonságáról úgyis gondoskodni kellene.

Az erőmű teljes leszerelése esetén gondos tervezést igényelne, hogy egy új, végleges tároló kialakítása és a veszélyes anyagok elszállítása, vagy a létező telephely biztonsági megerősítése lenne célravezetőbb és olcsóbb. Elképzelésünk szerint csak gyengén radioaktív anyagokat kell majd az erőműbe szállítani és minimalizálnánk az erősen radioaktív anyagok elszállítását, így csökkentve a balesetek és terrorista akciók

veszélyét. Egy következtetés nyilvánvaló: egyre fontosabbá válik a radioaktív anyagok gyakorlati hasznosítása, például nyomjelző anyagokként, így kovácsolva tőkét egy potenciális veszélyforrásból.

Hulladékkezelés szubsztituált fluorapatit felhasználásával

A hulladékkezelés lehetséges formája egy természetesen előforduló ásvány, a $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$ fluorapatit formájában történhet, amelyben az afrikai őreaktor aktinidáit is megtalálták. Ez a kis oldhatóságú ásvány nagyban hasonlít a fogzománchoz. Ha például a hasadványként keletkező szamáriummal helyettesíthetjük a kalciumot:



A reakció eredménye egy kerámiaszerű por, amely tömbökké olvasztható hosszú távú tárolás céljára az erőmű területén vagy a hulladéklerakóban.

Előnyösebb lenne a hulladékot még a tömörebb, fluorid formában szállítani, majd ezt az átalakítást a végleges tároló helyén elvégezni, mivel a reakció után megnő a hulladék szállítandó tömege és térfogata. A raktározott fluorid sokat összeolvasztva, folyékony formában lehetne a szállító konténerekbe tölteni, az elemi kénhez hasonlóan, majd a tárolás helyén a sóolvadékból állíthatnák elő a szubsztituált fluorapatit tömböket. Amennyiben az erőművön kívüli végleges tárolás mellett döntenének, úgy az sóolvadékos technológiához szükséges tárolókapacitás a Yucca Mountainhoz hasonló nukleáris lerakókban legalább 10-szer, de akár 100-szor kisebb lenne, mint az egyszerű használt könnyűvízes erőművi hulladék esetén, hiszen jóval kisebb a hulladék remanens hője.

Biztonság

A sóolvadékkal működő reaktort úgy tervezték, hogy reaktivitásának negatív hőmérsékleti együtthatója legyen. Ez azt jelenti, hogy az üzemi hőmérséklet fölé emelkedve gyorsan csökken a reaktor teljesítménye, amely a biztonságos üzemeltetés egy fontos és egyben szükséges eleme. A sóolvadékos reaktor ebben a tekintetben kifejezetten jó – kicsi a többletreaktivitása, mivel viszonylag sűrűn kell friss tóriummal ellátni, és magas a konverziós tényező, amely automatikusan helyettesíti az elhasznált fűtőanyagot. Az üzemanyagpótlás elmaradása biztonsági kockázatot nem jelent, mivel a reaktivitást korlátozza a jelen lévő üzemanyag kiégése. A kis mértékben megnövekvő reaktivitást az üzemanyagpótlás időleges leállításával lehet kompenzálni. A jelenlegi reaktorok mintegy 20% fölös reaktivitástartalékkal üzemelnek. Szabályozó rudak és reaktormérgek segítségével kell nemcsak az esetleges baleseteket megelőzni, hanem magát a biztonságos és stabil üzemelést fenntartani. A sóolvadékos reaktornál a szabályozó rudak csak a

mintegy 2%-os reaktivástöbblet kompenzálására szolgálnak, amely az elegy indítás utáni felmelegítéséhez szükséges (azaz a negatív hőmérsékleti együttható leküzdéséhez). Vagyis a reaktorban egyszerre csak a láncreakció fenntartásához szükséges mennyiségű fűtőanyag van jelen.

A légnemű bomlástermékeket folyamatosan eltávolítják és nyomás alatti tartályokban tárolják. Összehasonlításképpen a hagyományos reaktorokban ezek a gázok felgyülemlenek a cirkónium fűtőelem csövekben, ezzel nyomásnövekedést és esetleges további problémákat okozva. Egy előre nem látott baleset esetén a bomlástermékek üzemeltetés közbeni eltávolítása sokkal kisebb lehetséges radioaktív kibocsátással fenyeget.

A bomlástermékek kijutását megakadályozó megszokott három gát itt egy negyedikkel is kibővül. Az elsődleges tartály és csőrendszer a lecsapoló és tároló tartállyal együtt alkotja az első gátat. Ezek vészleállítás és szivárgás esetére beépített tartállyal és szivárgásbiztonsági berendezésekkel vannak körülvéve, így alkotva a második gátat. A harmadik gátat a reaktort körülvevő konténment adja. A negyedik gát a föld alá telepítéssel valósítható meg. Ez egy extra „gravitációs gát”, amely segíti az elszigetelést, mivel minden kikerülő anyagnak 10 métert kellene fölfelé haladnia, mielőtt elérhetné a felszínt.

Baleset vagy szivárgás esetén a radioaktív anyagok a föld alatt maradnának elszigetelve. Az ezután kis mennyiségben termelődő remanens hőt a hőcserélők akár passzívan is el tudnák vonni. A passzív hőelvonás használható lehetne a tárolt bomlástermékek hűtésére is, hővezető csövek segítségével.

A kezdeti üzemanyag és a hőcserélőben keringő segédanyag mennyisége kevesebb mint fele a többi tenyésztőreaktor-típushoz képest, mint például a folyékony fémmel hűtött gyorsreaktorok esetén. Ez abból adódik, hogy a gyorsreaktorokhoz szükséges kritikus tömeg jóval nagyobb, mint a termikus reaktoroknál, ezzel csökkentve az olvadt só esetén a kezdeti fűtőanyagigényt.

Üzemanyag-ciklus utólagos feldolgozás és fegyvergyártás nélkül

Egy ilyen típusú reaktor indításához a tórium mellett 20%-os dúsítású urán szükséges, 1000 MW (elektromos) teljesítményű reaktor esetén összesen mintegy 3,5 tonna ^{235}U -ra, 14 tonna ^{238}U -ra és 110 tonna tóriumra van szükség. A kis dúsítás miatt könnyebb a kezdeti uránt védeni, mivel ez atomfegyver előállításához további dúsítás nélkül alkalmatlan. Fontos melléktermékként keletkezik egy kevés ^{232}U , amely $(n, 2n)$ majd (γ, n) lépésekkel keletkezik a ^{233}U -ból. A ^{232}U erősen radioaktív és szokatlanul erős a bomlási kísérő gamma-sugárzás (2,6 MeV), amely megnehezíti az ezzel való visszaélést és megkönnyíti annak detektálását. Egy ^{232}U -t tartalmazó bomba nagyon radioaktív lenne és veszélyt jelentene annak készítőire is.

Az urán 20%-os dúsításról indul, majd ez a reakció során fogy, így soha nem lesz közvetlenül használható fegyverkezésre.⁸ A ^{238}U -ból képződő ^{239}Pu a reaktorban elég gyorsan magasabb tömegszámú izotópokká alakul, így az is rossz kiindulási anyag lenne.⁹ A keletkező termékek védelme így is szükséges, de kevésbé fontos. Ezen ciklus előnye, hogy az üzemanyag 80%-a a reaktorban képződik és az erőműbe szállított üzemanyag nem használható fegyverkezésre.

A konverziós arány¹⁰ 0,8-ról indul és 30 évnyi üzemeltetés után 0,77-re csökken [4]. Egy mai 1000 MW (elektromos) könnyűvízes erőműnek¹¹ mintegy 5700 tonna bányászott uránra van szüksége a 30 évnyi üzemeléshez. Egy ugyanilyen teljesítményű sóolvadékos reaktor 75%-os kihasználtság esetén mindössze 17 tonna tóriumot, 3,8 tonna ^{238}U -t és 6,7 tonna ^{235}U -t használna, amelyhez mintegy 1500 tonna bányászott uránra lenne szükség.¹² Ezzel az uránfelhasználásra vonatkozó aggodalmunk negyedére csökkenhet a mai reaktorokhoz képest, míg a tóriumfelhasználás elhanyagolható az ismert készletekhez képest.

Példánkban az erőműbe beszállított nehéz atommagok 14%-a hasadt el 30 év alatt.¹³ Ha bele vesszük

⁸ 15 év üzemeltetés után az uránizotópok megoszlása a következő lenne: 0,02% ^{232}U , 8% ^{233}U , 2% ^{234}U , 4% ^{235}U , 3% ^{236}U és 83% ^{238}U

⁹ 15 év üzemeltetés után a plutóniumizotópok megoszlása a következő lenne: 7% ^{238}Pu , 36% ^{239}Pu , 21% ^{240}Pu , 15% ^{241}Pu és 20% ^{242}Pu .

¹⁰ Konverziós arány = ^{235}U és hasadó Pu-izotópok képződési sebessége / hasadóanyagok fogyasztásának sebessége

¹¹ Egy könnyűvízes reaktor fűtőanyag-szükségletének nagyságrendjét becslése:

$$\frac{1000 \text{ MW(e)} \cdot 0,75 \cdot 365 \frac{\text{nap}}{\text{év}} \cdot 30 \text{ év} \cdot 5\%}{0,32 \frac{\text{MW(e)}}{\text{MW(h)}} \cdot 50000 \frac{\text{MW nap}}{\text{tonna}} \cdot 0,45\%} = 5700 \text{ tonna}$$

bányászott urán 30 év alatt (itt az (e) az elektromos a (h) a hőteljesítményre utal). Ez 200 év alatt 38 000 tonna bányászott uránt jelent.

Nehéz atommagok hasadása:

$$\frac{1000 \text{ MW(e)} \cdot 235 \text{ ate} \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \frac{\text{kg}}{\text{ate}} \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600 \frac{\text{s}}{\text{év}}}{0,32 \frac{\text{MW(e)}}{\text{MW(h)}} \cdot 195 \cdot 10^6 \text{ eV} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \frac{\text{J}}{\text{eV}}} = 1240 \text{ kg}$$

évente.

Hasadási arány 1,24 tonna $\cdot$ 30 év $\cdot$ 0,75/5700 tonna = 0,49%.

A szükséges bányászott urán egy sóolvadékos reaktor indításához 3,5 tonna $^{235}\text{U}/0,0045 = 780$ tonna. Az alternatív ciklus indításához 2,8 tonna $^{235}\text{U}/0,0045 = 620$ tonna bányászott urán szükséges.

¹² 6,7 tonna $^{235}\text{U}/0,0045 = 1500$ tonna bányászott urán szükséges, ahol az urán 0,7%-os ^{235}U tartalma 64%-os hatásfokkal dúsítható.

¹³ Nehéz atommagok hasadása:

$$\frac{1000 \text{ MW(e)} \cdot 233 \text{ ate} \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \frac{\text{kg}}{\text{ate}} \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600 \frac{\text{s}}{\text{év}}}{0,43 \frac{\text{MW(e)}}{\text{MW(h)}} \cdot 195 \cdot 10^6 \text{ eV} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \frac{\text{J}}{\text{eV}}} = 915 \text{ kg}$$

évente.

Hasadási arány = 30 év alatt elhasadt atommagok száma osztva az összes nehéz atommaggal:

$$\frac{915 \text{ kg} \cdot 0,75 \cdot 30 \text{ év}}{110000 \text{ kg Th} + 32400 \text{ kg } ^{238}\text{U} + 7900 \text{ kg } ^{235}\text{U}} = \frac{20600 \text{ kg}}{150300 \text{ kg}} = 13,7\%.$$

30 évet és 75%-os kihasználtságot feltételeztünk minden esetben, így a kapott eredmények összehasonlíthatók. A hasadóanyag-felhasználás így $0,75 \cdot 915 = 690$ kg/év.

az 1500 tonna uránt, mely a dúsítás során visszamaradt, akkor ez az arány 1,3%. Ez összehasonlítható a manapság alkalmazott, az uránt nyílt üzemanyagciklusban felhasználó technológiák 0,5%-os arányával, a 11. lábjegyzet számításai szerint.

Alternatív üzemanyagciklus

Ha a későbbi sóolvadékos reaktorok működtetését a tiszta ^{232}Th – ^{233}U ciklus felé tolják el, akkor ezzel a konverziós arány az 1-hez közelít, és a bányászott urán utáni kereslet nagyságrendekkel csökkenhet vagy akár meg is szűnhet. A ciklus indításához csak ^{235}U és tórium-fluoridok szükségesek a sóolvadékban.¹⁴ A tórium elnyelné a neutronokat és ^{233}U -t termelne. Bár ez az üzemanyag erősen radioaktív, kémiai szeparáció után közvetlenül felhasználható atomfegyverekben, így ez ellen különleges intézkedésekkel kell védekezni. Meg kell akadályozni a protaktínium szeparálását, mivel az közvetlenül ^{233}U -ná bomlik az előbbieken említett erősen radioaktív és könnyen detektálható ^{232}U „ γ -tüske” nélkül.

Ezen ciklus nagy előnye, hogy a reaktor saját üzemanyagát állítja elő, így indítás után nem kell az erőműbe fegyverekben felhasználható anyagokat szállítani. Ezzel megszűnhet az igény urán további bányászatára akár több száz évre, bár a grafitot időnként cserélni kell [4]. Egy mai reaktor 200 év alatt 38 000 tonna bányászott uránt használna el, míg egy sóolvadékos reaktornak ^{235}U -nal és tóriummal indítva mindössze 600 tonna bányászott uránra volna szüksége az elején.¹⁵ Ezen 200 év alatt 137 tonna tórium hasadna el¹⁵ és a hasadási arány uránra és tóriumra együtt 18% lenne.

Már kis mennyiségű hasadóanyag kivétele esetén is leállna a reaktor, ezzel is csökken az illetéktelen kezekbe kerülés veszélye. Az üzemanyag kivételét a reaktorból csak az erőmű dolgozói tudnák elvégezni, mivel ez nem fér össze a normális üzemeléssel. Egyértelmű, hogy folyamatos üzemeltetésre van szükség. Így anyagkivétel észrevétel nélkül csak hosszú idő alatt, kis mennyiségek elvételével lehetséges.

A reaktorok üzemeltetésének kézben tartására tovább szigorított nemzetközi biztosítéki egyezményekre és ezek teljes betartására van szükség az ellenőrzési eljárások és a technikai eszközök területén. Kis méretű kamerákra és adó-vevőkre lenne szükség annak biztosítására, hogy a reaktor minden pontján nyomon követhető legyen annak működése. Nem egy-

¹⁴ Az indításhoz szükséges ^{233}U előállítása történhet akár részecskegyorsítók vagy termionukleáris fúzió által termelt neutronokkal tóriumot besugározva, amennyiben ezek a technológiák megvalósulnak. Ez a módszer, vagy a jelenlegi reaktorok elhasznált üzemanyagának feldolgozása szükségtelenné tenné további urán bányászatát, ellenben fegyverkezési és biztonsági kérdéseket vet fel, amelyeket meg kell oldani.

¹⁵ Nehéz atommagok hasadása 200 év alatt = $0,915 \text{ tonna/év} \cdot 0,75$ (kihasználtság) $\cdot 200 \text{ év} = 137$ tonna. Hasadási arány 200 évre = $(137 \text{ tonna tórium}) / (620 \text{ tonna bányászott urán} + 137 \text{ tonna tórium}) = 18\%$.

szerű feladat a jelentősebb mennyiségű atomfegyver-alapanyag gyártás lehetőségének kizárása, ezért ezen anyagok nyomon követése mellett az információknak is könnyen hozzáférhetőnek kell lennie. Ennek a nyíltság politikájának részét kell képeznie, amelynek fokozatosan teret kell nyernie, így biztosítva a világ stabilitását. Ezen nyitás megvalósítása nyilvánvalóan nem lesz könnyű, de talán jobb világot teremthet a többi alternatívával szemben.

Gazdasági versenyképesség

Gazdasági célunk, hogy alacsonyabb legyen a termelt villamos energia átlagos ára az erőmű élettartama alatt mint egy fosszilis tüzelőanyagot felhasználó erőmű esetén. Születtek olyan tanulmányok, amelyek szerint lehetséges, hogy egy sóolvadékos reaktor olcsóbb elektromos energiát termeljen, mint egy szén alapú erőmű vagy egy könnyűvízes atomerőmű [4, 12]. Több oka van a vártan alacsonyabb költségeknek: kis nyomás, alacsony üzemeltetési és karbantartási költség, fűtőelemgyártás hiánya, könnyű üzemanyag-kezelés, kis mennyiségű hasadóanyag, több blokk telepíthető egy telephelyre, megosztva az infrastruktúra kiépítésének költségeit, továbbá nagy teljesítményű erőmű építhető. A föld alá telepítés költsége nyilvánvalóan további vizsgálatokat igényel, de valószínűleg nem fogja jelentősen lerontani a technológia versenyképességét.

Miért nem fejlesztették még ki a sóolvadékos technológiát?

Ha egy sóolvadékkal működő reaktor ilyen nagy előnyökkel bír, joggal merülhet fel a kérdés, hogy miért nem fejlesztették még ki a szükséges technológiai hátteret az elmúlt 30 évben? Több évtizeddel ezelőtt heves verseny folyt a reaktorok méretének és teljesítményének növelésére a kevés akkor ismert uránkészlet ellenére, így próbálva meg fedezni a világ ugrásszerűen növekedő energiaigényét. A verseny két nagy esélyesre korlátozódott: a folyékony fém hűtésű gyorsreaktorra – amely az ^{238}U – ^{239}Pu cikluson alapult – és a ^{232}Th – ^{233}U alapon működő termikus sóolvadékos reaktorra. A gyorsreaktornak nagyobb volt a tenyésztési tényezője, több neutron keletkezett egy hasadásban és kisebb volt a nem kívánt neutronelnyelés, ezzel megnyerte a versenyt. Ezen tény és a kísérleti reaktorok számának gazdasági okokkal összefüggő csökkentése szolgáltak érvként a sóolvadékos technológia kifejlesztésének leállítására ahelyett, hogy megtartották volna azzal párhuzamosan, mint lehetséges alternatívát. Szerintünk ez megbocsátható vétek volt.

Ennek eredményeképpen nem sok fejlesztés történt ezen a területen az elmúlt 30 évben. Mint később kiderült, jóval nagyobb uránkészleteket találtak, mint azt korábban képzelték, az elektromos energia felhasználása pedig nem nőtt olyan ütemben, mint

ahogy várták. A magas tenyésztési tényező később nem bizonyult olyan fontosnak. Ismét rájöttek, hogy egy tóriummal működő reaktor előnyösebb lehet, mivel indítás után nincs szükség további hasadóanyagra, csak a tórium pótlására, mivel a hasadóanyagát a reaktor maga állítja elő.

A IV. generációs reaktortípusok közé hat új, tervezett reaktortípus került, köztük a sóolvadékos elgondolás is. Mindemellett egy Továbbfejlesztett Üzemanyag Ciklus Kezdeményezés (AFCD) nevű program is indult a reaktorok hasadási termékeinek elválasztására és recirkuláltatására.

Szükséges fejlesztések és következtetések

Végző soron úgy hisszük, hogy egy kis méretű prototípus építése lenne szükséges egy új, gazdaságilag elfogadható atomerőmű típus kifejlesztése érdekében. Az sóolvadék alkalmazása lehetővé teszi szokatlanul kis méretű reaktorok építését, amelyen keresztül tanulmányozható lenne a várható üzemi hőmérséklet, energiasűrűség, áramlási sebesség, és lehetővé válna a technológia méretnövelése. Egy 10 MW, vagy akár 1 MW (elektromos) teljesítményű tesztreaktor is lehetővé tenné az olyan fontos kérdések tanulmányozását, mint például a grafit mállása, az energiasűrűség és a korrózió. A kutatás és fejlesztés támogatására lenne szükség olyan területeken, mint a felhasználható anyagok, ezek várható élettartama, a keletkező hulladékok és szeparálásuk, amelyekre azonban nincsen szükség a prototípus megvalósításához és üzemképességéhez.

Íme néhány a szükséges elvégzendő kutatások közül: szükséges olyan új nikkelötvözet kifejlesztése, amely ellenáll a tellúr okozta töredezésnek, amelyet az Oak Ridge-i reaktornál megfigyeltek. Amennyiben a szénszál alapú kompozitok sikeresek lesznek, úgy ez a korróziós kérdés háttérbe szorulhat. Könnyen megvalósítható extrakcióra van szükség a két- és háromértékű fluoridok, elsősorban a ritkaföldfémek kinyerésére, amellyel a fűtőanyag-keverék felhasználhatósága 30 évről akár 200 évre is meghosszabbítható. Vizsgálni és demonstrálni kell egy ideiglenes és egy hosszú távú hulladékkezelési formát minimális aktinoida-átvitel mellett, előbbire a folyékonyan tartott fluoridokat, utóbbira a szubsztituált fluorapatitot javasoljuk. Ez a megoldás – a hulladék hőtermelésétől függően – akár két nagyságrenddel is csökkentheti a szükséges végleges tárolókapacitást. Szükség lenne a passzív hőelvonás alkalmazhatóságának és gazdaságosságának tanulmányozására a hasadványok tárolása esetén. Újabb tanulmányokra van szükség a sóolvadékos technológia fosszilis tüzelőanyagokkal szembeni versenyképességének igazolására. Ezen programok megvalósításhoz kevesebb, mint 1 milliárd dollárba lenne szükség, valamint előre láthatólag évi 100 millió dollár működési költségre. Ezáltal egy nagyon nagy léptékű stratégia hozható létre az atomenergia alkalmazására a fejlődő országok bevonásával, még a következő évtizedben.

Irodalom

1. H. G. MacPherson: The Molten Salt Reactor Adventure. *Nucl. Sci. Eng.* 90(1985) 374.
2. P. N. Haubenreich, J. R. Engel: Experience with the Molten-Salt Reactor Experiment. *Nucl. Appl. Technol.* 8(1970) 118.
3. M. Perry: Molten-Salt Converter Reactors. *Ann. Nucl. Energy* 2(1975) 809.
4. J. R. Engel, H. F. Bauman, J. F. Dearing, W. R. Grimes, E. H. McCoy, W. A. Rhoades: Conceptual Design Characteristics of a Denatured Molten-Salt Reactor with Once-Through Fueling. ORNL/TM-7207, Oak Ridge National Laboratory (July 1980).
5. C. W. Forsberg, P. F. Peterson, P. S. Pickard: Molten-Salt-Cooled Advanced High-Temperature Reactor for Production of Hydrogen and Electricity. *Nucl. Technol.* 144(2003) 289.
6. P. F. Peterson: Multiple-Reheat Brayton Cycles for Nuclear Power Conversion with Molten Coolants. *Nucl. Technol.* 144(2003) 279.
7. K. Furukawa, K. Mitachi, Y. Kato: Small MSR with a Rational Th Fuel Cycle. *Nucl. Eng. Des.* 136(1992) 157.
8. F. C. Finlayson, W. A. Krammer, J. Benveniste: Evaluation of the Feasibility, Economic Impact, and Effectiveness of Underground Nuclear Power Plants. ATR-78 (7652-14)-1, The Aerospace Corporation, Energy and Transportation Division, Aerospace (May 1978).
9. R. C. Robertson et al.: Conceptual Design Study of a Single-Fluid Molten-Salt Breeder Reactor. ORNL-454, Oak Ridge National Laboratory (1971).
10. S. M. McDevitt, Argonne National Laboratory, Private Communications (2002).
11. D. Lexa: Preparation and Physical Characteristics of a Lithium-Beryllium Substituted Fluorapatite. *Metall. Mat. Trans. A* 30A(1999) 147.
12. R. W. Moir: Cost of Electricity from Molten Salt Reactors. *Nucl. Technol.* 138(2002) 93.

GAMMAKITÖRÉSEK

A gammakitörések felfedezése

1963-ban a Szovjetunió, az Amerikai Egyesült Államok és Nagy-Britannia képviselői Moszkvában aláírták a Nemzetközi Atomcsend Egyezményt¹ (Nuclear Test Ban Treaty), amely megtiltja a nukleáris robbantási kísérleteket a légkörben, a világűrben és a víz alatt.² Ezen egyezmény ellenőrzését az Egyesült Államok a Vela műholdakkal végezte.

A programot 1959-ben indították el, viszonylag csekély költségvetéssel. A hat Vela Hotel műhold űrbéli robbantások után kutatott, míg az Advanced Vela a földi robbantások megfigyelését is végezte. A légköri atom- vagy hidrogénbomba-robbanás a másodperc töredékéig tartó villanást hoz létre a gammasugárzás tartományában. A műholdak milliszekundumos felbontásban figyelték a jelenségeket, így több műhold együttes megfigyelése esetén a forrás térbeli helyzete egyszerű háromszögeléses módszerrel meghatározható volt. Nukleáris bomba robbanását a röntgensugárzás jelzi, amelyet a gamma- és neutrondetektorok megfigyelése erősített volna meg. A Hold túloldalán való robbantást például közvetlenül nem észlelték volna a Vela műholdak, de a robbanás által hirtelen felvert radioaktív port az aktivált atommagok gamma-sugárzását megfigyelve tudták volna azonosítani.

Roy Klebesadel, a Los Alamos Scientific Laboratory munkatársa (aki a Vela műholdak építésében is részt vett) elemezte a megfigyelt adatokat. Kiválogatta azokat a megfigyelési eredményeket, amelyek biztosan nem nukleáris robbanást jeleztek. 1972-ben I. Strong, Klebesadel és R. Olsen értékelte ki ezeket az adato-

Balázs Lajos, MTA KTM Csillagászati Kutatóintézete
Horváth István, Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem
Kelemen János, MTA KTM Csillagászati Kutatóintézete

kat. Összesen 16 olyan eseményt találtak, amelyek bizonyosan nem földi, szoláris vagy lunáris eredetűek voltak. Ebből az eredményből született meg az első gammakitörés-észlelés.

A kitörések „fénygörbéi”

Amíg a csillagászatban előforduló legtöbb, időszakosan felvillanó forrásnak jellegzetes a fénygörbéje (a tipikusan gyors fényességnövekedést fokozatos halványulás követi, mint például a növőknál és szupernövőknál), a gammakitöréseknél ez igen különböző. Nincs két olyan kitörés, amelynek fénygörbéje hasonlítana egymásra. Ellenkezőleg, csaknem összes megfigyelhető tulajdonságukban különböznek: a megfigyelhető emisszió időtartama milliszekundumtól néhány percre is eltarthat, lehet egyetlen, vagy akár több intenzitáscsúcs is, a csúcsok lehetnek szimmetrikusak, vagy gyors fényességnövekedést lassú csökkenés követhet. Néhány kitörést egy gyenge, rövid intenzitásnövekedés, az úgynevezett előfutár esemény előz meg, amelyet (néhány másodperc, esetleg perc múlva) egy sokkal erősebb követ. Egyes kitörések fénygörbéje rendkívül kaotikus, minden felismerhető szerkezetet nélkülöz.

Jóllehet néhány fénygörbét megfelelően választott, egyszerű modellel reprodukálni lehet, eddig nem tudták megmagyarázni, hogy miért van ekkora különbség az egyes görbék között (I. ábra). Napjainkig sok osztályozási rendszert javasoltak, de ezek gyakran pusztán a fénygörbék megfigyelhető tulajdonságain alapultak, és nem mindig vették tekintetbe a kitöréseket létrehozó objektumok közötti fizikai különbségeket. A kitörések megfigyelhető időtartamának eloszlása jellegzetesen „kétpúpú”, ami azt sugallja, hogy alapvetően két csoport létezik: a „rövid” kitöréseké, amelyek átlagos időtartama 0,3 s, illetve a „hosszúaké”, amelynél a kitörés átlagos időtartama 30 s. Mindkét csoportban az időtar-

A cikk elkészítését az OTKA K077795 téma támogatta.

¹ Az egyezményről: http://en.wikipedia.org/wiki/Comprehensive_Nuclear-Test-Ban_Treaty

² A teljes szöveg: <http://www.ctbto.org/fileadmin/content/treaty/treatytext.tt.html>

tam eloszlása igen tág határok közötti és jelentős átfedés van közöttük. Így, pusztán az időtartam alapján nehéz megmondani hogy egy kitörés melyik csoportba tartozik. Mind elméleti, mind megfigyelési alapon ezen a kétfokozatú rendszeren túlmenően további osztályok bevezetését is javasolták.

A kitörések általános jellemzői

Az 1980-as évek végéig közel 500 gammafelvillanást észleltek a műholdak. A felvillanások eredete azonban tisztázásra várt. Nem volt egy azonosított forrás sem (kivéve a lágygamma-ismétlőket – lásd később), de még azt sem tudtuk, milyen messze lehetnek a források. Ezért az sem volt ismert, hogy egy forrás energiaszabadoitása mekkora, ugyanis a mért gammasugárzást okozhatta egy közeli – abszolút értelemben gyenge – forrás, de egy távoli, sokkal erősebb forrás is.

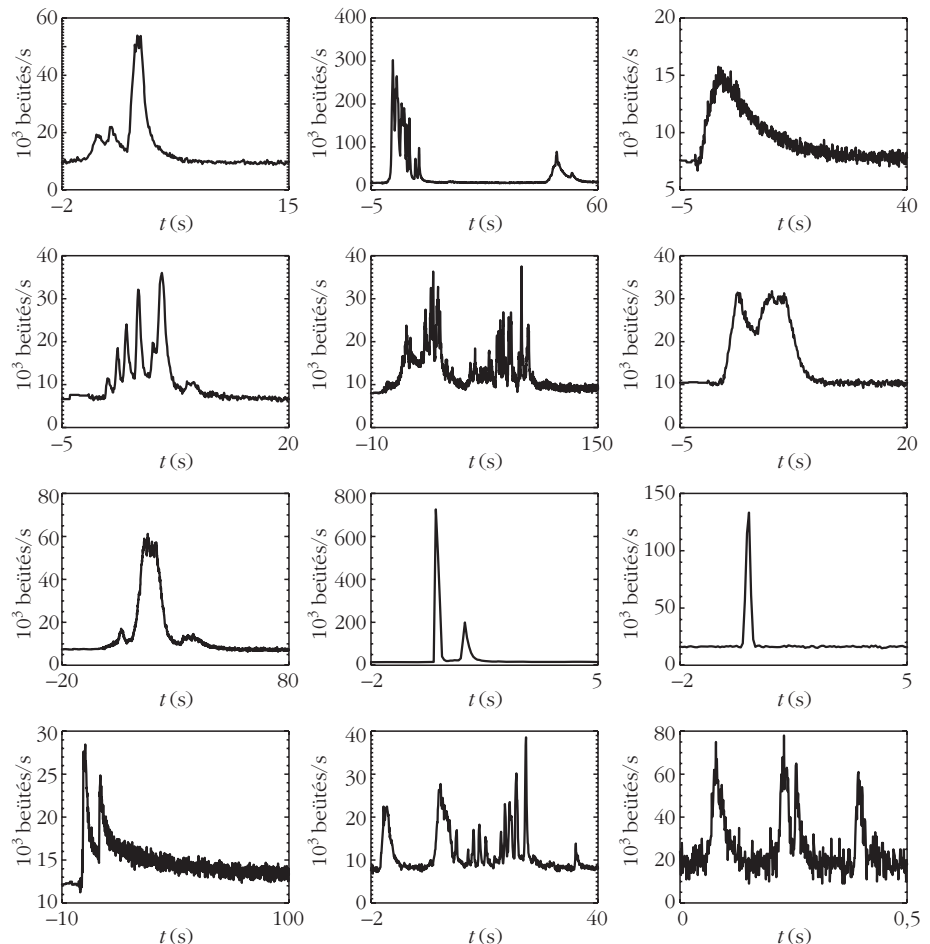
A NASA négy nagy megfigyelő műholdja közül a Compton Gammasugár Obszervatóriumot (CGRO) 1991. április 5-én bocsátották fel a gammatartomány megfigyelésére. A műhold 2000 júniusáig működött. 2000. június 4-én a NASA döntése után visszairányították a Földre. Részen elégett a légkörben, és maradványai a Csendes-óceánba hullottak.

A műhold fedélzetén négy műszer működött:

- Burst And Transient Source Experiment (BATSE),
- Oriented Scintillation Spectrometer Experiment (OSSE),
- Imaging Compton Telescope (COMPTEL),
- Energetic Gamma Ray Experiment Telescope (EGRET).

Ezek közül a legtöbb forrást (2704 kitörést) a BATSE észlelte (lásd később az 5. ábrát). A gammakitörések kutatásában a CGRO áttörést hozott, de a forrásokat nem lehetett ismert asztrofizikai objektumokkal azonosítani, mivel az űrszonda a beérkező sugárzás irányát csak nagyon pontatlanul tudta meghatározni.

1997-ben a holland–olasz Beppo-SAX műholdnak sikerült elsőként a gammakitöréseket kísérő röntgensugárzás irányát néhány ívperc pontossággal meghatározni, az első esetben 8 órával a kitörés után. Már az első három azonosított forrás is nagyon messze volt Földünkől (a vöröseltolódásuk $0,5 < z < 1$ közé esett). A negyedik azonosított forrás már túl volt az ismert Világegyetem felén ($z = 3,42$).



1. ábra. Néhány kitörés „gammafénygörbéje”.

A távoli eredet miatt le kellett vonni a következtetést, miszerint a gammakitöréseket kiváltó folyamatban sokkal rövidebb idő alatt sokkal nagyobb energia szabadul fel, mint amekkorát bármely eddig ismert folyamat megenged. Ha az energiakibocsátást izotroponak feltételezzük, a felszabadult energia nagyjából azzal egyenértékű, mintha a Nap tömegének jelentős része néhány másodperc alatt szétsugárzódná (körülbelül 10^{44} – 10^{47} joule). Az energia ilyen mértékű felszabadulására a gammasugárforrások alaptípusaira két általánosan elfogadott elmélet létezik.

A „hosszú” gammakitörések

A hosszabb ideig tartó, de lágyabb, azaz az energia nagy részét inkább kisebb energiájú fotonokban kisugárzó kitöréseket a *hipernóva* jelenségével magyarázzák. Miután egy legalább 40 naptömegű csillag elégeti nukleáris fűtőanyagát, fekete lyukká roskad össze. Ha a csillag tengely körüli forgása gyors, a magjába bezuhánó anyag egy gyorsan forgó, akkréciós korongba sűrűsödik össze. Ekkor a csillaganyag jelentős része a forgási síkban, spirális pályán száguld a középpont felé, ami a hatalmas gravitációs erő következtében egyfajta „generátorként” működik: vagyis sugárzó energiává alakítja az akkréciós korong anyagának egy

Ilyen módon a csillagászoknak sikerült egy viszonylag közeli („mindössze” 2 milliárd fényév távolságú) gammakitörés utófényét megfigyelni, amelyek igen hasonló volt egy szupernóváéhoz.

Nem tudjuk, hogy minden hipernóva gammakitöréshez vezet-e. Mindenesetre a csillagászok úgy gondolják, hogy minden 100 000 szupernóvára jut egy hipernóva. Ez napi egy kitörést jelent, ami nagyjából annyi, amennyit megfigyelnek.

Csaknem bizonyos, hogy a csillag magja, amely egy hipernóva közepén van, elegendően nagy tömegű ahhoz, hogy fekete lyukká roskadjon össze (sokkal inkább, mint neutroncsillaggá). Így minden megfigyelt gammakitörés egy újszülött fekete lyuk első „sírása”.

A rövid gammakitörések

A csillagászok úgy vélik, hogy értik, mi indítja el a gammakitöréseket a kollapszár/hipernóva modellben, de tisztában vannak azzal is, hogy vannak még megoldatlan problémák. Például ez a modell csak hosszú időtartamú gammakitörésekre működik – olyanokra, amelyek hosszabbak 2 másodpercnél, és átlagosan 30 másodpercig tartanak –, valamint jól meghatározott kitörést jól meghatározott kisebb energiájú utófény követ. A rövid időtartamú gammakitörések néhány ezred másodperctől – definíció szerint – 2 másodpercig tartanak, átlagos hosszuk 0,3 másodperc. A rövid kitörések lényegesen halványabbak a hosszúaknál, nagyjából egy 10-es faktoral. Ezen túlmenően, a rövid kitörések relatíve több nagyobb energiájú gamma-sugarat bocsátanak ki, mint a hosszúak. Végül, arra is utalnak jelek, hogy a hosszú kitörések esetén az energia átalakítása gammasugárzásra állandó ütemben történik, míg a rövidke esetén ez a hatékonyság a kitörés folyamán csökken.

2003-ban a High Energy Transient Explorer 2 mesterséges hold (HETE-2) szolgáltatta az első bizonyítékokat a rövid gammakitörések utófényének létezésére, ezzel kiemelte ezt a gammakitörés-fajtát a „sötét” kategóriából – vagyis azok közül, amelyeknek nincs optikailag is megfigyelhető utófényük. Az utófény azonban, amelyik ezeket a kezdeti eredményeket adta, túlságosan rövid volt ahhoz, hogy meg lehessen határozni a kitörés távolságát. Ezen túlmenően a rövid kitörések tulajdonságai arra utaltak, hogy létrejöttük alapvetően más fizikai folyamatok eredménye, esetleg két neutroncsillag, két fekete lyuk, vagy egy neutroncsillag és egy fekete lyuk összeolvadásából jönnek létre.

Egyes gammakitörések energiája kicsi, ezért inkább a röntgenkitörések – X-ray flashes, XRF – csoportjához soroljuk őket. A BATSE műszer még nem „látta” ezeket a kitöréseket.

A csillagászok többnyire egyetértenek abban, hogy a rövid kitörések nem kapcsolódnak szupernóvához, vagyis rájuk nem illik a kollapszár/hipernóva modell. A megfigyelt jellemzőik alapján valamilyen más jelenségre gondolnak, kisméretű, nagy tö-

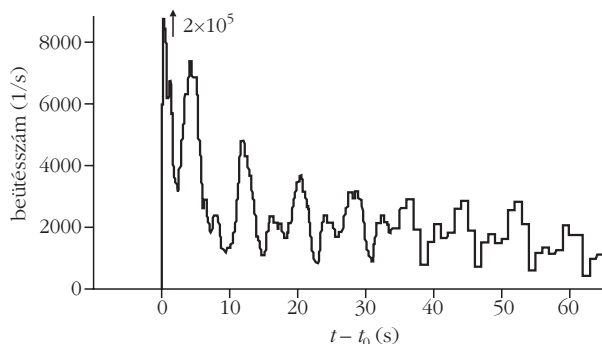
megű objektumok, például neutroncsillagok összeolvadására, de más lehetőségek is szóba jöhetnek. Ezek közé tartozik egy életpályáját befejező csillag magjának összeroskadása, amely azt jelentené, hogy a rövid kitörésekre is tulajdonképpen a kollapszár/hipernóva modell vonatkozik. Esetleg az is lehet, hogy a gammakitöréseknek ez a fajtája csupán geometriai effektus miatt alakul ki. Minthogy a gammakitörés egy tengely mentén jön létre, szemben a szferikus táguló burokkal, a kisebb megfigyelhető energia és az utófény hiánya megfigyelési „kiválasztási effektus” is lehet. Vagyis ilyenkor a Föld a gammakitörés kúpjának szélén van, és így az észlelő csak gyenge kitörést detektál. Ilyen módon a rövid gammakitörések és a kisebb energiájú röntgenmegfelelőik (a röntgenkitörések = XRF) mindketten „valójában” rendes, hosszú kitörések, amelyeket súroló beesési szögben csak rövid ideig látunk. (A gamma- és a röntgenkitörések szétválasztása attól függ, hol húzzuk meg a választóvonalat a röntgen- és a gammasugárzás között, ami bizonyos mértékig önkényes, mivel a keményröntgensugarakat gyakran lágygammasugaraknak is nevezik.)

További megfigyelési munka, különösen az utófények részletes vizsgálata teszi majd lehetővé, hogy a csillagászok meghatározzák, milyen messze vannak a rövid gammakitörések. Csak a távolság ismeretében tudunk tiszta képet alkotni ezekről a robbanásokról, amelyek a 13,7 milliárd évvel ezelőtt történt ősrobbanás óta a legnagyobbak.

Lágygamma-ismétlők

Az első lágygamma-ismétlőket (soft gamma repeater, SGR) 1979-ben fedezték fel (4. ábra), mégpedig a máig ismert hat SGR-ből hármat. Januárban a Sagittarius csillagképben találták meg az első ismétlő gammaforrást, majd márciusban egy nem mindennapi esemény történt. A Helios-2 és a Pioneer Venus Orbiter detektorai szaturálódtak (a maximálisan megfigyelhető beütésszámot mérték). A jel intenzitása százszorosan meghaladta az addig megfigyelt legerősebb, Naprendszeren kívüli gammaforrás erősségét. A forrás a Nagy Magellán-felhő egyik szupernóva-maradványa volt.

4. ábra. Az egyik 1979-es SGR-esemény „fénygörbéje”.



Néhány nap múlva egy újabb forrást fedeztek fel,⁴ amely a gammasugár-tartományban három nap alatt háromszor is felfénylett. Mivel az addig megfigyelt több száz gammakitörés között egyszer sem sikerült ismétlést kimutatni, ezek a jelenségek egy új típusú objektumra utaltak. A felfedezett három forrás legintenzívebben a lágygamma-mában és a röntgentartományban sugárzott, tehát a sugárzás energiaeloszlásában is megkülönböztethető módon jelentkezett.

1998-ban bebizonyították, hogy az úgynevezett magnetárok (rendkívül erős mágneses terű neutron-csillagok) és a lágy ismétlők között kapcsolat áll fenn. A források a „lecsengő” fázisban pulzációt mutathatnak. A lágygamma-ismétlőket tipikusan nagyon rövid kitörések jellemzik.

A gammakitörések eloszlása az égbolton

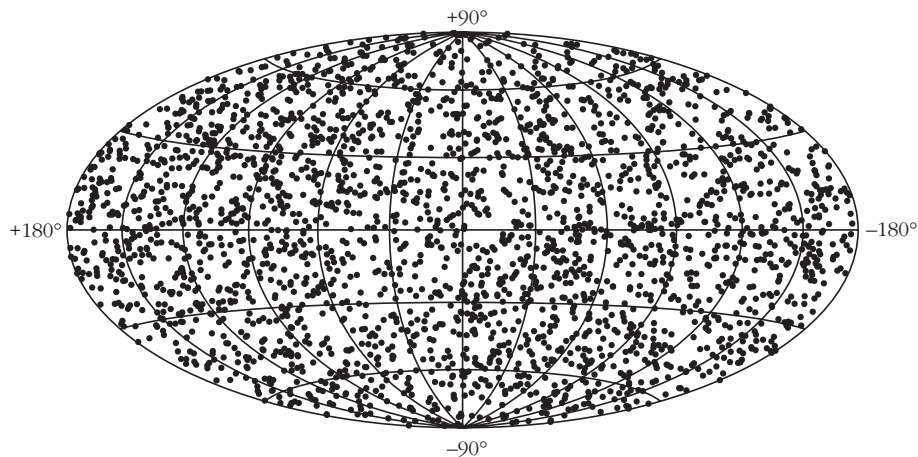
A megfigyelések szerint a kitörések többé-kevésbé egyenletesen népesítik be az eget (5. ábra). Ha a források a Galaxis csillagaival lennének kapcsolatban, akkor a helyük az égre vetítve a galaktikus fősíkot követné.

Az optikai utófények segítségével kapott vöröseltolódások megmutatták, hogy a hosszú kitörések a kozmosz legtávolabbi ismert objektumaihoz kapcsolódnak. A rövidekre kapott vöröseltolódás-értékek szerint távolságuk a hosszúakénál ugyan kisebb, de még így is kozmológiai léptékű. A gammakitörések így a Világegyetem anyagának nagyskálájú vizsgálatára is alkalmasak.

Magyar kutatók eredményei⁵ is igazolják, hogy a hosszú kitörések véletlenszerűen népesítik be az eget. Ezzel szemben a rövidek eloszlása nem teljesen véletlenszerű.

A gammakitöréseket követő röntgen-, illetve optikai utófény

A kitörésekben keletkező nagy energiájú gammasugárzás az energiefelszabadulás során bekövetkező részecskefizikai folyamatok eredménye. A kirobbanó, relativisztikusan mozgó anyagnyaláb és környező anyag kölcsönhatása során jön létre a robbanást kö-



5. ábra. A CGRO BATSE műszere által detektált 2704 kitörés eloszlása az égbolton.

vető, kisebb energiájú röntgen-, UV- és optikai sugárzás, a GRB utófénylése (2. ábra). A jet energiája ilyenkor egy vagy több lökeshullámfrontban lép kölcsönhatásba a környező közeggel.

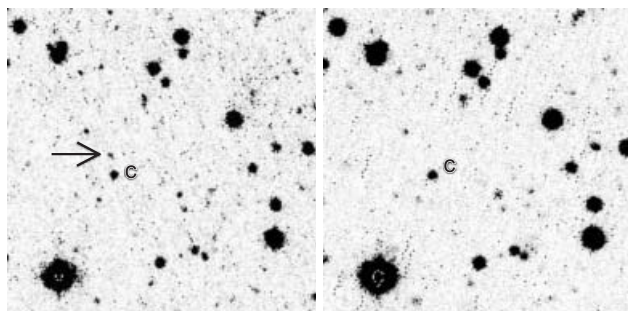
A gammakitörések kutatásában fontos áttörést jelentett, amikor 1997 februárjában a BeppoSAX mesterséges hold röntgenkamerájával sikerült megfigyelni a gammasugár-kitörést követő, halványuló röntgen-utófénylést. A későbbi megfigyelések arra is fényt derítettek, hogy az intenzitáscsökkenés megfigyelt módja nem egyeztethető össze egy szferikusan robbanó tűzgömb elképzeléssel, hanem igazolták a keskeny, relativisztikus sebességű sugárnyaláb létezését.

A korábbi BATSE-adatok tanulmányozása már az 1990-es években elkezdődött a Csillagászati Kutatóintézetben, és az elsők között kapcsolódtunk be a GRB utófénylések keresésébe is (6. ábra).

A GRB070508 gamma-, röntgen- és optikai megfigyelései lehetővé tették, hogy a kibocsátó forrás távolságát meghatározzuk. A folyamatos fénycsökkenés után talált, tovább nem halványuló objektum egy távoli ($z = 0,835$) galaxisnak bizonyult, vagyis a GRB fizikai kapcsolatban volt ezzel a kozmológiai távolságban levő extragalaxissal.

A GRB utófénylések megfigyelt száma akkor növekedett meg ugrásszerűen, amikor felbocsátották a NASA Swift mesterséges holdját. A Swift 2004. novem-

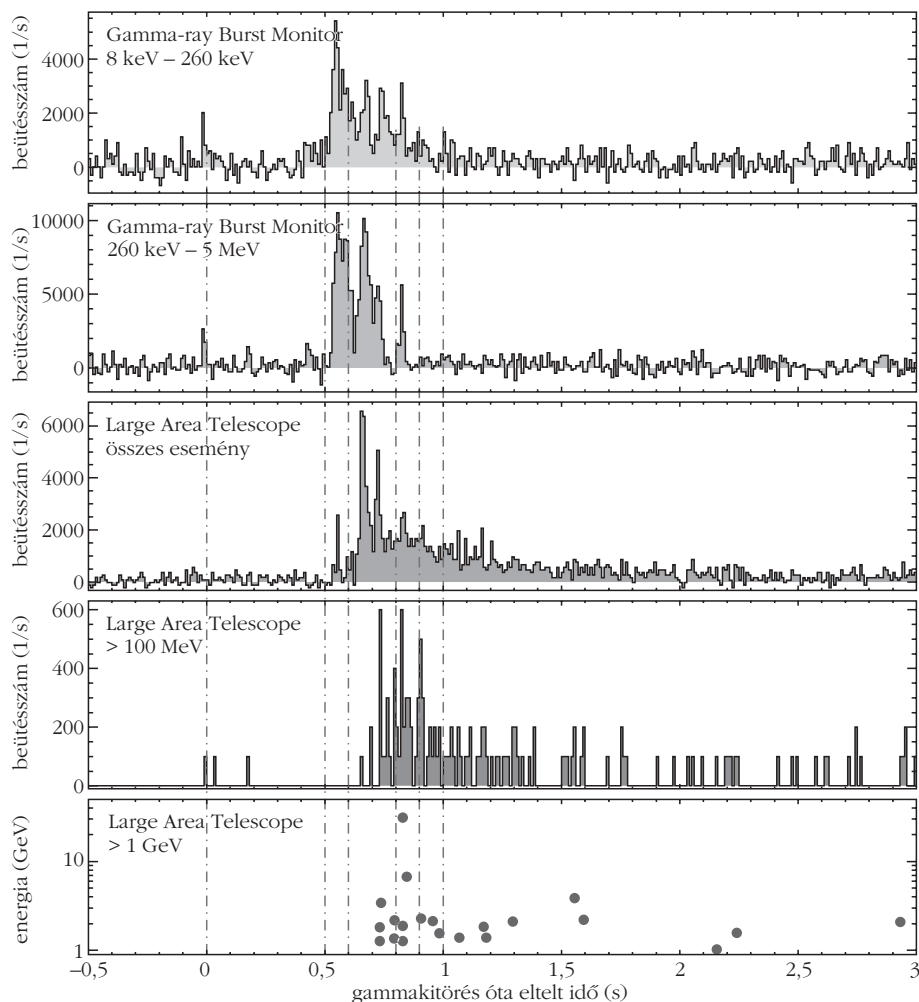
6. ábra. Gammakitörés optikai tranziensének első hazai megfigyelése.⁶ A bal oldali kép 1997. május 15-én készült, a jobb oldali 1997. június 1-jén. A későbbi képen nyoma sincs a bal oldalon nyílal jelzett optikai tranziens forrásnak. (A c jelű objektum az összehasonlító csillag.)



⁴ <http://solomon.as.utexas.edu/~duncan/magnetar.html#Discovery>

⁵ Vavrek, R., Balázs, L. G., Mészáros, A., Horváth, I., Bagoly, Z.: Testing the randomness in the sky-distribution of gamma-ray bursts. *MNRAS* 391 (2008) 1741.

⁶ Kelemen, J.: Observation of the optical counterpart of the GRB970508 source. *Information Bulletin on Variable Stars* (1997) 4496.



7. ábra. A GRB090510 kitörés fénygörbéje különböző energiasávokban a Fermi űrtávcső mérései alapján. A nagy energiájú fotonok láthatóan bizonyos időközökkel érkeznek.

lyán kering. Főműszere a nagylátószögű távcső (Large Area Telescope – LAT), amely lehetővé teszi az egész égboltra kiterjedő, átfogó kozmológiai, illetve asztrofizikai vizsgálatokat. Az észlelt objektumok között találhatók többek között aktív galaxismagok, pulzárak, illetve más nagy energiájú források, továbbá a sötét anyag. A Fermi másik fontos észlelőműszere a gammakitörés-monitor (Gamma-ray Burst Monitor – GBM).

Az FGST-t 2008. június 11-én indították útjára. Az űrmisszió a NASA, a US Department of Energy, valamint a francia, német, olasz, japán és svéd kormányzati űrgyőzőségek közös vállalkozása.

Az FGST-vel végzett egyik legérdekesebb kísérlet a Lorentz-invariancia érvényességének ellenőrzése volt. Bizonyos kvantumgravitációs elméletek szerint a Lorentz-invariancia sérülhet, és azt jósolják, hogy a fotonok sebessége függ az energiájuktól. E függés következtében két különböző energiájú foton, amely egyébként egyszerre indult el egy távoli asztrofizikai forrásból, nem

ugyanabban az időben érkezik a Földre. Az effektus nagysága függ az úgynevezett kvantumgravitációs tömegtől (quantum-gravity mass – M_{QG}), attól a paramétertől, amely meghatározza azt az energiatartományt, amelyben a kvantumgravitációs effektusok a Lorentz-invariancia jelentős sérülését okozzák. Úgy gondolják, hogy nagysága a Planck-tömeg környékén van ($M_{\text{Planck}} \equiv \hbar c / \lambda_{\text{Planck}} \sim 10^{19} \text{ GeV}/c^2$) és nagyon valószínű, hogy annál kisebb.

Az ilyen teleszkópokra jó példa a Mount Palomar Observatóriumban automatizált 1,5 méter tükörátmérőjű teleszkóp, amely a GRB helyén R és I sávban akár 22-23 magnitúdós határfényességig képes követni a halványodó optikai utófénylést. A halvány objektumok és a GRB-re jellemző nagy vöröseltolódás esetén a többszín-fotometria is felhasználható a z közelítő meghatározására vagy korlát megadására.

Nemzetközi együttműködés keretében az MTA Csillagászati Kutatóintézete részt vesz a gammakitörések P60 teleszkóppal megfigyelt optikai utófényének fotometriai feldolgozásában.

Fermi műhold – Sérül a Lorentz invariancia?

A Fermi Gamma Űrteleszkóp (Fermi Gamma-ray Space Telescope – FGST) – légkörön kívüli gammaészlelések-re létrehozott obszervatórium – a Földhöz közeli pá-

tyanabban az időben érkezik a Földre. Az effektus nagysága függ az úgynevezett kvantumgravitációs tömegtől (quantum-gravity mass – M_{QG}), attól a paramétertől, amely meghatározza azt az energiatartományt, amelyben a kvantumgravitációs effektusok a Lorentz-invariancia jelentős sérülését okozzák. Úgy gondolják, hogy nagysága a Planck-tömeg környékén van ($M_{\text{Planck}} \equiv \hbar c / \lambda_{\text{Planck}} \sim 10^{19} \text{ GeV}/c^2$) és nagyon valószínű, hogy annál kisebb.

A fény sebességének akár a legkisebb energiafüggése is kimutatható kozmológiai távolságokon, ahol a hatás az út során összegződik, és például a gammakitörések fénygörbéjében megfelelő időfelbontás esetén mérhetővé válhat. A LAT- és GBM-műszerekkel észlelt GRB090510 jelű kitörés segítségével az eddigiekénél sokkal pontosabb korlátot sikerült adni a fénysebesség fotonenergiától való függésére.

A GRB090510, illetve GRB080916c jelű kitörésekről a GBM, valamint LAT műszerekkel kapott szélessávú (8 keV-től 300 GeV-ig) mérések (7. ábra) segítségével alsó korlátot kaptak M_{QG} értékére, amely nagyobb-nak adódott, mint a Planck-tömeg. A Planck-tömegnél nagyobb M_{QG} érték segítségével ki lehetett zárni az ennél kisebb értéket jósoló elméleteket.

A gammakitörések gyakorisága és hatása a földi életre

Jelenleg a Föld körül keringő mesterséges holdak naponta átlagosan egy gammakitörést észlelnek. Mint-hogy a gammakitörések akkora távolságról látszanak, amely felőleli csaknem az egész megfigyelhető Világegyetemet, egy akkora térfogatot, amely több milliárd galaxist tartalmaz, arra kell következtetnünk, hogy az ilyen kitörések rendkívül ritkák egy-egy galaxisban. A tényleges gyakoriság meghatározása nehéz, de egy Tejútrendszerhez hasonló csillagrendszerben ilyen kitörés (hosszú gammakitörésekre gondolva) 100 000–1 000 000 évente egyszer fordul elő. Ezeknek csak néhány százaléka lövell ki nyalábot a Föld felé. A rövid kitörések gyakoriságának becslése még ennél is sokkal bizonytalanabb, minthogy a gammasugarakat kibocsátó nyaláb nyílásszöge nem ismert, de gyakoriságuk valószínűleg a hosszúakéhoz hasonló.

Egy gammakitörés a Tejútrendszerben, a Földhöz elegendően közel és felénk irányuló nyalábbal igen komoly hatást gyakorolna a bioszférára. A sugárzás elnyelése a légkörben a nitrogén fotodisszociációját

okozná nitrogénoxidot létrehozva, amely katalizátor-ként szolgál az ózon lebontásához. Egy 2004-ben készült tanulmány szerint egy 1 kiloparszek távolságban bekövetkező gammakitörés a Föld ózonpajzsának felét szétrombolná, a kitörésből származó közvetlen UV-sugárzás a Napéval együtt áthatolna az elvékonyodott ózonrétegen, és tömeges kihalást elindítva minden bizonnyal komolyan befolyásolná a táplálékláncot. Egyes becslések szerint ilyen kitörés milliárd évenként egyszer fordul elő, és van, aki szerint a földtörténeti ordovicium–szilur korok határán bekövetkezett kihalás ilyen kitörés eredménye lehetett.

Vannak arra utaló jelek, hogy a hosszú kitörések többnyire, esetleg kizárólag alacsony fémtartalmú régiókban történnek. Minthogy a Tejútrendszer fémekben gazdag a Föld kialakulása óta, ez a tény csökkenti, vagy teljesen kizárja annak lehetőségét, hogy az elmúlt milliárd éven belül gammakitörés jött volna létre a Tejútrendszerben. A rövid kitöréseknél nincs tudomásunk ilyen elemgyakorisági korlátról. Ennélfogva a lokális keletkezési gyakoriságtól, illetve a kitörés nyalábjának kúpszögétől függően nem lehet kizárni lehetőséget, hogy egy közeli kitörés jelentős hatást gyakorolt a Földre.

FIZIKAI NOBEL-DÍJ 2011: SZUPERNOVÁK ÉS A GYORSULVA TÁGULÓ UNIVERZUM

Szalai Tamás

SZTE Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék, Szeged

A fizikai Nobel-díjat mintegy 115 éves történelme során több alkalommal osztották ki olyan kutatási eredményekért, amelyek kisebb-nagyobb részben a csillagászathoz kötődnek. Ha szigorúan vesszük, akkor a tavalyi évvel bezárólag „csak” *Hans Bethe* (1967, a magreakciók és a csillagok energiatermelésének leírásáért), *Hannes Alfvén* (1970, a magneto-hidrodinamikában és a plazmafizikában végzett úttörő munkáért), *Sir Martin Ryle* és *Antony Hewish* rádiócsillagászok (1974, előbbi az apertúraszintézis kifejlesztéséért, utóbbi a pulzárrok felfedezéséért), *Arno Penzias* és *Robert Wilson* (1978, a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás kimutatásáért), *Subrahmanyan Chandrasekhar* és *William Fowler* (1983, előbbi a csillagfejlődéssel, utóbbi az Univerzum kémiai evolúciójával kapcsolatos vizsgálatokért), *Russell Hulse* és *Joseph Taylor* (1993, a gravitációs hullámok közvetett detektálásáért a PSR 1913+16 jelű pulzár perióduscsökkenésének kimutatása révén), *Raymond Davis*, *Masatoshi Koshiba* és *Riccardo Giacconi* (2002, előbbi kettő a neutrínó-, utóbbi a röntgenszállagászat létrejöttében játszott szerepéért), valamint *John Mather* és *George Smoot* (2006, a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás feketest-jellegének és anizotrópiájának kimutatásáért) díja tartozik ebbe a körbe. Ugyanakkor megemlíthetnénk a kozmikus részecskesugárzás felfe-

dezéséért és az ezzel kapcsolatos részecskefizikai eredményekért osztott Nobel-díjakat, vagy az általános relativitáselmélet csillagászati megerősítéseit, az 1919-es teljes napfogyatkozás során kimutatott fényelhajlástól kezdve a legújabb, úrszondás mérésekig (bár *Einstein* hivatalosan a fotoelektromos effektus kimutatásáért kapta Nobel-díját, a méltatás jelentős része a relativitáselmületről szól) [1, 2].

Az utóbbi két-három évtizedben az asztrofizikai és kozmológiai kutatások minden eddiginél eredményesebben folynak, köszönhetően elsősorban a megfigyelési technológiák (CCD-detektorok, űrtávcsövek, adaptív optikás földi nagyávcsövek, interferometrikus rendszerek, spektrográfok) töretlen fejlődésének, valamint az adatfeldolgozáshoz és modellszámításokhoz szükséges informatikai kapacitás folyamatos bővülésének.

Részben emiatt, részben az általános érdeklődést kiváltó téma okán a 2011-es fizikai Nobel-díj egyik felét *Saul Perlmutter* (Lawrence Berkeley National Laboratory / University of California Berkeley), másik felét megosztva *Brian P. Schmidt* (Australian National University) és *Adam G. Riess* (Johns Hopkins University / Space Telescope Science Institute, Baltimore) kapta „az Univerzum gyorsuló tágulásának távoli szupernóvák vizsgálata révén történő felfedezéséért” (1. ábra).

Az Univerzum tágulása

Az Univerzum tágulására vonatkozó vizsgálatok az 1910–1920-as évek fordulóján kezdődtek. Ekkorra az általános relativitáselméletet már szélesebb szakmai körben kezdték alkalmazni, s az Einstein által felírt egyenletek megoldásai – ahogyan arra elsőként *Alekszandr Fridman* rámutatott – egy nem statikus Univerzumra utaltak. Maga Einstein nem fogadta el ezt a nézetet, és bevezette egyenleteibe az általa csak *kozmológiai állandónak* elnevezett Λ paramétert, amelynek révén az állandó méretű Univerzum képe továbbra is fenntartható volt. Az évtized végére azonban *Edwin Hubble* a galaxisok távolsága és távolodási sebességeik között fennálló arányosság kimutatásával bizonyította a Világegyetem tágulását, Einstein pedig kénytelen volt visszakozni a kozmológiai állandó létét illetően (sőt, élete legnagyobb tévedésének nevezte azt). A táguló Univerzum története visszafelé lejátszásának gondolata vezetett el az *ősrobbanás-elmélet*hez (Fridman, *Georges Lemaître*, *George Gamow*), amely ugyan egy-két évtizedig csak egy volt a lehetséges alternatívák közül, de a hetvenes évekre – a Gamow, *Ralph Alpher* és *Robert Hermann* által megjósolt mikrohullámú kozmikus háttérsugárzás kimutatása következtében – általánosan elfogadottá vált.

Bár az ősrobbanás-elmélet, illetve az erre épülő *standard kozmológiai modell* számos megfigyelési tényrt jól magyarázott, már kezdetben felmerült néhány kérdés, amelyeket az említett elmélet keretein belül nem lehetett megfelelő módon kezelni [3–6]. Az ellentmondások feloldását nagyrészt a nyolcvanas évek elején megalkotott *inflációs elmélet* (*Alan Guth*, *Andrej Linde*) tette lehetővé, amely szerint az ősrobbanást követő, körülbelül 10^{-36} – 10^{-33} másodperc közötti időintervallumban az Univerzum hirtelen mintegy 50 nagyságrenddel nagyobb méretűre fúvódott fel. Az inflációs kozmológiai modell jelenleg a legjobb elméletrendszer a Világegyetem kialakulásának és megfigyelhető tulajdonságainak leírására, ugyanakkor ezen belül is sok kérdés vár még megválaszolásra [3–6].

Ezek közül az egyik legfontosabb az Univerzum időbeli fejlődésének pontos menete; továbbá – ezzel összefüggésben – az, hogy mi jelenleg a Világegyetem összetevőinek aránya, és ez hogyan változik az idő függvényében. Ennek leírásához célszerű először bevezetni a Világegyetem relatív tágulását jellemző *skálafaktor* fogalmát: segítségével egy együttmozgó koordináta-rendszerben $\mathbf{x}$ irányban, adott t időpontban a megfigyelőtől számított $\mathbf{r}(t)$ távolság $\mathbf{r}(t) = a(t)\mathbf{x}$ formában adható meg. Ezen távolságban lévő pont tágulás következtében fellépő sebessége pedig

$$v(t) = \dot{\mathbf{r}}(t) = \dot{a}(t) \mathbf{x} = \frac{\dot{a}(t)}{a(t)} a(t) \mathbf{x} = H \mathbf{r}(t),$$

ami pedig nem más, mint a Hubble-törvény (itt H a Hubble-állandót jelzi). Valójában H csak egy bizonyos távolságskálán tekinthető állandónak, általánosságban véve az a skálafaktortól, ezen keresztül pedig az időtől függ.



1. ábra. A 2011-es Fizikai Nobel-díj nyertesei: Saul Perlmutter (balra), valamint a díj másik felét megosztva elnyerő Adam G. Riess (középen) és Brian P. Schmidt (jobbra). A felvétel a trió által 2006-ban elnyert Shaw-díj átadó ünnepségén készült (Wikipedia).

Az Univerzum méretváltozásának időbeli leírására a Fridman-féle expanziós egyenlet szolgál; ezt jellemzően a különböző komponensek sűrűségeinek időfüggésével (pontosabban az időben változó skálafaktortól való függéssel) szokás felírni:

$$\frac{H^2(a)}{H_0^2} = \Omega_\Lambda + (1 - \Omega_m - \Omega_r - \Omega_\Lambda) a^{-2} + \Omega_m a^{-3} + \Omega_r a^{-4},$$

ahol H_0 a Hubble-állandó jelenlegi, $H(a)$ az a skálafaktornál vett értéke; az Ω paraméter pedig az egyes komponensek (Ω_m : anyag, Ω_r : sugárzás, Ω_Λ : kozmológiai állandó) sűrűségeinek az úgynevezett *kritikus sűrűséggel* osztott értékei (a kritikus sűrűség a *sík Világegyetem* jellemzője; ez a sűrűségérték választja el egymástól az örökké táguló, illetve az egy pontba összehúzó modelleket).

Sokáig két alapelv mentén próbálták összeegyeztetni a modelleket a megfigyelésekkel. A kozmológiai állandó járulékát nullának vették (jóval egyszerűbb modellekhez jutottak ezáltal, ráadásul jó ideig semmi nem is indokolta ennek megváltoztatását); ezenkívül a megfigyelések és az inflációs elmélet alapelvei azt sugallták, hogy az Univerzum görbülete közel nulla, azaz a Világegyetem jó közelítéssel *sík* ($\Omega_m + \Omega_r + \Omega_\Lambda \approx 1$). Azonban az anyagi (beleértve a barionos és a *sötét anyagot* is) és a sugárzási járulék összege a különböző felmérések alapján messze nem adja ki a kritikus sűrűséget – ez pedig meglehetősen éles ellentmondásnak bizonyult.

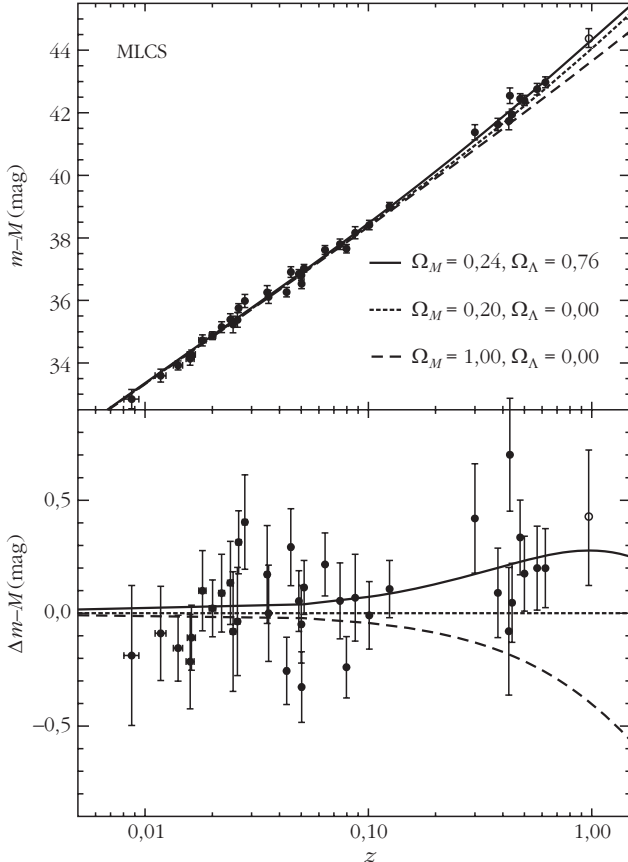
Szupernóvák és a gyorsuló tágulás

A nyolcvanas-kilencvenes évek fordulóján több program is indult annak érdekében, hogy sikerüljön pontosítani az egyes kozmológiai paraméterek értékeit, feloldva ezzel az említett ellentmondásokat. A Hubble-törvény értelmében a galaxisok távolsága és távolodási sebességeik között egyenes arányosság áll fenn. Ez az arányosság azonban a közeli galaxisok

esetében – azok pekuliáris mozgása miatt – általában sérül, így kozmológiai jellegű vizsgálatokra csak a távoli, nagy vöröseltolódású galaxisok alkalmasak. A távolodási sebességek jól mérhetőek a galaxisok színképvonalainak vöröseltolódása alapján, azonban a nagy távolságok mérése jóval összetettebb probléma. Ahhoz ugyanis, hogy a Hubble-törvénytől való esetleges eltéréseket ellenőrizni lehessen, attól független távolságmérési eljárás(ok)ra van szükség. Ez leginkább olyan objektumok vizsgálatával oldható meg, amelyek közeli és távoli galaxisokban egyaránt megtalálhatóak és azonosíthatóak, abszolút fényességük pedig mindig közel azonos vagy más, mérhető paraméterek függvényében jól kalibrálható.

Ezen kritériumoknak gyakorlatilag csak az Ia típusú szupernóvák felelnek meg [7]. Az általános fizikai kép szerint ezek olyan, kettős rendszerekben lévő fehér törpék termionukleáris robbanásai, amelyek társcsillaguktól folyamatosan anyagot szívnak el, míg végül átlépik a kritikus értéknek tekintett *Chandrasekhar-tömeget* (körülbelül 1,4 naptömeg). Ezeket a kozmikus robbanásokat – az említett, minden fehér törpére érvényesnek tekintett tömeghatár miatt – akkoriban *standard gyertyáknak* tekintették, amelyek a körülményektől függetlenül nagyjából mindig azonos

2. ábra. Közele és távolabbi Ia típusú szupernóvák távolságmodulusa a vöröseltolódás függvényében, az MLCS-módszerrel történt kalibrációs eljárás alapján számolva (felső diagram). Jól látszik, hogy a távolabbi objektumok esetében a nem nulla Ω_Λ értékkel számoló modell illeszkedik legjobban az adatokra. Az alsó diagramon a mért adatoknak a modellektől való eltérései láthatóak [8].



luminozitású fényforrásként jelennek meg, ráadásul extrém nagy fényteljesítményük révén távoli galaxisokban is van esély a detektálásukra.

A *Supernova Cosmology Project* 1988-ban Saul Perlmutter, míg a *High-z Supernova Search Team* 1994-ben Brian Schmidt vezetésével alakult meg; céljuk minél több és minél távolabbi Ia típusú szupernóva detektálása és fénygörbéik felvétele volt (Adam Riess az alapítás után nem sokkal csatlakozott a második csoporthoz, ahol vezető szerepet játszott a kutatásokban). A szakemberek azt várták a felmérésektől, hogy esetleg sikerül kimutatni az Univerzum kismértékű görbületét; emellett abban is reménykedtek, hogy a szupernóvák látszó fényességeinek távolság szerinti eloszlásából következtetni lehet a gravitáció tágulást fékező hatásának mértékére, a *lassulási paraméterre*. Az akkoriban általános nézőpont szerint ugyanis a Világegyetem tágulásának lassulnia kell, hiszen az egyedüli, ismert, kozmológiai skálakon jelentős kölcsönhatás, a gravitáció a tágulással ellentétes hatást fejt ki.

Az Ia típusú szupernóvákkal kapcsolatos távolságmérési módszerekről – ezen belül a szóban forgó két csoport munkásságáról – néhány évvel ezelőtt részletes összefoglaló cikk jelent meg a *Fizikai Szemlében* [7]; itt csak röviden elemezzük a két projekt eredményeit.

Az már a kilencvenes évek közepére kiderült, hogy a „standard gyertya elmélet” eredeti formájában biztosan nem helytálló: az első felmérő programokban vizsgált Ia típusú szupernóvák maximális abszolút fényességei a vártnál jóval nagyobb szórást mutattak. Az évek során sikerült néhány, empirikus jellegű kalibrációs eljárást kidolgozni, amelyek közül a több hullámhosszában (színből) felvett fénygörbealakokat összehasonlító, úgynevezett MLCS (Multi-Color Light Curve Shape) módszer tűnt a legmegbízhatóbbnak.

Több előzetes részeredmény után mindkét szupernóva-kutató csoport 1998-ban publikálta az első részletes összeállítást a felmérések első körének eredményeiből (Perlmutterék cikkének hivatalos megjelenése átcsúszott a következő évre) [8, 9]. Riessék 16 távoli és 34 közeli, míg Perlmutterék 42 távoli szupernóva részletes fotometriai és spektroszkópiai vizsgálatára építették analízisüket; a csillagrobbanások azonosítása elsősorban a Cerro Tololo Közép-Amerikai Observatórium (CTIO) 4 méteres távcsövével történt, míg a szupernóvák színképeinek felvételéhez mindkét csoport az akkoriban rendelkezésre álló legjobb berendezéseket (a 10 méteres Keck-távcsövekre, a 6 méteres Multi-Mirror Telescope-ra és az Európai Déli Observatórium 3,6 méteres, chilei távcsövére szerelt spektrográfokat) használta.

A két vizsgálat egymástól abszolút függetlenek volt tekinthető, ugyanakkor mindkét társaság ugyanarra a megdöbbentő következtetésre jutott: a lassulási paraméter értéke negatív, tehát az Univerzum tágulása jelenleg nem lassul, hanem gyorsul! Ehhez a konklúzióhoz a szupernóvák távolságmodulusának (a látszó és abszolút fényességek különbsége) a vöröseltolódás függvényében felvett diagramja, valamint az így kapott pontsor és a különböző kozmológiai modellek összehasonlítása vezetett (2. ábra). A vizsgálatok alapján az

$\Omega_m(t_0)$ és $\Omega_\Lambda(t_0)$ paraméterek legvalószínűbb értékére – továbbra is feltételezve a közel sík Univerzumot, mivel ennek ellenkezőjére továbbra sem találtak bizonyítékot – 0,3, illetve 0,7 adódott (megjegyezve, hogy ez relatíve kis mintán végzett statisztikán alapult).

A két csillagászcsoporthoz tartozó eredményei nagy visszhangot váltottak ki szakmai és egyéb körökben is. Több szakfolyóirat és tudományos szervezet is az évtized – sőt, az évszázad – legnagyobb felfedezései közé sorolta a Világegyetem gyorsuló tágulásának kimutatását (3. ábra). A szak- és köznyelvben gyorsan meghonosodott a *sötét energia* elnevezés, amelyet a gravitációval ellentétesen viselkedő, de teljesen ismeretlen hatásnak adtak. A fejleményeknek köszönhetően újra értelmezhetővé vált a kozmológiai állandó Einstein által megalkotott fogalma is, csak nem a statikus, hanem a gyorsulva táguló Univerzum legfontosabb paramétereként.



3. ábra. „Az év tudományos áttörése” a *Science* folyóirat címlapján (1998. december).

Kozmológiai állandó és sötét energia – vagy valami más?

Sikerei ellenére több szakember komoly kritikákat fogalmazott meg a szupernóvák fényességeloszlására épülő, új kozmológiai modellel kapcsolatban. Az ellenzők fő érvként azt hozták fel, hogy a távoli szupernóvák vártnál kisebb fényessége más, asztrofizikai jellegű okokkal is magyarázható. Ezek közül a legkomolyabb felvetés az „intergalaktikus szürke por” feltételezése – eszerint a galaxisok közötti térben a beszálltánál jóval nagyobb mennyiségben lehetnek jelen nagyobb (mikrométeres-milliméteres) méretű por-szemcsék, s az ezek által okozott hullámhosszfüggő extinkció csökkenti a távoli fényforrások észlelt fluxusát.

Az eredeti cikkek eredményei alapján ezt a teóriát nem lehetett elvetni, ráadásul – az észlelt objektumok számának növekedésével – az Ia típusú szupernóva-robbanások jellemzőiről és lehetséges okaikról alkotott kép is kezdett egyre inkább távolodni a „standard gyertya” modelltől, ami tovább fokozta a kalibrációk hitelességével kapcsolatos bizonytalanságokat. Jelenleg az Ia típusú szupernóvák fentebb említett, „klasszikus” kialakulási modellje mellett az egymással összeolvadó, valamint a Chandrasekhar-határnál mégiscsak nagyobb tömeget elérő fehér törpék is szóba jöhetnek szülőobjektumként (nem beszélve arról az eshetőségről, hogy eddig nem ismert folyamatok során akár más típusú égitestek is felrobbanhatnak a fehér törpék termionukleáris megsemmisüléséhez ha-

sonló színképi jellemzőket produkálva – bár erre még egyáltalán nem sikerült bizonyítékot találni).

A két kutatócsoport – másokkal együtt – a 2000-es években is intenzíven folytatta a munkát, hogy sikerüljön még alaposabban feltárni, milyen kozmológiai következtetéseket is lehet levonni az Ia típusú szupernóvák megfigyelhető jellemzőiből. Riess és munkatársai az elmúlt évtized első felében az addigra felfedezett és megvizsgált Ia típusú szupernóvákból kiválasztották a mintegy 160, legmegbízhatóbban kalibrálhatónak ítélt objektumot, amelyeket újra analizáltak az MLCS-módszer segítségével. Az újabb eredmények arra utaltak, hogy a különböző vöröseltolódású szupernóvák fényességeloszlása a kozmológiai állandó időbeli változását is megmutathatja [10, 11; előbbinek *Budavári Tamás* személyében egy honfitársunk is társszerzője és aktív közreműködője volt]. Eszerint – mivel Ω_Λ részaránya a második, Fridman-féle expanziós egyenlet alapján a skálafaktor csökkenésével csökken – évmilliárdokat visszamenve az időben a gyorsulás mértéke csökken, sőt eleinte (elegedően kis a értékeknél) a sugárzási és anyagi sűrűségkomponens volt a domináns, így a tágulás lassuló volt. A bemutatott eredmények, úgy tűnik, kizárják a szürke porral operáló modellt (abban legalábbis hasonló időfejlődés nehezen írható le), ugyanakkor a kalibrációs és egyéb bizonytalanságok miatt maguk a szerzők is óva intettek attól, hogy bárki túlzott következtetéseket vonjon le ezekből.

Riess és kollégái következő nagy projektjük keretében a Hubble-űrtávcsővel végeztek szisztematikus megfigyeléseket, amelynek keretében egyrészt újabb Ia típusú szupernóvákat, másrészt úgynevezett cefeida típusú pulzáló változócsillagokat vizsgáltak – ezek pulzációs periódusa és abszolút fényessége között jól meghatározott korreláció van, ami jó távolságindikátorokká teszi ezen csillagokat a közeli galaxisok esetében. Az újabb munka fő érdeme, hogy sikerült 3% körüli szórítani H_0 hibáját ($73,8 \pm 2,4 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$), ami egyrészt a többi kozmológiai paraméter meghatározásának hibáját is csökkenti, másrészt kizárta a sötétenergia-hipotézis egyik – bár nem túl komolyan vett – alternatíváját, a *kozmosz buborék* elméletét. (Eszerint Naprendszerünk egy, a környezeténél jóval kisebb sűrűségű térrészben található, amely a környező Univerzumnál gyorsabban tágul, s ez az effektus okozza a megfigyelt hatásokat. Ez nem keverendő össze a Lokális Buborék fogalmával, amely egy valóban némiképp alacsonyabb részecskesűrűségű térrészt takar a Naprendszer körülbelül 300 fényév átmérőjű környezetében.)

Mindenesetre, ha csak önmagában tekintenénk az Ia típusú szupernóvákhoz kapcsolatos ismereteinket, nem állíthatnánk kellő magabiztossággal azt, hogy az Univerzum valóban gyorsulva tágul, és hogy összetételének több mint kétharmadát az ismeretlen sötét energia teszi ki. Azonban az elméletet helyesnek ítélni kezében nem is ez a legfőbb fegyver, hanem az, hogy két további, teljesen eltérő és független eredmény sor is megerősíti ezt a képet: a galaxishalmazok nagy léptékű eloszlásának, illetve a mikrohullámú

kozmosz háttérsugárzás fluktuációs spektrumának jellemzői [5, 6]. Ezek alapján a sötét energia körülbelül 72–73, míg az anyagi komponens 27–28%-át (amelynek 80–85%-a sötét anyag) teszi ki a Világegyetem energiasűrűségének.

A sötét energia létezése tehát kellően megalapozottnak látszik, azonban mibenlétéről gyakorlatilag semmit nem tudunk. Amit jelenleg állíthatunk, az az, hogy a titokzatos energiakomponens nem bocsát ki észlelhető sugárzást, a tömegvonzással ellentétes, taszító hatást fejt ki (ez ugyanakkor csak kozmológiai távolság- és tömegskálákra érvényesül), és – a jelenlegi vizsgálatok szerint – a galaxishalmazok szintjén is homogénnek tűnik [3]. Korábban a sötét energiát a vákuum energiájával próbálták összefüggésbe hozni, ám az eltérés mintegy 120 nagyságrendnek adódott... Az elmúlt években különböző gravitáció- és térelméleti modelleket írtak fel a gyorsuló tágulás magyarázatára, de teljesen konzisztens képet eddig még nem sikerült összeállítani. Ha valaki megoldja ezt a feladatot, biztos számíthat a következő, sötét energiával kapcsolatos Nobel-díj elnyerésére...

Összefoglalásként tehát megállapíthatjuk, hogy a gyorsuló tágulás és a sötét energia léte – bár sokak számára túlzóan egzotikus elképzelés – jelenleg elég szilárd lábakon áll, ugyanakkor a megválaszolandó

kérdések száma nem kevés. Az Ia típusú szupernóvák szisztematikus vizsgálatának elindítása jelentősen közelebb vitt minket az Univerzum fejlődésének megértéséhez – ez pedig nagymértékben annak a három kutatónak köszönhető, akiket idén – érdemeiknek megfelelően – a Nobel-bizottság elismerésben részesített. A Világegyetem tágulásának és a sötét energia mibenlétének további vizsgálataihoz pedig a jövőben is nagy segítséget nyújthatnak a szupernóvák.

Irodalom

1. Kővári Zsolt, Hotya Hajni: Nobel-díjat érő eredmények a csillagászatban. *Feltárul a Világegyetem – Természet Világa különszám* (2009) 43.
2. Kiss László: Fizika a csillagászatban – csillagászat a fizikában. *Meteor* (2005/7–8) 12.
3. Németh Judit: Mi az a sötét energia? *Fizikai Szemle* 54 (2004) 1.
4. Patkós András: Mi jöhet Einstein után? *Természet Világa* (2005/5) 194.
5. Patkós András: Kozmológia: Az Univerzum történetének tudománya. *Magyar Tudomány* (2004/6) 741.
6. Frei Zsolt, Patkós András: *Inflációs kozmológia*. Typotex, Budapest, 2005.
7. Vinkó József: Távolságmérés szupernóvákkal: tények és talányok. *Fizikai Szemle* 56/7 (2006) 221.
8. A. G. Riess és mtsai, *Astronomical Journal* 116 (1998) 1009.
9. S. Perlmutter és mtsai, *Astrophysical Journal* 517 (1999) 565.
10. A. G. Riess és mtsai, *Astrophysical Journal* 560 (2001) 49.
11. A. G. Riess és mtsai, *Astrophysical Journal* 604 (2004) 665.

ÚJABB ANYAGTUDOMÁNYI NOBEL-DÍJ: DAN SHECHTMAN ÉS A KVÁZIKRISTÁLYOK FELFEDEZÉSE

Hargittai István
BME és MTA

A 2011-es kémiai Nobel-díjat Dan Shechtmannak, a Technion – az Izraeli Műszaki Egyetem (Haifa) – professzorának ítélték oda a kvázikristályok felfedezéséért.¹ Kevés annyira egyértelmű és elégedetlenséget alig kiváltó kitüntetés volt a közelmúltban a Nobel-díjak körében, mint ez. Néhány kérdés mégis felvetődik. Először azonban beszéljünk arról, ami vitathatatlan.

A felfedezés elismerése egyértelműen megfelel *Alfred Nobel* végakarátának, amely szerint a kémiai Nobel-díjat a legfontosabb kémiai felfedezésért vagy

tökéletesítésért kell odaítélni. A kvázikristályok felfedezése egyértelműen felfedezés volt, ugyanakkor a kristályokról alkotott elképzeléseink fontos tökéletesítése is. Az természetesen vitatható, hogy éppen melyik felfedezés a legfontosabb, és nagyon sok felfedezés marad Nobel-elismerés nélkül, de a kémiai Nobel-díjak körében aligha találhatunk arra nem érdemes kitüntetett a díj egész története során. Vitathatatlan az is, hogy a felfedező Dan Shechtman volt.

Shechtman, aki már akkor is a Technion munkatársa volt, 1982-ben vendégkutatóként dolgozott az USA Nemzeti Szabványügyi Hivatalában (National Bureau of Standards, NBS). Ez a hivatal nemcsak szabványok ügyintézésével foglalkozott, hanem jelentős kutatási tevékenységet is folytatott. Shechtman tanulmányainak szponzora az amerikai védelmi kutatási szervezet volt, amelynek képviselője arra biztatta Shechtmant, hogy munkájában bátran kalandozzon el bármilyen irányba, amerre csak kíváncsisága elvezeti. Shechtman hasznos tulajdonságú új ötvözeteket

¹ A kvázikristályok felfedezésének történetéről részletesen írtunk a következő könyvben: Hargittai I., Hargittai M.: *Szimmetriák a felfedezésben* (Budapest: Vince Kiadó, 2003, 148–182.). 2011 októberében megjelent új könyvünk részletesen tárgyalja a kvázikristályok felfedezését különös tekintettel Shechtman kutatói tulajdonságaira, amelyek elvezették felfedezésének elfogadtatásához és elismertetéséhez: I. Hargittai, *Drive and Curiosity: What Fuels the Passion for Science*. (Amherst, New York: Prometheus Books, 2011, 155–172.). A könyv *Ambíció és kíváncsiság* című magyar fordításának megjelenése az Akadémiai Kiadónál 2012 tavaszára várható.

keresett és elsősorban elektronmikroszkópiával vizsgálta mintáit.

Gyorshűtött alumínium-vas ötvözeteket állítottak elő, amelyekről hasznos alkalmazásokat reméltek. Érdekesnek mutatkozott egy metastabil Al_6Fe fázis összehasonlítása az összetételében hasonló, de stabil Al_6Mn rendszerrel. Ezen minták vizsgálata során hamarosan eljutott olyan összetételű alumínium-mangán ötvözetekhez, amelyeket már nem volt érdemes kutatni, mert a tapasztalat szerint annyira törekenyek voltak, hogy alkalmazásukra nem számíhattak. Ennek ellenére – és ez mutatja a kutatói kíváncsiság szerepét ebben a példában – Shechtman nem tudta megállni, hogy egyre nagyobb mangántartalmú mintákról is készítsen elektronmikroszkópos felvételeket, amelyek mindig együtt jártak elektrondiffrakciós kép megjelenítésével. A 25%-os mangántartalmú minta különös diffrakciós képet mutatott tíz jól kivehető fényes folttal, ami tizes szimmetriájú szerkezetre utalt – nyilvánvaló lehetetlenség a szilárd fázisban. Egy, a dogmáknak jobban hitelt adó kutató gyorsan továbblépett volna és senkivel sem osztotta volna meg ezt a megfigyelést, de Shechtman nem ilyen volt. Hitt a saját szemének és beírta a laboratóriumi jegyzőkönyvébe, hogy a 1725-ös $\text{Al-25\%Mn}$ minta tízfogású szimmetriát mutat. Három kérdőjellel utalt a meglepetésére. Ezután kirohant a folyosóra, hogy valakinek – bárkinek – megmutassa azt, amit látott. Nem volt ott senki és akkor visszaült az elektronmikroszkóphoz és elvégzett minden olyan kísérletet, ami a továbbiakban már elegendő is volt ahhoz, hogy közleményben számoljon be felfedezéséről. Mire azonban közleményt jelentetett meg felfedezéséről, több mint két év telt el.

A felfedezést követő hosszú hónapokban Shechtman igazi kálváriát járt be amiatt, hogy mindenkit meg akart ismertetni azzal, amit látott, de senki sem hitte el azt, hogy ez megtörténhetett. A kedvesebbek visszaküldték az iskolapadba, ami felesleges lett volna, mert egyetemi évei alatt egyik vizsgáján be is kellett bizonyítania, hogy ötös szimmetria nem létezik a szilárd fázisban, és ezt sikeresen meg is tette. A kevésbé jóindulatúak kigúnyolták. Nem tudott a brit krisztallográfus *Alan Mackay* (Birkbeck College, London) megállapításairól, arról hogy az ötös szimmetria elképzelhető (lásd alább) és nem ismerte szimulációs felvételeit, amelyek segíthették volna. Különösen megnehezítette dolgát, hogy az akkori idők legnagyobb kémikusa, *Linus Pauling*, aki a krisztallográfiában is otthon volt és az ötös szimmetriájú ikozaédes szerkezetek kutatásában jelentős eredményei voltak, kategorikusan elutasította Shechtman felfedezésének érvényességét. Nem a kísérleti megfigyelés tényében kételkedett, hanem értelmezésében. Váltig állította, hogy krisztallográfiai jelenség, legnagyobb valószínűséggel ikerkristályosodás okozhatta a tapasztalt diffrakciós képet. Shechtmannak még munkahelyein is nehézségeket okozott állhatatossága, mert mind amerikai, mind pedig hazatérte után haifai főnökei kínosnak találták, hogy a mindenki által elfogadott tanok ellenébe megy.



Dan Shechtman és Alan Mackay Budapesten Hargittaiéknál 1995-ben. Mindketten részt vettek a Farkasné Jahnke Mária által szervezett balatonfüredi nemzetközi kvázikristály szimpóziumon. Hargittai István felvétele (© 1995 Hargittai István).

Azután akadt egy izraeli krisztallográfus, *Ilan Blech*, aki elfogadta Shechtman értelmezését és attól kezdve már együtt keresték a pontosabb elméleti magyarázatot. Majd 1984 nyarán az NBS egyik nagytekintélyű vezető kutatója, *John Cahn* – aki korábban idegesen eltanácsolta Shechtmant anélkül, hogy komolyan meghallgatta volna – végre belátta, hogy igaza van, noha még nem tudta megfelelően megfogalmazni felfedezését. Most már valóban csak az maradt hátra, hogy meggyőző dolgozatban írják le a felfedezést és ehhez még egy francia matematikai krisztallográfus, *Denis Gratias* is bevontak a munkába. Dolgozatuk 1984 novemberében jelent meg.² Azonnal átütő sikert aratott, ami több ezer(!) publikáció megjelenésében nyilvánult meg a következő években. Ez azért is figyelemreméltó, mert korábban Shechtman egy cikkpróbálkozását egy alkalmazott fizikai folyóirat szerkesztője azzal utasította el, hogy a téma nem érdekelne a fizikusokat.

Fontos még hozzátenni, hogy bármennyire is vonzó a kvázikristály elnevezés, amelyet egyébként *Dov Levine* és *Paul Steinhardt* adtak ezen szerkezeteknek, a kvázikristályok többé már nem „kvázik”. A felfedezés által okozott paradigmaváltás részeként a Nemzetközi Krisztallográfiai Unió megváltoztatta a kristály meghatározását. Korábban a kristályokat szabályos és periodikus szerkezetként definiálták (szemben a nem-szabályos és nem periodikus amorf anyagokkal). A kvázikristályokat szabályos és nem-periodikus szerkezetekként lehetne leírni, de az új definíció szakított a szerkezeti jellemzéssel és a fenomenológikus utat választotta. Ma kristálynak nevezünk minden olyan szerkezetet, amely Bragg-féle diffrakciós képet okoz.

Fentebb már utaltam arra, hogy kérdések is felvetődnek ezzel a Nobel-díjjal kapcsolatban. Ilyen kérdés, hogy miért *kémiai* Nobel-díjjal ismerték el a kvázikristályok felfedezését? Valóban, a 2010-es fizikai

² D. Shechtman, I. Blech, D. Gratias, J. W. Cahn, *Phys. Rev. Lett.* 53 (1984) 1951–1953.



Hargittai István és Dan Shechtman 2011 januárjában az Izraeli Műszaki Egyetemen (Technion, Haifa) a Shechtman hetvenedik születésnapja tiszteletére rendezett szimpózium alkalmából. Mindkettőjük nyakkendőjét kváziperiodikus minta díszíti (© 2011 Hargittai István).

Nobel-díj példájára, amelyet a grafén előállításáért ítéltek oda, a kvázikristályok felfedezését is jutalmazhatták volna fizikai díjjal. Ez azonban megfordítva is igaz, a grafént is lehetett volna kémiai tekinteni. Mindkettő az anyagtudományok körébe esik és ennek megfelelően a fizika és a kémia közötti határterületen helyezkedik el. Mindkét tudományág számára fontos az anyagtudomány hovatartozása és az elmúlt években bizonyos rivalizálást is lehetett ebben érzékelni. Így például a kémikusok nem örülhettek annak, hogy az Academia Europaea a fizikához sorolta az anyagtudományt. Ebből a szempontból demokratikus megoldás volt a grafén és a kvázikristályok megosztása a kétféle Nobel-díj között és ez nem lehetett a véletlen műve, ismerte a Fizikai Nobel-díj Bizottság és a Kémiai Nobel-díj Bizottság szoros együttműködését. Shechtman Nobel-díjának kémiai odaítélése abból a szempontból is szerencsés, hogy Linus Pauling személyén keresztül éppen a kémia oldaláról voltak nehézségek a felfedezés elismertetésében, amit a mostani díj némiképpen feledtetni hivatott. Azon egyébként nem kell csodálkoznunk, hogy most már nem először kifejezetten anyagtudományi felfedezést jutalmaznak Nobel-díjjal annak ellenére, hogy nincs anyagtudományi kategória a Nobel-díjak között. Biokémiai sincs, és hosszú ideje a kémiai és az orvosi Nobel-díjak mintegy negyven százalékát biokémiai felfedezések kitüntetésére fordítják. Szerencsére a Nobel-díj intézménye rugalmasan és a tudományos fejlődéssel lépést tartva értelmezi a tudományos diszciplinákat. A természet nem szigorúan az iskolai tárgyak szerint alakult ki és fejlődött, a mi felosztásunk csak gyakorlati-kényelmi szempontokat követett, amit a tudományos fejlődés állandóan felülír.

Ugyancsak kérdés lehet, hogy mennyiben igazságos az, hogy *egyedül* Shechtmant tüntették ki? Erre a kérdésre a választ legkézenfekvőbb úgy keresni, hogy megvizsgáljuk, kik jöhettek volna még szóba. A tudománytörténetben visszamehetnénk korábbi próbálkozásokhoz is, amikor a kutatók, Johannes Keplertől elindulva, de még művészek is, Albrecht Dürertől kezdve keresték az ötös szimmetria megjelenését periodikus szerkezetekben. *J. D. Bernal* vetette fel először az úgynevezett általánosított krisztallográfia fogalmát, amellyel elindította a szerkezetek tudományának megteremtését. Az általános krisztallográfia nem szorítkozott volna a klasszikus krisztallográfia zárt rendszerére és nem zárta volna ki az ötös szimmetria megjelenését kiterjedt szerkezetekben sem. Réálisabb azonban *Roger Penrose*-ra gondolni, aki szinte unalomból űzött rajzolgatással jutott el a Penrose-féle aperiodikus síkmintákhoz, aminek azonban nem ismerte fel esetleges tudományos következményeit. Ezekből a mintákból állított elő azután a Bernal-tanítvány Alan L. Mackay szimulációval tízes szimmetriát mutató diffrakciós képet, amelyet 1982-ben meg is jelentetett. 1982 szeptemberében az akkori Kémiai-szerkezeti Kutatólaboratórium (KSzKL) szervezésében, az ELTE TTK Puskin-utcai F épületében tartott előadásában Mackay arra figyelmeztetett, hogy létezhetnek ötös szimmetriájú kiterjedt szerkezetek, de ha nem hiszünk abban, hogy előfordulhatnak, még akkor sem fogjuk észrevenni őket, ha a szemünk elé kerülnek.³ Ennél a figyelmeztetésnél azonban tovább nem lépett. Végül pedig Dov Levine és Paul Steinhardt (akkor a Pennsylvania Egyetem fizikai tanszékén) modellt dolgoztak ki hosszútávúan rendezett aperiodikus szerkezetekre, amelyeket kvázikristálynak neveztek el, de óvakodtak attól, hogy elméleti megfontolásaikat megjelentessék, mert nem akarták kitenni magukat a kutatói társadalom bírálóinak, amennyiben a tudományos közösség számára az ötös szimmetria lehetetlensége kiterjedt szerkezetekben kőbe vésett dogma volt.⁴ Ha ekkor Levine és Steinhardt nem az íróasztaluk számára készítik tanulmányukat, hanem bátran előállnak vele, lehet, hogy most őket is jobban ünnepelnénk. Az előbbiek fényében azonban nem lett volna indokolt Penrose-zal, Mackay-jel, vagy Levine-nel és Steinhardttal megosztani Shechtman kitüntetését.

³ Mackay meghívását azért kezdeményeztük, mert érdekes következtetlenséget éreztünk abban, hogy a molekulák világában semmiféle szimmetriakorlátozás nincs, míg a kristályok világában – legalábbis a klasszikus krisztallográfia tanítása szerint – fontos korlátozások voltak. Mackay addigi eredményei az ikozaédres szerkezetek kutatásában arra utaltak, hogy tőle várható az ellentmondás feloldása.

⁴ Levine doktorandusz volt Steinhardt mellett és ennek megfelelően inkább Steinhardt döntése volt eredményeik visszatartása. Cikküket végül Shechtman felfedezésének ismeretében jelentették meg, mindössze hetekkel követve Shechtman és társszerzői dolgozatának megjelenését: D. Levine, P. Steinhardt, *Phys. Rev. Lett.* 53 (1984) 2477–2480. Ma Levine a Technion fizikaprofesszora, Steinhardt pedig a Princeton Egyetem fizikaprofesszora.

SZTEREÓHATÁS IDŐKÉSLELTETETT FORGÁSSAL

avagy „sírjukban forgó néhai hírességek háromdimenziós exhumálása”

Egri Ádám, Blahó Miklós, Horváth Gábor

ELTE, Biológiai Fizika Tanszék, Környezetoptika Laboratórium

Barta András

Estrato Kutató és Fejlesztő Kft., Budapest

Kriská György

ELTE, Embertani Tanszék, Biológiai Szakmódszertani Csoport

Antoni Györgyi

ELTE, Rectori Hivatal, Pályázati és Innovációs Központ

Manapság már számos háromdimenziós (3D) megjelenítési technika áll az emberiség rendelkezésére [1–9]. Ilyenek például a hologramok vagy az olyan szoftverek, amelyek egy hagyományos, kétdimenziós fényképből imitált távolságinformációk hozzáadásával 3D-érzetű, de a valóságnak nem pontosan megfelelő sztereóélményt nyújtanak. Az utóbbi néhány évben forradalmi változások történtek a térhatású képmegjelenítés területén is, amelyek teljesen új lehetőségeket nyitottak ezek alkalmazására. Ma már megjelentek például olyan kivetítők, amelyek szemüveghasználat nélkül is tökéletes térélményt adnak. A gyártók reményei szerint az új technológia forradalmi fejlődést eredményezhet az iskolai szemléltetőeszközökben, az elektronikus könyvekben, az építészeti szimulációkban és a játékautomatákban. A rohamos technikai fejlődés mellett a másik – talán még fontosabb – eredmény a számítógépek és a digitális fényképezőgépek fejlődésére és világméretű elterjedésére vezethető vissza. Ennek köszönhetően ma már mindenki számára elérhetők azon technikai eszközök és számítógépes szoftverek, amelyekkel tökéletes minőségű 3D-s képeket állíthatunk elő és jeleníthetünk meg különböző módszerekkel. A térhatású megjelenítések között egyfajta szolgáltatásként létezik továbbá a 3D-s gravírozás, aminek során a vásárló fejét háromdimenzióban letapogatják (beszkennelik) és a kapott képet egy üveggömbbe vésik.

A londoni Madame Tussaud hírességek viaszfiguráiból álló panoptikuma méltán világhírű. A hírességekről (például tudósokról, művészekről, színészekről, sportolókról, közéleti személyiségekről, politikusokról) számos kétdimenziós film létezik, amelyek zömében a televíziók és múzeumok archívumaiban hozzáférhetők. E képanyagok a nemzetek kulturális örökségének fontos részét képezik. Milyen jó lenne,

ha nemcsak két dimenzióban lennének megörökítve e hírességek, hanem három dimenzióban is. De vajon miként lehet bárkiről és minél egyszerűbben 3D-élményt előállítani? És a már elhunyt hírességek arcát, fejét, netán még a testét is hogyan lehet három dimenzióban megjeleníteni?

Elvileg a hologram jó módszer lehetne a háromdimenziós megörökítésre, de elkészítése bonyolult és drága, vizualizálási nehézsége miatt sem a legegyszerűbb módszer. Már nem élő személyekről pedig már lehetetlen hologramot készíteni. Ezért inkább a hagyományos sztereó-módszerek között érdemes keresni a megoldást. Cikkünkben három, otthon is bárki által könnyen kivitelezhető eljárást ajánlunk, amelyeket magunk is kipróbáltunk és sikerrel alkalmaztunk.

Forgó személyről egyetlen kamerával készített filmből generált 3D-látvány

Egy forgószékre ültetett és megforgatott személyről filmet készítünk, amit egy számítógépes képernyőn két egymástól vízszintesen elkülönült ablakban úgy vetítünk le, hogy a bal és jobb szemünk csak a bal, illetve jobb ablakot láthassa. Ha az egyik ablakban a másikhoz képest bizonyos időközönként történik a filmvetítés, akkor két szemmel nézve a személy háromdimenziós látványa áll elő a néző látórendszerében. Ennek oka, hogy amikor két szemmel nézzük a nyugalomban lévő célszemélyt, bal és jobb szemünk kissé eltérő szögből látja azt, ami a sztereóhatás feltétele [10–13]. A forgó célszemélyről készült film egymástól megfelelő időeltéréssel készített két képét nézve a bal és jobb szemünkkel, lényegében utánozzuk a két szemet érő eltérő képeket. A forgó célszemélyről készült film időközönként vetítési technikája mellett a két szem megfelelő stimulálásának különböző sztereó-megjelenítési módszerei alkalmazhatók:

- Kétablakos megjelenítés a bal és jobb szem számára egy prizmás szemüveggel elkülönülten mutatván a sztereóképpár bal és jobb képét.

E cikk alapját részben a *Hírességek háromdimenziós digitális panoptikuma (StereoPano)* című pályamű képezte, amivel Egri Ádám és Blahó Miklós doktoranduszok dícséretben részesültek az ELTE Pályázati és Innovációs Központja által 2011 tavaszán meghirdetett, *A mobóság jó!* című hallgatói innovatív ötletpályázaton.



1. ábra. Az első szerző, Egri Ádám sztereóképpárja.

• A térhatású képek megjelenítésére a legelterjedtebb módszer az anaglif eljárás. Az anaglif eljárás segédeszköze a színszűrős szemüveg, amelynek egyik lencséje vörös (red), a másik pedig kékeszöld (cyan) színű. A vörösnek a kékeszöld a kiegészítő (komplementer) színe, ezért ha egy színes tárgyat fehér fénnel megvilágítunk és kékeszöld szűrőn keresztül nézzük, akkor a tárgy piros részeit feketének fogjuk látni. Ez azzal magyarázható, hogy a kékeszöld színszűrő nem engedi át a vörös fényt, azaz a vörös tárgyreszeletről érkező fénysugarak nem jutnak el a szemünkbe. Fordított esetben is működik a dolog, tehát ha a vörös szűrőn keresztül nézzük a tárgyat, akkor annak kékeszöld színű részeit fogjuk feketének látni. Egy térhatású megjelenítés akkor működik eredményesen, ha sikerül elérnünk azt, hogy a sztereóképpár egyik képét csak az egyik, míg a másik képét csak a másik szemmel lássuk. Az anaglif képek esetén ezt egy képkezelő programmal úgy érhetjük el, hogy RGB színmódban az egyik kép vörös-csatornájának tartalmát egyesítjük a másik kép zöld- és kék-csatornájának tartalmával, így létrehozva egy olyan anaglif képet, amely mind a jobb, mind a bal oldali képről tartalmaz képi információkat. Ha vörös-kékeszöld színszűrős szemüveggel nézzük az anaglif képet, akkor egyik szemünkbe csak az egyik kép, míg a másikba csak a másik kép információi jutnak el. A jobb és a bal szemünk ideghártyáján megjelenő képek

hiányosak, hiszen egyikből a vörös-csatorna, míg a másikból a zöld és kék-színcsatorna információi hiányoznak, de központi idegrendszerünk nagyfokú szintetizáló képességének köszönhetően agyunkban mégis kialakul a közel színhelyes érzéklet. A színes anaglif képek esetén két szín, a vörös és a kékeszöld esetében már az agy nagyfokú rugalmassága sem tud rajtunk segíteni, mert ha ez a két szín meghatározó mértékben van jelen a képen, akkor az mindenképpen zavarni fogja a térélmény kialakulását.

• Ma már megjelentek az autosztereoszkopikus monitorok és vetítőfalak is, amelyek képesek a képek háromdimenziós megjelenítésére speciális szemüvegek használata nélkül is. Az autosztereoszkopikus eszközök az LCD-paneleiken számos (akár 12-16) kétdimenziós képet képesek megjeleníteni egyszerre, amelyek kettesével sztereóképpárokat alkotnak. Az LCD felszínén egy vékony fólia formájában a gyártók egy olyan összetett lencserendszert hoznak létre, amely a látószögtől függően mindig csak 2-2 képet (sztereóképpár) tár a szemlélő felé. Ezzel megvalósulhat a térlátás alapfeltétele: mindkét szemünk más perspektívájú képet lát ugyanarról az objektumról, amely az agyunkban egyesül egyetlen térhatású érzékletté. Ennek korai változata volt a 15-20 évvel ezelőtt divatos 3D-s vonalzókon alkalmazott technika, igaz, az csak statikus képek 3D-s megjelenítésére volt alkalmas.

2. ábra. A második szerző, Blahó Miklós sztereóképpárja.





3. ábra. Karády Katalin sztereoképpárja a *Halálos tavasz* (1939) című filmből.

Már nem élő személyek 3D-látványa kétdimenziós filmkockákból

Korábbi hagyományos filmfelvételekből keressünk ki olyan jeleneteket, amelyek során a célszemély feje vagy egész teste forog, vagy valamekkora szögű fordulatot tesz meg! Ha a szereplő forgástengelyének helyzete a kamerához viszonyítva nagyjából állandó, akkor a filmrészlet megfelel az 1. forgómódszerrel előállított filmnek, amit az időkéseletetési eljárással kivetítve, előáll a háromdimenziós látványélmény. Különböző számítógépes programok alkalmazásával arra is van lehetőségünk, hogy a kétdimenziós képeinket háromdimenzióssá alakítsuk (2D–3D konverzió). A programok működése a mozgási parallaxison alapul. Ennek az a lényege, hogy ha két azonos méretű tárgy közül az egyik közelebb, a másik távolabb van, a közelebbit nagyobb látószög alatt látjuk. Ezért, ha elmozdulunk, vagy a tárgy mozog, a közelebbi tárgyak elmozdulása nagyobb, mint a távolabbiaké. Általánosan megfogalmazva az elmozdulás mértéke és a tőlünk, mint szemlélőtől mért távolság egymással fordítottan arányos. A tárgyak távolságára ezért ebből az úgynevezett mozgási parallaxisból is lehet következtetni. A konvertáló programba be kell hoznunk az eredeti kétdimenziós képet, majd ezután a szoftverrel „tudatnunk” kell, hogy a képen melyek azok a részletek, amelyek közelebb és melyek azok, amelyek távolabb helyezkednek el. Erre különböző módszerek léteznek, amelyek esetenként egy programon belül is változnak.

Egymástól szemtávolságnyira vízszintesen eltol két kamerával előállított 3D-látvány

A célszemély tetszőlegesen mozoghat, de nyugalomban is maradhat, vagy beszélhet, arcmozgásokat használhat, esetleg gesztikulálhat is. A bal és jobb szem látóirányából fölvetett két filmet bármelyik sztereó-megjelenítési módszerrel lehet később vizualizálni. E technikának egykamerás megvalósítását jelenti az a módszer, amelynél kétlencsés objektívet használunk a felvételek elkészítésekor.

Példaképpen az 1. és 2. ábra e cikk két szerzőjéről az 1. módszerrel készült 3D-film egy-egy sztereoképpárját mutatja. A 3. ábra pedig az 1939-ben készült *Halálos tavasz* című híres magyar fekete-fehér film azon részletének egy sztereoképpárja, amelyen *Karády Katalin* táncolva forgott. Ha a két kép közé tett tenyerünkkel vagy egy papírlappal elérjük, hogy megfelelő távolságból nézve a bal és jobb szemünkkel csak a bal, illetve jobb képet lássuk, akkor kialakul a 3D-élmény.

Az olvasó próbálja meg maga is a cikkünkben ismertetett egyszerű módszerek valamelyikével magáról, ismerőseiről vagy kedvenc filmsztárjáról előállítani a 3D-filmet! Ehhez sok sikert és jó szórakozást kívánunk olvasóinknak.

Irodalom

1. Kriska Gy.: Térhatású természet. *Élet és Tudomány* 51 (1996) 1669–1672.
2. Kriska Gy.: Fényképek sztereomikroszkóppal. *Élet és Tudomány* 52 (1997) 780–781.
3. Kriska Gy.: Térhatású természet – Gombanézőben. *Élet és Tudomány* 52 (1997) 1649.
4. Mizera, F.; Bernáth, B.; Kriska, G.; Horváth, G.: Stereo videopolarimetry: measuring and visualizing polarization patterns in three dimensions. *Journal of Imaging Science and Technology* 45 (2001) 393–399.
5. Horváth G.: Mi a titka? Háromdimenziós lézergravírozás. A téreltapogatótól a térnyomtatóig. *Természet Világa* 136 (2005) 324–326.
6. Kriska Gy.: *Térhatású fényképezés és szemléltetés*. Flaccus Kiadó, Budapest, 2008, 103 o. + CD-ROM
7. Kriska Gy.: Térhatású szemléltetés – térlátás és érzékszálódások. *A biológia tanítása – módszertani folyóirat* 16/1 (2008) 17–21.
8. Kriska Gy.: Térhatású szemléltetés – 2D – 3D átalakítás. *A biológia tanítása – módszertani folyóirat* 16/2 (2008) 12–15.
9. Szállassy, N.; Gánóczy, A.; Kriska, G.: Three dimensional illustrating – three-dimensional vision and deception of sensibility. *Acta Didactica Napocensia* 2/1 (2009) 29–36.
10. Horváth G.: Búvároptika. Optikai jelenségek a levegő és a víz határán. *Természet Világa* 118 (1987) 298–303.
11. Barta, A.; Horváth, G.: Underwater binocular imaging of aerial objects versus the position of eyes relative to the flat water surface. *Journal of the Optical Society of America A* 20 (2003) 2370–2377.
12. Horváth, G.; Buchta, K.; Varjú, D.: Looking into the water with oblique head tilting: revision of the aerial binocular imaging of underwater objects. *Journal of the Optical Society of America A* 20 (2003) 1120–1131.
13. Horváth G., Barta A., Buchta K., Varjú D.: Binokuláris ferde pillantás a vízfelszínen át: a vízfelületen túli világ fénytöréstől torzult bonyolult szerkezete, avagy egy klasszikus optikai probléma helytelen megoldásairól és azok kijavításáról. *Fizikai Szemle* 55 (2005) 172–181.

A FIZIKA OKTV HARMADIK FORDULÓJA, A MÁSODIK KATEGÓRIA RÉSZÉRE – 2011

Vannay László, Fülöp Ferenc
BME Fizikai Intézet, Fizika Tanszék

A BME Fizikai Intézet 1994 óta rendezi a fizika Országos Középiskolai Tanulmányi Verseny (OKTV) harmadik, döntő fordulóját. Korábban három kategóriában versenyeztek a diákok. Első kategóriában az „emeltszintű” fizikaoktatásban részesülők, a másodikban az általános tantervű gimnáziumok tanulói, míg a harmadik kategóriában a szakközépiskolák diákjai versenyeztek.

A fizika OKTV – a 2007/2008-as tanévtől kezdődően – két csoportban (kategóriában) kerül megrendezésre.

A diákok hovatarozása a versenykiírás szerint:

„Az I. kategóriába azok a középiskolai tanulók, akik nem tartoznak a II. kategóriába.

A II. kategóriába azok a gimnáziumi tanulók, akik a 9. évfolyammal kezdődően – az egyes tanévek heti óraszámát összeadva – a versenyben való részvétel tanévének heti óraszámával bezárólag összesen heti 8, vagy annál több órában tanulják a fizikát bizonyítványban feltüntetett tantárgyként.”

Mind a két csoport részére három fordulóból áll a verseny. Az első két forduló során elméleti problémákat kell megoldaniuk a versenyzőknek, míg a harmadik fordulóban mérési feladatokkal kell megbirkózniuk. A harmadik fordulóban az első két forduló legjobbjai mérik össze tudásukat.

A verseny értékelése a második (maximum 60 pont) és a harmadik (maximum 40 pont) fordulóban szerzett pontok összegzésével történik. Ha az összesítés után egyenlő pontszám jön létre, a sorrendet a harmadik fordulón elért pontszám határozza meg.

A délelőtti versenyzők



A BME Fizikai Intézet ebben az évben az II. kategória versenyének harmadik – döntő – fordulóját rendezte. A versenyen 30 diák vett részt, két 15 fős csoportban. Az egyik csoport délelőtt 8-tól 12 óráig, a másik 12.30-tól 16.30-ig dolgozhatott, egymástól függetlenül elválasztott mérőhelyeken. A mérőhelyeket sorsolással osztottuk ki a versenyzők között.

Dolgozatunkban először bemutatjuk a verseny kezdetekor kiadott írásos anyagot, úgy ahogy a versenyzők megkapták. A kiadott írásos anyag bemutatása után vázoljuk a kitűzött feladatok megoldásának módját, majd beszámolunk az értékelés során szerzett tapasztalatokról, a versenyzők eredményeiről, és végül köszönetet mondunk mindazoknak, akik közreműködtek a verseny előkészítésében vagy lebonyolításában.

A versenyzők részére kiadott írásos anyag:

Mérések függőleges alumínium, illetve sárgaréz csőben eső mágnessel – 2011

A feladatok

1.) Vizsgálja meg, hogyan mozog a függőleges ötvözt alumínium –, illetve sárgaréz csőben egy eső mágnes! (Az eső mágnes több kis mágnesből is állhat.) Részletesen ismertesse a mérés menetét, rajzolja fel az út-idő grafikonokat, és értelmezze azokat! (10 pont)

2.) Ismertesse az 1. pont szerint vizsgált folyamat közben jelentkező fizikai folyamatokat, és azok hatását! (5 pont)

3.) Rajzolja fel azt a jelalakot, amit akkor kapna, ha a mérőtekercsben indukálódó feszültséget egy rövid idő alatt lejátszódo jelek megjelenítésére alkalmas eszköz (például oszcilloszkóp) képernyőjén jelenítené meg! Rajzához fűzzön magyarázatot! (5 pont)

4.) Mérései segítségével határozza meg, hogy a sárgaréz fajlagos ellenállása hány-szorosa az ötvözt alumínium fajlagos ellenállásának! Számításához fűzzön magyarázatot! (7 pont)

5.) Gondoljon ki és végezzen el újabb mérést annak igazolására, hogy az előzőleg a fajlagos ellenállások arányának megállapításakor alkalmazott

eljárás helyes volt, azaz a kapott eredményt nem befolyásolták egyéb fizikai folyamatok! (7 pont)

6.) Ha a sárgaréz csőben egyszerre két mágnes esik, mekkora legyen a közöttük lévő távolság, hogy ne befolyásolják egymás hatását? (Mérje meg – és rajzolja fel – a közös sebességet, a mágnesek közötti távolság függvényében!) (6 pont)

A feladatok megoldásához az alábbiak állnak rendelkezésére:

1.) Egy-egy darab ~98 cm hosszú, $\varnothing 10 \times 1,5$ mm-es (10 mm-es külső átmérő és 1,5 mm-es falvastagság) sárgaréz-, illetve ötvöztött alumínium cső (az egyik végétől 10 cm-enkénti jelöléssel).

2.) 1 db műanyag gyűrű a csövek felfüggesztéshez (helyzete rögzíthető).

3.) 1 db állvány.

4.) 1 db tekercs, mérőzsinórral és rögzítő csavarral (a menetszám: $n = 1100$).

5.) 1 db galvanométer (használati utasítás a mérőhelyen).

6.) 5 db neodímium mágnesgyűrű* (átmérő 6/2 mm, magasság 5 mm, anyag: N48).

7.) 1 db stopperóra.

8.) 1 db olló.

9.) 1 db csévetesten zsineg.

10.) 1 db műanyag csipesz.

11.) 1 tekercs szigetelőszalag.

12.) 1 db műanyag vonalzó.

13.) 1 db műanyag edény, puha béléssel, a leeső mágnesek felfogására.

14.) A4-es milliméterpapír.

15.) 1 db 6 cm és 1 db 12 cm hosszú „grafit” cső ($\varnothing$ 2 mm.)

A verseny időtartama 4 óra.

A verseny folyamán készített írásos anyagain, grafikonjain minden lap első oldalán, a jobb felső sarokban tüntesse fel mérőhelye számát, valamint azt, hogy a délelőtti (De.), vagy a délutáni (Du.) csoportban mért! Egyéb azonosításra alkalmas adatot (név, iskola stb.) ne tüntessen fel!

Méréseit körültekintően végezze. Jegyzőkönyvei olyan részletesek legyenek, hogy a leírtak alapján pontosan megismételhetők legyenek a mérései! Írása olvasható legyen!

A feladatok megoldása

1. feladat

A megoldáshoz a rendelkezésére álló állványra – a műanyag gyűrű és a zsinór segítségével – fel kell függesztetni azt a csövet (1. ábra), amelyben vizsgálni szeretné az eső mágnes viselkedését, majd a csőre fel kell helyezni a tekercset. A tekercs a csövön mozgat-

* *Figyelem! Erős mágneseket használunk!* A használat során különös figyelmet kell fordítani a munkavédelemre. A mágnesekkel PACEMAKER-t használó személy nem dolgozhat. A mágneses térre érzékeny műszerek, eszközök, berendezések működése a mágnesek hatására megváltozhat. A mágneses adathordozókon tárolt adatok megsérülhetnek, vagy megsemmisülhetnek.



1. ábra. A cső felfüggesztésének egy módja.

ható és tetszőleges helyen rögzíthető. A tekercs kivezetéseit banándugóval lehet csatlakoztatni a galvanométerhez. A leírt műveletek elvégzésével a rendszer „mérésre kész”. Az összeállítást úgy kell elkészíteni, hogy mérés közben a cső függőleges helyzetben legyen (2. ábra)!

Ha a csőben mágnes esik a tekercs rögzítésének helyén, a tekercsben feszültség indukálódik, amit a galvanométer kilengése jelez. (A galvanométer érzékenysége változtatható, érdemes a mérés szempontjából a legkedvezőbb érzékenységet beállítani.)

Az út-idő grafikon felvételéhez:

– kiválaszt egy mágnes, amely az öt kis mágnes közül egy, vagy több egymáshoz kapcsolódó darab-ból állhat,

2. ábra. Egy cső a mérőtekercssel az állványon.



1. táblázat					
A csőben eső mágnesek mozgásának főbb jellemzői					
mágnesek száma (db)	alumínium cső		sárgaréz cső		v_s/v_{Al}
	az egyenes egyenlete	sebesség v_{Al} (cm/s)	az egyenes egyenlete	sebesség v_s (cm/s)	
1	$s = 0,0449t - 0,003$	4,49	$s = 0,0954t - 0,0299$	9,54	2,12
2	$s = 0,0601t + 0,0016$	6,01	$s = 0,1249t - 0,0124$	12,49	2,08
3	$s = 0,084t + 0,0032$	8,40	$s = 0,174t - 0,0111$	17,40	2,07
4	$s = 0,113t - 0,0094$	11,30	$s = 0,2281t - 0,0099$	22,81	2,02
5	$s = 0,1334t - 0,0006$	13,34	$s = 0,2721t + 0,0002$	27,21	2,04

– A regressziós állandó négyzete (R^2) minden esetben csak a negyedik jegyben tért el 9-től, és a legrosszabb esetben is a negyedik jegy 5-ös volt. Ez azt jelenti, hogy a mérési adatok igen jól illeszkednek az egyenesre.

– Az egyenesek egyenletében az állandó tag előjelének negatívnak kellene lennie az igen rövid gyorsuló szakasz miatt. A néhány esetben előforduló + előjel a mérési hibáknak tudható be.

– a tekercset a cső felső végétől adott távolságban rögzíti, ezzel meghatározza a vizsgált út hosszát, (az út kezdetét a cső eleje, míg végét a tekercs közepének helye határozza meg),

– bejti a csőbe a mágneset, és stopperórával méri a meghatározott út megtételéhez szükséges időt, (az óra indítása a mágnes elengedésekor, leállítása akkor történik, mikor a galvanométer mutatója a legnagyobb kitérésének kétharmadához ér),

– a mérést többször megismétli, különböző utak esetén (mi egy-egy út esetén 10 mérést végeztünk, és 8–10 különböző úton mértük az esési időt),

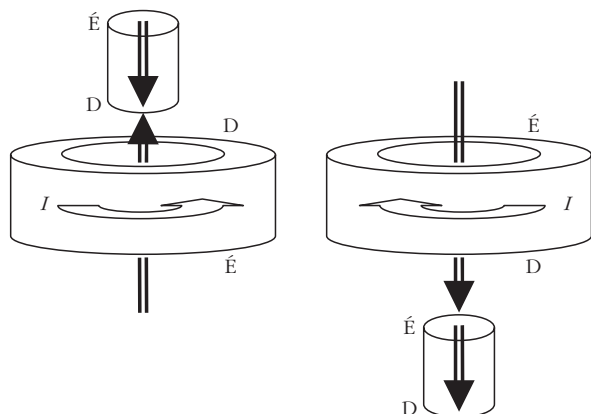
– a kapott mérési adatok felhasználásával felrajzolja az út–idő grafikont.

Gondos mérés esetén az út–idő grafikon egy egyenes, amely majdnem az origóból indul. Tehát az eső mágnes igen gyorsan eléri azt a sebességet, amellyel a csőben mozog. Az állandósult sebesség értéke a grafikon segítségével könnyen meghatározható. (Értéke 4,49 cm/s és 27,21 cm/s között változott, a cső anyagának és az összekapcsolt kis mágnesek számának függvényében.)

Mérési eredményeinket az 1. táblázatban tüntettük fel. A táblázat a mérési pontokra illesztett egyenesek egyenletét, a kapott sebességértékeket, valamint azok hányadosát tünteti fel az eső mágneset alkotó kis mágnesek darabszámának függvényében.

Megjegyzések az egyenesek egyenletével kapcsolatban:

3. ábra. A mágnes átesésekor kialakuló feszültségpolaritás és áramirány.



A versenyzőknek természetesen az ötféle lehetséges mérés közül csak egyet kellett elvégezniük. Kevesebb távolságon (például 20 cm-enként mérve) és távolságonként kevesebb alkalommal mérve is megoldható a feladat.

2. feladat

A cső falában az eső mágnes hatására változik a mágneses fluxus, ennek hatására feszültség indukálódik, ami örvényáramok kialakulását eredményezi. Az örvényáramok a Lenz-törvény értelmében a fluxusváltozást – azaz a mágnes mozgását – igyekeznek gátolni. Az álló helyzetből induló mágnes gyorsulva mozog, ennek hatására egyre nő az indukált feszültség, és ezzel együtt az örvényáramok fékező hatása is. A sebesség addig növekszik, míg az örvényáramok által a mágnesre gyakorolt erő megegyezik a mágnesre ható nehézségi erővel. Ettől kezdve a mágnes állandó sebességgel mozog a csőben. Mivel a mérés igen erős mágnesekkel történik, a gyorsuló szakasz nagyon rövid. (Hossza a rendelkezésre álló eszközökkel nem mérhető.)

(Elvileg a mérőtekercsben kialakuló áram is hat az eső mágnesre, de ez a hatás elbanyagolható.)

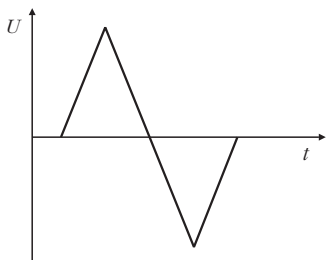
Megemlíthető a mágnes mozgása közben fellépő közegellenállási erő és a cső belső falával való érintkezés hatására jelentkező erő, amelyek hatása szintén elbanyagolható. Ezt igazolja az 5. feladat megoldása.)

3. feladat

Amikor az eső mágnes közeledik a tekercshez, fokozatosan növeli annak fluxusát. Ekkor a tekercsben kialakuló áram olyan irányú, hogy fékezi a mágnes közeledését. Amikor a mágnes elhagyja a tekercset, csökken a fluxus, az indukált áram fékezi a mágnes távolodását a tekercstől. A csőben a mágnessel együtt mozgó örvényáramok tekercsre gyakorolt hatása is ilyen.

Tehát miközben a mágnes átesik a tekercsen, megváltozik a feszültség polaritása, és ezzel az áram iránya is. A viszonyokat az 3. ábra szemlélteti.

Az oszcilloszkóp képernyőjén megjelenő jelalakot a 4. ábra mutatja. Ha a mágnes polaritását megcseréljük, az ábra időtengelyre tükrözötten jelenik meg.



4. ábra. Az oszcilloszkóp képernyőjén megjelenő jelalak.

4. feladat

E feladat kiírását az tette lehetővé, hogy sikerült két különböző anyagból (alumínium és sárgaréz) külső és belső átmérőjében megegyező csövet és hozzájuk megfelelő mágneseket beszerezni.

A csőben eső mágnesek állandósult sebessége azt jelzi, hogy a mágnesre ható nehézségi erő és az örvényáramok mágnesre ható ereje egyensúlyban van. A mágnes és az áram közötti erő arányos a csőfalban kialakuló örvényáramokkal. Ezért: $m \cdot g = k_1 \cdot I$.

Az áramot az indukált feszültség és az érintett csőszakasz elektromos ellenállása határozza meg. Az indukált feszültség arányos az eső mágnes v sebességével – ez határozza meg a fluxusváltozás sebességét – az ellenállás pedig arányos a fal anyagának ρ fajlagos ellenállásával.

Az elmondottak szerint:

$$m \cdot g = k_1 \cdot I = k_1 \cdot \frac{U}{R} = k_1 \cdot \frac{k_2 \cdot v}{k_3 \cdot \rho} = K \cdot \frac{v}{\rho}.$$

Ha a kétféle anyagú – geometriailag teljesen megegyező – csőben ugyanazt a mágneset ejtjük, a felírt egyenlet bal oldala, valamint az arányossági tényezők azonosak. Így az állandó arányossági tényezők (k_1 , k_2 és k_3) összevonásával kapott K arányossági tényező

szintén azonos, ezért a sebességekre és a fajlagos ellenállásokra írható, hogy:

$$\frac{v_{Al}}{\rho_{Al}} = \frac{v_s}{\rho_s}, \text{ ahonnan: } \frac{\rho_s}{\rho_{Al}} = \frac{v_s}{v_{Al}}. \quad (1)$$

Tehát a sárgaréz fajlagos ellenállása annyszor nagyobb az alumínium fajlagos ellenállásánál, ahányszor nagyobb sebességgel esik ugyanaz a mágnes a sárgaréz csőben, mint az alumínium csőben. A mérési eredményekből meghatározott arányokat feltüntettük az 1. táblázat utolsó oszlopában. Az öt mérés adataiból számított arány átlaga 2,066. A hiba 2,55 %

Megjegyzések a fajlagos ellenállások arányának meghatározásával kapcsolatban:

- az esési sebességek mérése egy kis mágnessel végzett mérés esetén történt a legnagyobb hibával, az indulási bizonytalanság, valamint a cső átmérőjének és a mágnes hosszának azonossága következtében,
- a fajlagos ellenállások arányára kapott számok esetén a legnagyobb és a legkisebb szám közötti eltérés is kisebb, mint 4%,
- a kapott eredmények jó egyezést mutattak az ohmos ellenállás mérésével kapott eredményekkel. (Az ohmos ellenállások mérését a csövek igen kis ellenállása miatt négyvezetékes módszerrel végeztük.)

5. feladat

Az 1. feladat megoldása során felmerül a kérdés, hogy a mágnes esése közben a cső falával történő érintkezés, a mozgás során fellépő légellenállás hatása elhanyagolható mértékű-e? A kérdés eldöntésének egyszerű módja, ha a mérést megismételjük a korábban alkalmazott mágnesről eltérő számú kis mágnesből összeállított mágnes segítségével. (Például, ha az 1. feladat megoldásához két kis mágnesből összeállított mágneset használunk, akkor a mérést három, négy, vagy öt kis mágnesből összeállított mágnessel ismételjük meg.)

A megismételt mérés esetén megváltoznak a mágnes jellemzői, módosul a mágnes és a cső kölcsönhatásának geometriája, és más lesz az esés sebessége. Ha ezen változások ellenére a korábbival egyező eredményt kapunk, azt mondhatjuk, hogy a fent említett befolyásoló tényezők hatása az eredményre elhanyagolható.

Az 1. táblázatban feltüntetett eredmények igazolják az alkalmazott mérési eljárás helyességét, a mérési eredmények megbízhatóságát. A különböző mágnesek segítségével meghatározott fajlagos ellenállás arányok megegyeznek.

A délutáni versenyzők



A versenyzők az 1. feladat megoldásakor megállapíthatták, hogy a csőben eső mágnes egy igen kis gyorsuló szakasztól eltekintve, végig állandó sebességgel esik a csőben. Ezért csak néhány távolságon mérve az esési időt, könnyen meghatározhatták a megváltoztatott eső mágnes állandósult sebességét a két különböző anyagú csőben. A két sebesség ismeretében, pedig (1) felhasználásával a fajlagos ellenállások arányát.

Mivel az első feladat megoldása során felrajzolt út-idő grafikonok kis eltéréstől eltekintve a $(t = 0, v = 0)$ pontból indulnak, nem követ el nagy hibát az, aki csak egy adott távolság megtételéhez szükséges időt méri a két csőben az esési sebességek meghatározásához.

6. feladat

Azt, hogy a két mágnes esés közben egymástól állandó távolságra legyen, a 2 mm átmérőjű „grafit” csövek segítségével biztosítottuk. A mágnesgyűrűket a csőre felfűztük, és helyzetüket szigetelőszalaggal rögzítettük.

Először 1 db mágneset rögzítettünk a 6 cm hosszú „grafit” csőre, és 90 cm hosszú úton mértük az esés idejét. Mérési eredményeink felhasználásával az esés sebessége: $v_1 = 0,1329$ m/s.

Ezután a 12 cm hosszúságú csőre fűztük fel, és egymástól különböző távolságokra rögzítettük a két mágneset, majd mindig 90 cm-es úton mértük a két mágnes együttes esési idejét. (Az utat álló helyzetben, a sárgaréz csőben alul elhelyezkedő mágnesről mértük.)

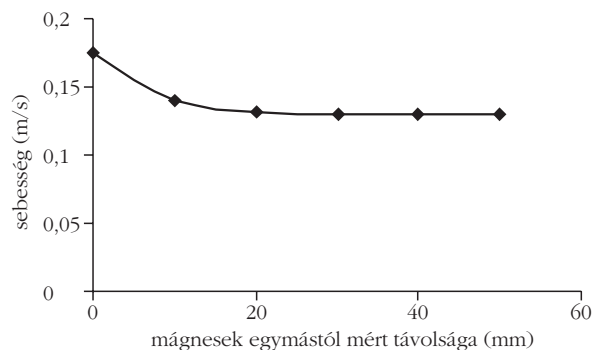
Az összehasonlításához, hasonló körülmények biztosítása érdekében helyeztünk el a 6 cm-es rúdon egy mágneset, és a 12 cm-es rúdon két mágneset.

A mért sebességek a 2. táblázatban feltüntetettek szerint alakultak.

2. táblázat	
mágnesek egymástól mért távolsága (mm)	közös sebesség (m/s)
0	0,1745
10	0,1401
20	0,1320
30	0,1296
40	0,1296
50	0,1296

A mérési eredményeket ábrázoltuk az 5. ábrán. A táblázat adatai, és a grafikon alapján jól látszik, hogy ha a két mágnes egymástól legalább 30 mm-re van, a közös sebességük már nem függ a közöttük lévő távolságtól, és ez a sebesség jól egyezik azzal az eredménnyel, amit a rövid grafitsövön lévő 1 db mágnes esetében mértünk.

Megjegyezzük, hogy az egy mágnessel végzett mérések nélkül, a két mágnessel végzett vizsgálatok alapján is egyértelműen kijelenthető az, hogy ha a két mágnes egymástól legalább 30 mm-re van, már nem befolyásolják egymás hatását.



5. ábra. Esési sebesség a mágnesek távolságának függvényében.

A versennyel kapcsolatos tapasztalatok és az eredmények

A feladat megoldásához rendelkezésre álló anyagok és eszközök lehetővé tették, hogy az első feladatot különösebb nehézségek nélkül megoldják a versenyzők. Az értékelésnél azt találtuk, hogy ez hibátlanul csupán három versenyzőnek sikerült. Többen nem igyekeztek a csövek függőleges helyzetének biztosítására. A jegyzőkönyvek jó része hiányos volt. Hosszas leírásokat lehetett olvasni lényegtelen dolgokról, míg a mérés lényegéhez tartozó részek nem szerepeltek a leírásokban. A versenyzőknek több mint a fele helyesen készítette el a mérési eredményeit megjelenítő grafikonjait, de a grafikonok értelmezésével mintegy ötöde nem foglalkozott.

A mágnesek esése közben jelentkező fizikai folyamatok közül az örvényáramok megjelenését, és azok hatását lényegében minden versenyző leírta. Arra, hogy a mágnesek esése közben sűrűlődség és légellenállás is jelentkezhet, csak néhányan gondoltak.

A tekercsben indukálódó feszültség időbeli változását a versenyzők harmada vázolta fel helyesen. Volt olyan, aki egyáltalán nem foglalkozott ezzel a kérdéssel, a legtöbben nem vették figyelembe a mágnes tekercséhez való közeledése, illetve távolodása közötti eltérést.

Az alumínium és a sárgaréz fajlagos ellenállásának arányát a versenyzők kétharmada lényegében helyesen határozta meg. (A feladat kiírásakor ennél rosszabb eredményre számítottunk.)

Az 5. feladat megoldásával (ötlet-, vagy időhiány miatt) már csak a tanulók harmada foglalkozott. Négyen adtak helyes megoldást.

Érdekes módon az utolsó feladat megoldásával majdnem mindegyik versenyző megpróbálkozott, teljes megoldás egy versenyzőnek sikerült, de öten igen közel jártak ehhez.

A versenyzők által szerzett pontszámok a 2. forduló után 60 és 47 között változtak, míg a 3. fordulón elért pontszámok 40 és 16 között mozogtak. A végső sorrendet eldöntő összesítés után a legmagasabb pontszám 100 és a legalacsonyabb 66 volt.

A versenyen résztvevő 30 tanuló közül 17 budapesti és 13 vidéki tanuló volt, míg az első 15 helyen végzett közül 8 jött vidéki iskolából és 7 érkezett Budapestről.

A korábbi évekhez képest csökkent a leányok száma, idén egy leány vett részt a döntőben.

A második és a harmadik fordulón elért pontszámok összesítése után az élmezőnyben a sorrend az alábbiak szerint alakult:

1. *Kalina Kende*, a Fazekas Mihály Fővárosi Gyakorló Általános Iskola és Gimnázium tanulója. Felkészítői: *Horváth Gábor*, *Csefkő Zoltán* és *Szokolai Tibor*.

2. *Galambos Máté*, az ELTE Radnóti Miklós Gyakorló Általános Iskola és Gimnázium diákja. Felkészítője: *Honyek Gyula*.

3. *Laczkó Zoltán Balázs*, a Szegedi Tudományegyetem Ságvári Endre Gyakorló Gimnázium tanulója. Felkészítője: *Győri István*.

4. *Farkas Dániel* (Budapest, Piarista Gimnázium), 5. *Jébn Zoltán* (Pécsi Tudományegyetem Babits Mihály Gyakorló Gimnázium), 6. *Kóbor Attila* (Fazekas Mihály Fővárosi Gyakorló Általános Iskola és Gimnázium), 7. *Kovács Péter* (ELTE Apáczai Csere János Gyakorló Gimnázium), 8. *Varga Ádám* (SZTE Ságvári Endre Gyakorló Gimnázium), 9. *Várnai Péter* (ELTE Apáczai Csere János Gyakorló Gimnázium), 10. *Balási Szabolcs* (Fazekas Mihály Fővárosi Gyakorló Általános Iskola és Gim-

názium), 11. *Berghammer Tamás* (Budaörs, Illyés Gyula Gimnázium), 12. *Havlik Tamás* (Zalaegerszeg, Zrínyi Miklós Gimnázium), 13. *Nagy Donát* (Szeged, Radnóti Miklós Gimnázium), 14. *Garaguly Gergő* (Szolnok, Verseghy Ferenc Gimnázium) és 15. *Budai Ádám* (Miskolc, Földes Ferenc Gimnázium).

Köszönetnyilvánítás

A verseny anyagi háttérét részben az Oktatási Hivatal biztosította. Ezt ezúton is köszönjük.

A verseny lebonyolításához szükséges eszközök kivitelezéséért *Horváth Bélának*, *Halász Tibornak* és *Bacsa Sándornak*, a megfelelő körülmények megteremtéséért *Gál Bélánénak* és *Mezey Miklósnak* mondunk köszönetet.

A versennyel kapcsolatos adminisztrációs és gazdasági ügyek intézéséért *Honti Editet* és *Kovács Annát* illeti köszönet.

Elismerés és köszönet illeti mindazokat – szülőket, tanárokat, barátokat stb. –, akik segítették a versenyzők munkáját és ezzel hozzájárultak a verseny sikeréhez.

KÍSÉRLETEZZÜNK OTTHON!

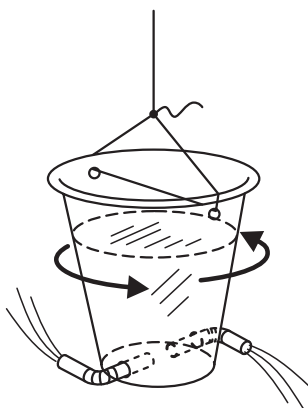
Härtlein Károly
BME Fizikai Intézet

2. Seegner forgony

Hozzávalók, szerszámok:

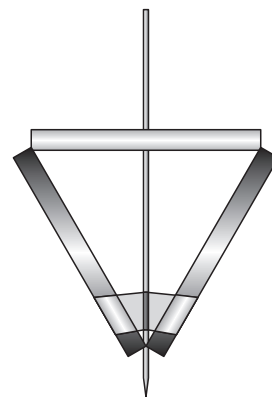
- 1 db műanyag pohár,
- 2 db hajlítható végű szívószál,
- ragasztógyurma vagy rágógumi,
- fonál,
- olló,
- ceruza.

Egy szépen kihegyezett ceruzával óvatos mozdulatokkal a műanyag pohár aljára készítsünk két lyukat! A rajzon látható módon helyezzük el a szívószálakat! Tömítésnek használjunk ragasztógyurmát (BluTack), de megteszi a használt, előpuhított rágógumi is. A pohár tetején készítsük el a lyukakat, majd vékony cérnából készítsük el a felfüggesztést! A poharat vízzel feltöltve az ismert fizikai jelenségnek engedelmessé válva forgásba jön az eszközünk.



- ragasztószalag,
- olló.

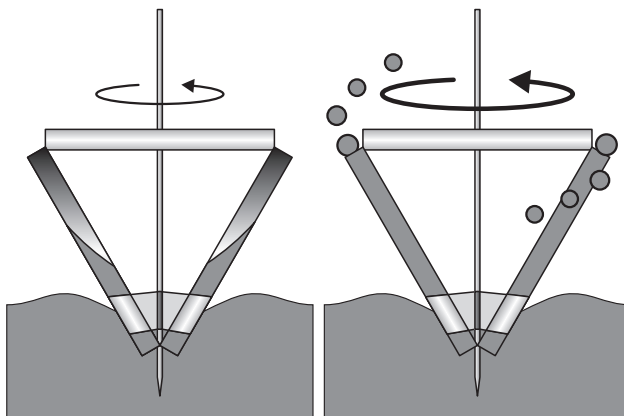
Szúrjuk át a szívószál közepét a saslíkpálcával. Tőle egyenlő távolságban vágjuk be legalább félig a szívószálakat, ügyelve arra, hogy semmi képpen se vágjuk át teljesen. Ezután hajlítsuk be a szívószál végeit a pálcá mellé és ragasztóval rögzítsük. A szívószálnak egyenlőszárú háromszöget kell formáznia. Eszközünk már készen is van lehet



3. Szívószálból centrifugálszivattyú

Hozzávalók és szerszámok:

- 1 db szívószál,
- 1 db saslíkpálca, vagy hurkapálca,



játszani, kísérletezni vele. A kísérlethez kell még egy pohár víz is, szerencsés, ha a pohár átlátszó üvegpohár.

Merítsük az eszközünk végét a vízbe és a pálcánál fogva forgassuk meg. A szívószálban lévő víz is forgásba jön! És elkezd egyre magasabbra emelkedni. Ezt a centrifugális gyorsulásnak és annak köszönheti, hogy a vízoszlop nem szakad szét. Így rövidesen teljesen megtölti a szívószálat. A fordulatszám növelésével elérhető, hogy a csőből folyamatosan fog folyni a víz.

KÖNYVESPOLC

Lee Smolin: MI A GUBANC A FIZIKÁVAL? Akkord Kiadó, Budapest, 2011. 373 o.

Ha „költőien” akarnánk megfogalmazni a könyv tárgyát, fő mondanivalóját, azt mondhatnánk, hogy az a „részecskék húrelméletének elsíratása”. Valójában azonban sokkal komolyabban kell fogalmaznunk. A könyv ugyanis részben tényleg a húrelmélet kudarcát mutatja be, de ezen túlmenően az elméleti fizika – elsősorban a fundamentális kérdésekkel foglalkozó elméleti fizika – stagnálását is az utóbbi évtizedekben. A könyv ugyanakkor keresi a stagnálás okait és a lehetséges kiutakat is. Bemutatja továbbá egy olyan kutató ezzel kapcsolatos küzdelmeit és reményeit, aki maga is részese a szóban forgó kutatásoknak: ez maga a könyv szerzője.

A húrelméletnek már az alapjainál is problémák vannak: „...a dolgok húrelméleti felfogása olyan régi sejtésen alapul, amelyeket a húrelméletesek többsége elhisz, de amelyeket eddig nem bizonyított senki”. Például „...a húrelmélet végességét sohasem bizonyították be. ... Úgy tűnik, mintha a közösség konszenzusára való hivatkozást el lehetne fogadni racionális érvként.” Szinte hihetetlen, de a sok erőfeszítés, az igen nagy számú, ezen a területen dolgozó, tehetséges kutató hosszú éveken át folytatott kutató munkája ellenére a húrelméletnek „...nem létezik teljesen kidolgozott formája. ... A húrelméletnek ... az alapjait eddig nem sikerült kidolgozott formába önteni, vagy meghatározni az alaptörvényeit. ... Amink van, az igazából nem elmélet, hanem közelítő számolások sokasága, plusz olyan sejtések rendszere, amelyek ha igazak, akkor egy elmélet létezésére utalnak. Ez az elmélet viszont még sohasem öltött konkrét formát. ... Arra sincs bizonyíték, hogy egyáltalán létezne ilyen teljes forma.”

Talán még súlyosabb probléma, „...hogy a húrelméletbe fektetett hatalmas munka ellenére nincs reális esély arra, hogy bármilyen, jelenleg elvégezhető kísérlet döntő bizonyítékot vagy cáfolatot adjon”. Pedig: „Bármilyen elmélet értékelésének az első lépése

Kilépve a csőből – a pálcá irányából figyelve – útját spirális pályán folytatja. A pálcára merőlegesen pedig parabolapályán keresztül fogja elérni az asztalt, jobb esetben pedig a ruhánkat!



Mindkét eszközt játékként is ajánlom megépíteni. Játék közben a gyermekek számukra észrevétlenül fogják magukban megfogalmazni a fizika idevonatkozó törvényeit.

a megfigyelésekkel és kísérletekkel való összehasonlítás. ... Egy tudományos elmélet, amely semmilyen jóslatot sem tesz, és következtetésképpen nem ellenőrizhető kísérletileg, az sohasem vall kudarcot – de egy ilyen elmélet győzedelmes sem lehet soha...” A húrelmélet esetében tehát egy olyan elmületről van szó, „...amelynek nincsenek világos alapelvei, és nem tud fizikai jóslatokat tenni”. Mindezek után „...megkezdhetetlen a végkövetkeztetés, hogy maga a húrelmélet ... sohasem lesz fundamentális elmélet”.

Valójában azonban sajnós – mint már említettük – a szerző szerint többről van szó mint egy elmélet – jelen esetben a húrelmélet – kudarcáról. Az elmúlt mintegy harminc év „...a fizika történetének legfurcsább és legkiábrándítóbb korszaka. ... Kertelés nélkül kimondhatjuk..., hogy kudarcot vallottunk.” Az elmúlt századok viharos fejlődése után nehezen fogadható el, „...hogy három évtized lényeges fejlődés nélkül teljen el a fundamentális fizikában. ... Az 1980-as évek elején ... elakadt ez a fejlődés. ... úgy érzem a fizika jelenleg válságban van...”

A szerző még a könyv első részében felsorolja az elméleti fizika alapvető, megoldatlan problémáit – köztük például a relativitáselmélet és a kvantumelmélet egyesítésének kérdését – és miután bemutatta az utóbbi évtizedek kutatásainak törekvéseit és eredményeit, meg kell állapítania, hogy az alapvető kérdések megoldásában gyakorlatilag nem sikerült előrehaladást elérni. Végül fölteszi a kérdést: „Miért produkált a fundamentális fizika az elmúlt huszonöt év során oly kevés egyértelmű előrehaladást, a legjobb és legképzettebb tudósok ezreinek erőfeszítése ellenére?”

Az okot két dologban látja. Az egyik a húrelmélet művelőinek „túlhatalma”. Ezen a területen dolgoznak legtöbben és „pozitív visszacsatolásként” ők nyerik el a legtöbb pályázatot és konferenciáikon vagy „ahova csak elér a kezük” nem minden arrogancia és öntelt-

ség nélkül mást nem engednek szóhoz jutni. A következmény: „...miközben rengeteg energiát fordítottunk a hűrelméletre, más megközelítések ... távolról sem kaptak ennyi lehetőséget.” A másik ok összefügg ezzel: a fiatalok ehhez az irányzathoz igyekeznek csatlakozni, mert így remélhetnek ösztöndíjas helyeket, végül állandó állást.

Az eredmény, hogy a „tudomány berkein belül” az önálló, új gondolatoknak, kezdeményezéseknek nem nyílik tér, pedig nagyon is itt az ideje az új utak keresésének. Hogy merre, a szerző annak szenteli a könyv négy részéből az egyiket *A hűrelméleten túl* címmel.

Annak ellenére, hogy a fentiek szerint – mint láttuk – jócskán negatív a véleménye a hűrelméletről (amely létrejöttének kezdetét szorosabb értelemben a 60-as évek végétől, a 70-es évek elejétől számíthatjuk), azt mégis alaposan és objektíven bemutatja, főleg a könyv második részét – a négyből az egyiket – használva fel erre.

Egyébként önmagával, saját tudományos múltjával kapcsolatban is kritikus és bevallja: „A kvantumgravitáción dolgozó közösségben én érveltem leghangosabban, hogy a hűrelméletet komolyan kell venni. ... én magam is hajlandó voltam elfogadni, hogy a kritikus gondolkodást a terület vezetői végezzék el helyettem. ... Ebből a csapdából én is csak évekig tartó töprengés után tudtam kiszabadulni. ... Kollégáimnál én sem vagyok kevésbé sáros, amiért elfogadtam a hűrelmélettel kapcsolatos, széles körben elterjedt nézeteket annak ellenére, hogy nincsenek alátámasztva a szakirodalomban.”

Az előző háromhoz – amelyekről az eddigiekben írtunk – csatlakozik egy negyedik rész, amely az előb-

biek fényében tudományfilozófiai, tudományszociológiai kérdésekkel foglalkozik (*Mit tanulhatunk a tapasztalatokból?*). A levont tanulságokra különben már részben utaltunk az előbbiekben is – részben előre hozva ezen rész megállapításait –, és láttuk, hogy ezek meglehetősen kritikusak.

Ebben a részben a szerző egyébként számos, a tudományra, a kutatásra vonatkozó, általában is érvényes megállapítást tesz. Egyet hadd idézzünk ezekből. A tudományban szükség van „...idősekre, akik megfékezik a fiatalok lobbánkonyságát, mivel ha hosszú életük során valamit megtanultak az az, hogy milyen gyakran tévedünk; és szükség van a fiatalokra, akik újra próbára teszik a generációk óta elfogadott és szent hiedelmeket, amikor ezek hasznukat vesztik. ... A tudományhoz a lázadás és a tisztelet egyensúlyára van szükség, hogy mindig fennálljon a radikálisok és a konzervatívok közötti párbeszéd.”

Érdemes megemlíteni még, hogy más, nyugaton megjelent könyvektől eltérően itt számos esetben találunk hivatkozást orosz szerzőkre, sőt van olyan eset is, hogy elsőségük is nyilvánvaló lesz. Magyar kutatóként egyedül *Lakatos Imréről*, a tudományfilozófusról találunk említést, aki Debrecenben végzett és Angliában csinált karriert.

Kritikai megjegyzésként csupán azt érdemes megemlíteni, hogy túl sok az ismétlés a könyvben, bizonyos megállapításokat számos esetben újra és újra szerepeltet.

A könyv végén a fenti négy fő részhez köszönetnyilvánítás, jegyzetek, valamint tárgy- és névmutató társul, az elején pedig egy bevezetés.

Berényi Dénes

Hargittai István: TELLER

Akadémiai Kiadó, Budapest, 2011, 563 oldal

Érdemes *Hargittai István* munkáját összehasonlítani *Teller Ede* önéletrajzával (*Huszedik századi utazás tudományban és politikában*. Huszedik Század Intézet, 2002). Két hasonló terjedelmű – egyenként több mint 500 oldalas, nagyalakú – könyvről van szó, és mindkettőnek ugyanaz a hőse. Teller 640 kiegészítést, magyarázatot fűzött lábjegyzet formájában a könyvhöz, hogy minél több olvasója számára tudja ugyanazt a tartalmat közvetíteni – kilencven évnél életének történetét. Hargittai 1200-nál is több lábjegyzete állításainak háttérét rögzíti, a könyvek, cikkek, dokumentumok lelőhelyének adatait. Mindebből nem az következik, hogy önéletrajzot könnyebb írni, hanem az, hogy máshol van a felelősség: a megélt életben, illetve a rekonstrukció megbízhatóságában.

Teller izgalmas életet élt tudósként és a huszedik század kikerülhetetlen közéleti szereplőjeként is. A modern fizikában a tudományos teljesítmény jelen-

tőségét nem könnyű érzékeltetni. Teller kedvező helyzetben volt, mert csak az időközben világhíróvé lett szereplőket és azt a környezetet kellett leírnia, akikkel és amelyben a felfedezés megszületett. Mondjuk a harmincas években Koppenhágában Teller megvitattott *Landauval* egy feltevést, Majd *Hermann Jahn*nal kissé közelebből is megvizsgálták. „Ez a jelenség azóta Jahn–Teller-effektus néven ismeretes. Pedig Landau–Jahn–Teller-effektusnak kellene hívni.” (Teller: 124. o.). Ez az idézet szerepel Hargittai könyvében is, ám ő jóval többet ír a Jahn–Teller-effektusról, valamint egy keretes oldalt szentel Hermann Jahn pályájának ismertetésére. A későbbi történetekről sem feledkezik meg, például az 1987-es Nobel-előadásról, amelyben a magashőmérsékletű szupravezetés felfedezői részletesen kitértek a felfedezésükben fontos szerepet játszó Jahn–Teller-effektusra.

Fontos rendező elv mindkét könyvben a háromszori száműzetés. Az önéletrajzból kikövetkeztethető, Hargittai oknyomozó könyvében hangsúlyosak a háromszori újrakezdés különbözőségei. Az első Magyarországot elhagyását jelenti belső kényszer hatására: Tellernek bőven elég volt annyi antiszemitizmus, amennyivel gimnazista korában találkozott, az egyetemet már a megengedőbb weimari Németországban is végezhetette. „Az 1933-as második náci hatalomátvétel után azonban el kellett hagynia Németországot. Ez a távozás azt is jelentette, hogy maga mögött hagyta mindkét, általa folyékonyan beszélt nyelvet és mindkét kultúrát, amelyben felnőtt.” (Hargittai: 107. oldal)

A harmadik száműzetés – ami semmiképpen nem mondható emigrációnak – Teller ötvenes évekbeni elszigetelődését foglalja össze, amelynek csúcspontját az Oppenheimer-ügyben játszott szerepe jelentette. „Az Oppenheimer-meghallgatásnak a közvéleményre gyakorolt hatása nem csökkent az idők folyamán. Az a benyomásunk, hogy a Tellerrel szembeni általánosan tapasztalható ellenséges hangulat elsősorban a tanúvallomásának volt köszönhető” – írja Hargittai. Ugyanakkor idézi az elfogulatlan *Wheeler* véleményét is: „A háború alatt és később a hidrogénbomba-program során számos ellenséget szerzett magának türelmetlenségével és erőszakos viselkedésével. Az új fegyverlaboratóriumért folytatott hadjárata sem vált javára. Amikor az Oppenheimer-meghallgatáson tanúskodott, addigra már csaknem az összes kutató utálta.”

Az Oppenheimer-ügy nevezetes esemény volt – már negyvenöt éve színpadot kaphatott nálunk is, holott Teller személye és szerepe még sokáig tabu volt. És azóta is számtalan feldolgozás tartja felszínen a történetet, általában mint a tudomány és a politika szembekerülésének drámáját. Hargittai szerencsére nem érzi annak kényszerét, hogy igazságot tegyen, hanem összegyűjtött rengeteg adatot, feljegyzést, jegyzőkönyvet, visszaemlékezést, amelyekből kiderül, hogy nincs egyszerű megoldás, hogy két nagyon tehetséges, számos lényeges vonásában hasonló kutatóról van szó, akiknek ellentétei már csak ezért is kibékíthetetlen szembenálláshoz vezettek a hidegháború leghisztérikusabb éveiben.

„Ebben a nagyon korlátozott értelemben, annak az érzésemnek szeretnék hangot adni, hogy személyesen biztonságosabbnak érezném, ha közös dolgaink más kezekben lennének.” Teller tanúvallomásának ezt a befejező mondatát sokan alamuszi kegyelemdöfésnek tartották számon. Teller maga a félrevezető előzményekre történt szerencsétlen reagálásként magyarázta. Hargittai az előző évek történetének részletes leírása után a tudósközösség részéről megragadható lehetőségként szerepelteti a népszerűtlen Teller lejárására. Ugyanakkor bebizonyítja, hogy Teller önmagát is ámitja azzal, hogy Oppenheimer-ellenességének látszata csupán tudatos félrevezetésének eredménye. A Hoover-archívumból származó, Teller két évvel korábbi kihallgatását összegző FBI-jelentésből idéz: „Teller kijelenti, szinte bármit megtenne azért, hogy Oppenheimert eltávolítsák az Általános Tanácsadó Bizottság-

ból, a nemzeti készségre vonatkozó rossz tanácsai és politikája miatt és azért, mert késleltette a H-bomba kifejlesztését.” (336. oldal)

Hargittai az Oppenheimer-üggyel kapcsolatban ötven oldalnyi jegyzőkönyvet és visszaemlékezést dolgozott fel – ennyiből az olvasó már kialakíthatja saját véleményét. Azonban a kiközösítést Teller elszenvedte, és ennek megélése nem adatok kérdése. Hosszú idézetet olvashatunk egy 1990-es interjúból, amely több részletben adja vissza Teller reagálását arra a kérdésre, hogy a kialakult bizalmatlanság fáj-e. Egy darabig a válaszadás tónusát kereste, majd hirtelen kitört: „Természetes, hogy fáj! Fájdalmat akartak okozni, valóban fáj. Ez régen volt, tudja? Közben felépült Livermore. Új barátokra tettem szert, olyan életkorban, amikor a legtöbb ember már nem barátkozik. Közben számos egyéb gondom is akadt. Ez már többé nem vita tárgya.”

Tárgyilagosság – ez Hargittai könyvének legfontosabb célja. Ennek érdekében a szerző csak annyit tehet, hogy igyekszik elfogulatlan lenni és a történeteket minél több információ közlésével bemutatni. Ezzel a szikár, érzelemmentes eljárással sokszor nagyobb feszültséget lehet elérni mint a gegek halmozásával. Van egy fejezetcím a könyvben: *A hidrogénbomba atyja*. Ez a jelzős szerkezet olyannyira Tellerhez tapadt, hogyha találomra érdeklődünk a hidrogénbomba atyja után, minden pozitív válasz Teller lesz. Hargittai bemutatja a dokumentumokat, hogy valóban Teller ragaszkodott a neves kutatók közül leglátványosabban, legerőszakosabban a SZUPER-hez, ám amikor 1950-ben megszületett a politikai támogatás, addigra a részletes számolások kimutatták, hogy az alapelképzelés hiányos, a SZUPER nem működik. Teller legfeljebb egy halvaszületett eszköz apjának tekintheti magát, háttérben a fenyegetéssel, hogy az oroszoknak sikerül megcsinálni a termonukleáris fegyvert. Teller nem jelenthetett csődöt, neki a megalapozatlan remény birtokában kellett bizalmat árasztania. Mindezt nem kevés ellendrukker előtt, akik képesek voltak minden részletében átlátni a kudarcot. Tellert nem roppantotta meg a kilátástalanság, és egy év alatt megszületett a megoldásnak bizonyuló Teller–Ulam-tervezet.

Teller és *Ulam* szerepének elemzése önmagában is szép teljesítmény, hiszen a szereplők fokozódó ellen-szenvét kellett a valóságnak megfelelően ábrázolni, miközben a termék, a Teller–Ulam-tervezet titkosságát mai napig nem oldották fel. A hidrogénbomba történetének bemutatása során találkozunk azzal a fejezettel, amelyik különösen jellemző Hargittai könyvére: *Megismerhetjük-e a múltat?* – ezt kérdezi a fejezetcím. Húsz oldalt fordít annak igazolására, hogy alátámassza: „Ahogyan a hidrogénbomba története Teller írásaiban megjelenik, önmagában is jól illusztrálja, milyen nehéz megismerni és mások elé tárni a múltat.” 1955 és 2001 között Teller öt fontos beszámolóban is foglalkozott a hidrogénbomba történetével, nem kevés feladatot adva kortársaknak és történészeknek, hogy a szereplők és történetek változását értelmezzék. Szerepe van itt politikának, taktikának,

változó ellenszenvnek és rokonszenvnek, ám mind-ezek figyelembe vétele után sem lehetünk nyugodtak, hogy megismertük a múltat. És nemcsak Tellerrel van így – a fontos szereplők különböző időpontbeli viszszaemlékezései is ellentmondanak egymásnak és önmaguknak. Hargittai kiterjedt levelezéssel, számos interjúval próbál tájékozódni, ám mindig beleütközik a szubjektív értékelés korlátaiba. A múlt kirakható a kezünkbe kerülő adatok és egyéb információk jóvoltából, de csak közelítőleg, hiszen csak egy bizonytalan vázlattal rendelkezünk, amit időben változó, elmosódó kontúrú puzzle-elemekkel fedhetünk le.

Ez a helyzet akkor is, amikor a Livermore Laboratórium megszervezéséről, a *Szilárd Leó*-val folytatott televíziós vitákról vagy Tellernek az SDI-ben, a Stratégiai Védelmi Kezdeményezésben játszott szerepéről van szó. Hargittai leírja az eseményeket, a különböző szempontok alapján megszülető értékeléseket, bírálatokat. A közelmúlt sem áttekinthetőbb, mint az ötven év előtti, és egyszerű rendet vágni a Teller körüli események útvesztőjében csak valamilyen összeesküvéselmélet vagy erős preconcepció képes. Tellernek az önmaga jelentőségébe vetett hite sokat segített eredményei elérésében. „Kiterjedt levelezésének olvastán az embernek az a benyomása támad, hogy fontosabbnak érezte magát, és fontosabbnak szeretett látszani, mint amilyen hatása a valóságban volt.” Ugyanakkor „Jóllehet mélységesen belebonyolódott a politikába, Teller nem volt jó politikus, mivel sokszor nem számolt tetteinek és nyilatkozatainak lehetséges következményeivel.” (511. oldal)

Hargittai könyve utolsó fejezetében, a *Záró gondolatokban* különleges szempontok szerint elemzi Teller tevékenységének egyes oldalait – zsidóságát, orosz kapcsolatait, a személyéhez tapadó címkéket, tanácsadói tevékenységét. A legérdekesebb *A két (és több) Teller* című szakasz. „A külvilág előtt és különösen életének második felében arrogáns volt, magabiztos, erőszakos, türelmetlen: gyakran önkényesen döntött másokat is érintő kérdésekben, visszaélt a katonai és politikai vezetők körében kialakult valós vagy vélt befolyásával, és minden vitát megnyert. A magánember ezzel szemben tele volt kételyekkel önmaga iránt, igényelte feljebbvalóinak jóváhagyását, kollégáinak barátságát és elismerését ... Létezett egy harmadik, elbűvölő, kedves Teller is, akinek volt humora és öniróniája, udvarias volt és nagyvonalú ... Ráadásul azt a képességét, hogy tudott elbűvölően is viselkedni, gyakran machiavellisztikus módon arra használta fel, hogy könnyebben valósítsa meg terveit, és biztosítsa győzelmét a nyilvános vitákban” (505. oldal).

A kötethez kronológia, a kötetben szereplő nevek jegyzéke – praktikus ki kicsoda – és mutató a könyvben szereplő történetek felleléséhez, valamint utószó található. Az utószót *R. L. Garwin*, Teller közvetlen munkatársa írta. Befejező két mondata valószínűleg sok olvasó véleményét foglalja össze: „Hargittai lelkiismeretes aprólékossággal és sikeresen végezte el Edward Teller értékelését. Amikor befejeztem az olvasást úgy éreztem, nemcsak ismereteim gazdagodtak, de bölcsőbb is lettem.”

Füstöss László

Somlai János:

A RADIOAKTÍV ANYAGOK MINT »AZ ÖRÖK ÉLET ELIXÍRJEI« és RADIOAKTÍV SUGÁRZÁSOK A POLITIKA SZOLGÁLATÁBAN Radioökológiai Tisztaságért Társadalmi Szervezet, Veszprém 2011, 108, illetve 128 oldal

Az *első könyv* a radioaktív anyagoknak tulajdonított kedvező hatásokról és ezzel kapcsolatos csalódásokról szól. Az *előszót* (első fejezetet) a Pannon Egyetem habilitált docense, *Somlai János* írta. A *második fejezetben* az alapfogalmakról, a dóziszfogalmakról, a külső és belső sugárterhelésről, az ionizáló sugárzások fizikai, kémiai, biológiai hatásairól, a szövetek, szervek és szervezet sugárkárosodásáról, valamint a ^{226}Ra , a ^{222}Rn , a ^{232}Th és a ^{220}Rn izotópokról olvashatunk. Fényképek láthatók a természetes radioaktivitás, a rádium és a polónium felfedezőiről (*Becquerel*-ről és a Curie-házaspárról), valamint szép ábra mutatja be az alfa-, a béta- és a gammasugárzás átható képességét. Tárgyalja a biológiai sugárhatásban

fontos szabad gyökök keletkezését is. Ismerteti a determinisztikus és a sztochasztikus sugárhatásokat. Leírja a félhalálos dózis fogalmát is. A két könyvben ez a két fejezet erősen hasonlít, a többi fejezet témája különböző.

A *első könyv harmadik fejezetében* a radioaktív izotópokról, az ionizáló sugárzásokról mint kondicionáló, egészségmegőrző anyagokról olvashatunk. A szerző ír a homokfürdőről, párnákról, barlang és/vagy bányatúrákról, valamint radonos fürdőről. Kiemelhető a szerző azon gondolata, hogy a radioizotópok felfedezésével egy ideig nagyon sokan azt hitték, hogy megtalálták az örök élet elixírjét és ez a remény tévesnek bizonyult. A szerző ír mért értékekről is,

például a brazil tengerparton mért legnagyobb gamma dózis teljesítmény 130 $\mu\text{Sv/h}$.

A *negyedik, az ötödik, a hatodik, a hetedik és a nyolcadik fejezetben* az élelemanyagokban (főleg a radonos vízről van itt szó), a tisztálkodó szerekben és a kozmetikumokban, a vágyfokozó szerekben, az öltözetben és a kiegészítőkből (karórák, fülbevalók, ékszerek stb.) levő radioizotópokról lehet olvasni. A szerző ír a másokat átvérni akaró és a könnyen becsapható ember problematikájáról is. A rádium egy időben az aranynál drágább volt. Ehhez egy adat: az 1910-es években 1 g rádium 70 Ford-autó árának felelt meg.

A *nyolcadik fejezetben* a megalapozatlan orvosi alkalmazásokról van szó. A röntgensugárzás és a radioaktív anyagok károsodásokat, sőt haláleseteket okoztak. A hamburgi emlékoszlopra 18 magyar áldozat (például *Elischer Gyula, Holzwarth Jenő, Kisfaludy Pál, Schiffer Ernő*) nevét is felvésték.

A *kilencedik fejezet* a könyv összefoglalása. A *tizedik fejezetben* bőséges irodalomjegyzék található, például *Köteles* professzor úr *Sugáregészségtan* című könyve, *Deme Sándor* és *Fehér István* tavaly megjelent *Sugárvédelem* című kötete.

A *másik, idén megjelent könyv* az ionizáló sugárzás politikai alkalmazásáról szól. Az *előszót* (első fejezetet) Somlai János írta. A *második fejezet* döntően egyezik a másik könyv első fejezetével.

A *harmadik fejezetben* sugársérülések, sugárbetegségek kimutatásáról és kezeléséről kapunk összefoglalást. Olvashatjuk például, hogy a limfocitaszám csökkenéséből, annak időbeli változásából lehet hozzávetőleges következtetést levonni az egészségtételdózisra.

A *negyedik fejezetben* a politikai hatalom által potenciálisan használható eszközökről és módszerekről van szó (rejtett eszközök, anyagok, személyek felderítése; radioizotópok mint nyomjelzők; szándékos egészségkárosítás, gyilkosság; ismertté vált esetek). Az egyik eszköz a röntgenberendezés, illetve a röntgensugárzás, a másik a nyílt vagy zárt radioaktív izotópok.

Az *ötödik fejezetben* terrorcselekményekről olvashatunk, főleg a piszkos bombáról (dirty bomb), amely okozhat károkat és pánikot is kiválthat, a *hatodikban* a lakosságot potenciálisan veszélyeztető egyéb eseményekről. Az egyik legérdekesebb egy detroiti fiatalember története, aki sugárforrásokat például ameríciumot, tríciumot, rádiumot szerzett és otthonában reaktort akart létrehozni. Elég abszurd ötlet, hogy jelentős dózist szenvedett el. A *hetedik fejezet* az összegzés. Ezt követi a részletes *szakirodalom* (mintegy 50 hivatkozás) és a három táblázatot tartalmazó *függelék*.

A két szép kiviteli könyvben sok ábra, grafikon és táblázat található.

Gáspárdy Géza

J. R. dos Santos: AZ ISTENI FORMULA

– Einstein utolsó üzenete

Fordította: Nagy Viktória, Kossuth Kiadó, Budapest, 2010. 509 oldal

Csodálatosan szép kiállítású könyv *José Rodrigues dos Santos* portugál *regényíró* nyolcadik kötete. Mindenképpen szögezzük le, a 2005. évi Einstein-jubileumot az eredeti – portugál – kiadás is egy kicsit lekészte, hiszen a kötet 2006-ban jelent meg. Mégis azt hisszük, méltó hozzájárulás az Einstein-évfordulóhoz, erről tanúskodik a kötet nemzetközi visszhangja. *Regénynek* persze különös. Van ugyan szövevényes cselekménye izgalmas fordulatokkal, azonban a félezer oldalas terjedelemnek mintegy fele sajátos filozófiai és fizikai eszmefuttatás. A szereplők: egy bölcseztanész, aki az ókori nyelvek és bizonyos klasszikus keleti témák felé orientálódó titkosírás-szakértő, továbbá két fizikus – a feltevés szerint – Einstein utolsó évei során tanítványai, sőt munkatársai és egy csillagász. Köztük zajlik a meglehetősen részletes vita bizonyos filozófiai, fizikai és tudománytörténeti kérdésekről, még-hozzá nem is röviden. A szerző bölcse önmérséklettel épp csak érinti a fizikai ismereteket, hogy az olvasókat ne riassza el, a filozófiai témákban azonban sokkal kevésbé tapintatos. Akár merésznék is tarthatjuk a szerző eljárását, bár a kötet nemzetközi fogadtatása

azt mutatja, hogy e téren nem kell aggódnunk. Vagy az a helyzet, hogy a kötet lelkes olvasói a téma iránt ténylegesen érdeklődők sorából kerültek ki, vagy pedig tényleg megérezték a szerző, hogy a szélesebb, nagy olvasóközönséget érdekelni fogja ez a téma. Itt azért férfiasan bevalljuk, e sorok írója igazán lelkes olvasója volt a kötetnek – s nem csak „hivatalos”, szakmai érdeklődésből (a relativitáselmélet iránt). S mindezt annak ellenére le kell szögeznünk, hogy a kötet témája *Einstein utolsó írása* igazából *fikció*, vagyis jól kiválasztott kitaláció, amit a szerző igen kiválóan dolgozott fel.

Pontosabban: nem állítható, hogy Einstein nem foglalkozott volna az Univerzum – fizikai, csillagászati értelemben vett – sorsával. De élete végéig (1955-ig) még messze nem érkezett el az idő ahhoz – ahogyan még sajnos ma sem örvendhetünk annak, bár az elmúlt fél évszázad tapasztalataival gazdagabban –, hogy fizikai értelemben döntésre kerülhessen sor arról a kérdés-komplexumról. Végso soron a regényt ez a tudományos probléma (és egy *lehetséges* megoldása) teszi igazán érdekessé. Annyit most szögezzünk le, hogy ez a

probléma az Univerzum globális szerkezete, zártságának kérdései – szakaszosság vagy végtelenség, valamint az élettartam. A kötet *regényírói* állásfoglalása az, hogy az Univerzum a kérdéseire a Bibliában leírt *kódolt* üzenetek rejtik a választ és a „megfejtés” folyamata alkotja a regény eseménytörténetét.

A szerző nagy érdeme, hogy megtalálta azokat a „regényírói” eszközöket, amelyekkel az olvasó leláncsolható (feltéve, hogy nem riad vissza az említett tudományos gondolatok fejtegetésétől). E sorok írójának éppen az tűnt fel, hogy milyen csodálatosan „gazdaságos” a szerző eljárása miközben írja regényét és

fejtegeti e kényes kérdéseket, milyen mesteri fokon szakítja meg a gondolatmenetet a nehezebbnek tűnő kérdések során, hogy az eseménytörténetben tovább tudjon lépni. Vagy talán éppen emiatt oly sikeres a regényírásban, emiatt sikerülnek a mesemondás fortélyai úgy, hogy a titkosírás megfejtésének külsődleges körülményei adják a történet, a megfejtés izgalmas lendületét?

Külön gratulálunk a fordítónak, *Nagy Viktóriának* a lendületes – és tudományos szempontból problémamentes – magyar szöveghez.

Abonyi Iván

HÍREK – ESEMÉNYEK

HÍREK ITTHONRÓL

In memoriam Pintér Ferenc, 1933–2011

A szűkszavú hír, amely szerint 2011. július 7-én váratlanul elhunyt *Pintér Ferenc* kollégánk, a Szegedi Tudományegyetem Juhász Gyula Pedagógusképző Kar Fizika Tanszékének volt vezetője, mindnyájunkat megrázott.

Felvidék (Vágfarkasd) szülötte volt. Gyermekéveit ott töltötte. A II. világháborút követő kitelepítések során került Magyarországra, Nagybánhegyesre. A történelem viharai és a nélkülözések edzette ifjú kitűnően végezte tanulmányait. Diplomát szerzett a Szegedi Egyetemen, majd tudományos fokozatot a moszkvai Lomonoszov Egyetemen.

A Kísérleti Fizikai Tanszéken kezdte oktatói és kutatói munkáját. Számos diákja, tanítványa őrzi szabatos előadásainak hangulatát. Szívós, türelmes, kitartó kísérletező munkára nevelte diplomamunkát készítő hallgatóit.

Kutatómunkája az optika, ezen belül a lézerfizika témaköréhez kapcsolódott. Alapító tagja volt a szegedi lézeres iskolának, tevékeny részt vállalt az első festéklézerek létrehozásában és továbbfejlesztésében. Alapos spektroszkópiai tudása lehetővé tette, hogy kutatásait a lézerfény-anyag kölcsönhatás területére is kiterjessze. Kollégái, tanítványai mint alapos, megfontolt kutatót és szívós, kitartó kísérletezőt ismerték meg.

Oktatómunkájában mérce volt precizitása és alapossága. A mindennapi tanítás mellett jutott ideje és energiája arra is, hogy jegyzeteket és tudományos népszerűsítő cikkeket írjon változatos témákban.



Szakmai-közéleti tevékenységet az ELFT Csongrád megyei csoportjában végzett. Több cikluson volt a társulat megyei vezetőségének tagja, illetve elnöke. Szívügye volt a tehetségek felkarolása, nemcsak Szegeden. Számos ELFT-verseny kitűzésében, szervezésében és lebonyolításában vett részt.

Kitartóan ragaszkodott az általa jónak vélt értékrendhez. Szorgalmas, elkötelezett, példamutató tevékenysége zsinórmérték volt a Tanszék kollegái számára is.

1983-ban vette át a JGYPK Fizika Tanszéke vezetését, ahol eredményesen irányította és továbbfejlesztette azt a nagyszerű tantárgy-pedagógiai munkát, ami megbecsülést, elismertséget adott a Tanszéknek. Számos hazai és nemzetközi kooperációban készült tudományos cikke, könyve jelent meg, elsősorban az optika, atomfizika és anyagtudomány területén. Leendő tanár tanítványai az elkötelezett pedagógust, a hivatását magas színvonalon gyakorló szakembert látták benne. Munkájához nagy segítségére volt a meleg, támogató családi háttér, felesége, gyermekei és unokái. 1998-ban egy súlyos műtét után vonult aktív nyugalomba, de továbbra is részt vett a Tanszék szakmai életében, jelen volt minden összeövetelünkön. Számíthattunk rá.

Vándorútja véget ért. Kérésének megfelelően halmait – szülőfalujában – örökre elnyelte a Vág folyó, de emléke bennünk és sokakban örökké él.

*Szegedi Tudományegyetem
Juhász Gyula Pedagógusképző Kar
Általános és Környezetfizikai Tanszék*

Lámpás a múltból, út a jövő felé... – Szalay Sándorra emlékeztünk

2011. október 7-én a Nyíregyházi Evangélikus Kosuth Lajos Gimnázium 205 éves falai közt harmadik alkalommal adóztunk iskolánk volt diákja, *Szalay Sándor* emlékének.

2009-ben, születésének századik évfordulóján szerveztünk tudomást arról, hogy az intézmény az ország egyik jeles, jelentős és hűséges természettudósának, valamint édesapjának adott otthont a tudós ifjúkorában. A centenáriumi megemlékezést követően kötelességünknek érezzük, hogy örökségünkhöz méltó, a hagyatékot ápoló utódokként évente egy napot a természettudomány magasabb szintű művelésére fordítsuk, ezzel pedig iskolánk volt diákja előtt tisztelgünk.

E napon az iskola dísztermében a reggeli órától előadások zajlottak, a délelőtti órákban iskolánk diákjai szélesítették társaik ismereteit, mélyítették tudásukat.

Fél kilenctől hallhattunk Szalay Sándor életéről, családjáról, és ifjú előadónk segítségével kicsit közelebb került a hallgatóság a tudóshoz és az emberhez egyaránt. Az emlékezést követően az *Atommag* évének jegyében az atom felépítéséről, a mag megismerésének folyamatáról, átalakulásáról folytak az előadások.

Meséltek a diákok a csillagokban zajló folyamatokról, a CERN-ben folyó kísérletekről, de tájékoztattak bennünket az év tragikus fukushimai eseményeiről is.

Az aktualitások jegyében igyekeztünk az előadások témáját meghatározni, ezért került napirendre a 2011. év első felében „felébredt” Nap, és a napkitörések folyamata, ciklusa, élő és elektronikai rendszerekre kifejtett hatásai.

Az év első őszi hónapjában földre érkező műhold adta az aktualitását annak, hogy tájékoztassuk diákjainkat a Naprendszerben történő kutatási programok egy részéről is.

A tanulók által tartott előadások 10-20 perces időintervallumokat öleltek fel (*1. ábra*).

11 órától meghívott vendégek szélesítették a hallgatóság ismereteit, tették érdekessé a fizika és a természettudomány megismerésének folyamatát: a diákok előadást hallhattak a debreceni ATOMKI PhD

1. ábra. Diák-előadás.



2. ábra. Angyal Anikó: Kicsi a por, de erős.

hallgatója, *Angyal Anikó* tolmácsolásában (*2. ábra*) a levegőben lévő aeroszolok és egyéb szennyeződések vizsgálatáról, a mért adatok elemzéséről, annak életünkre vonatkoztatott jelentőségéről.

12 órától *Tófalusi Péter*, egykori kollégánk tartott kísérletekkel tarkított előadást, amelyen a kísérletek elvégzése mellett a jelenségek magyarázatára is buzdította a közönséget, és maga is értelmezte az egyes folyamatokat.

Ezt követte a három évvel ezelőtt felállított emléktábla koszorúzása. Az emléktáblánál *Kovách Ádám*, iskolánk volt diákja, a debreceni ATOMKI munkatársa tartott ünnepi beszédet (*3. ábra*). Jelentős mértékben köszönhetjük neki azt, hogy immár harmadik alkalommal adózhatunk Szalay Sándor emlékének: ő minden rendezvényünkre ellátogat, tanácsaival segítségünkre van, az emlékezést pedig meghittebbé teszi.

3. ábra. Kovách Ádám emlékbeszédet tart a Szalay-táblánál.



A koszorúzást követően az iskola dísztermében a „nagyok” vették át a főszerepet: a 2012/2013 tanévtől a Nyíregyházi Evangélikus Kossuth Lajos Gimnáziumban terveink szerint megkezdődik az első fizika orientációjú osztály oktatása. Ezen alkalommal általános iskolai tanárok és érdeklődő diákok számára fórumot szerveztünk. A délutáni eseményen iskolánk igazgatónöje, *Tar Jánosné* beszámolt a tervezett osztály indításáról, vázolta a tanítási időegység és a tananyag feldolgozási módjának változásával kapcsolatos terveinket. Az új osztály indításával új utak, kihívások felé fordul gimnáziumunk. Ez a lépés a természettudomány felé egyben lehetőség arra, hogy méltók lehessünk múltunkhoz is.

Természetesen arról sem feledkeztünk meg, hogy az iskola befejezését követő utat is megmutassuk az érdeklődőknek: a délutáni előadók között köszöntöttük *Hadházy Tibort*, aki a Nyíregyházi Főiskola fizika tanszékét képviselte, és nem utolsósorban egykor maga is iskolánk tanulója volt. Az ő beszámolójában a tárgy oktatásának jövője, lehetőségei bontakozhattak ki előttünk. A Nyíregyházi Főiskola rektorhelyettese, *Kovács Zoltán* is elfogadta a meghívásunkat, és fantasztikus előadást tartott első matematikai élményeivel kapcsolatban a legismertebb irracionális szám vizsgálatáról (4. ábra). Mindemellett természetesen beszélt a Nyíregyházi Főiskolán rendelkezésre álló lehetőségekről, buzdítva a diákokat arra, hogy már a középiskolai tanulmányok alatt is kapcsolódjanak be a főiskolán folyó tudományos kutatásokba.

A Debreceni Egyetem szintén két előadóval tette gazdagabbá programunkat: *Csige István Földünk gyilkos lehelete* címmel a hallgatóság széles körének nyújtott előadásával maradandó élményt, miközben képes, elemi szinten is érthető módon ismertetett meg mindannyiunkat a barlangok titkaival.

Egry Sándor a diákok későbbi jövőjére fókuszálva a természettudományt „kicsit is” jól értő és művelő végzett hallgatók lehetőségeiről mesélt a díszterem közönségének. Természetesen tőle is kaptunk emelt tudományos fejtegetést.

Az előadások lezajlottak, de a nap eseményei még nem értek véget. Délután 4 órától iskolánk néhány,



4. ábra. Hadházy Tibor és Kovács Zoltán délutáni előadók.

előző években végzett tanulója látogatott el hozzánk. A látogatás egyik fő célja az volt, hogy kialakítsunk egy „Kossuthos segítő-kéz” kapcsolatrendszerrel a felsőoktatási intézményekben tanuló volt Kossuthos diákok és az intézmény falait elhagyni készülő végzős diákok között. E kapcsolat lehetőséget adna arra, hogy tanácstalan diákjaink olyan információkhoz juszanak egykori tanulóink révén, ami által lehetőségük lesz megfontolt döntést hozni továbbtanulásukról. Ugyanakkor fontosnak tartjuk, hogy az iskolánkból éppen elinduló, néha bizonytalan, tájékozatlan, rutintalan „kis golyát” a felsőoktatás falai közt ismerős, valóban segítő kezek vegyék körül.

A megjelent diákok örültek a kezdeményezésnek és szívesen vállalták az alapító tagok szerepét. Természetesen az új kapcsolat megalapítása mellett kellemes és hasznos beszélgetést is folytathattunk a jelen és a közelmúlt eseményeivel, valamint a jövőre vonatkozó tervekkel kapcsolatban is.

Eltelt a megemlékezés napja. A résztvevők hasznosnak, kellemesnek, tanulságosnak értékelték azt. Munkatársammal, *Tóth Diánával*, valamint az iskola vezetőivel együtt már a jövőre vonatkozó terveket szőjük... mert a jelenünk akkor lesz igazán teljes, ha ápoljuk a múltunkat és mellette tervezzük a jövőnk építését is.

Leitner Lászlóné

Atommag Centenárium Emléke 2011 pályázat eredményhirdetése

A Magyar Nukleáris Társaság által meghirdetett *Atommag Centenárium Emléke 2011* pályázatra a regisztrált iskolák közül kilenc nyújtott be pályázatot. A Kuratórium tagjai először egymástól függetlenül értékelték, rangsorolták a beérkezett anyagokat. Figyelembe vették az év során szűrőpróbaszerűen meglátogatott rendezvényeken szerzett tapasztalatokat is. A külön-külön történő véleményezést követő egyeztetés során a Kuratórium egységes véleményt alakított ki.

Ennek alapján a Magyar Nukleáris Társaság által felajánlott, és a pályázatban is meghirdetett három díjat a következő iskolák nyerték:

MNT I. díj (500 eFt): *Boronkay György Műszaki Középiskola és Gimnázium, Vác* (valamennyi kuratóriumi tag az első díjra javasolta)

MNT II. díj (300 eFt): *Debreceni Egyetem Kossuth Lajos Gyakorló Gimnázium*

MNT III. díj (250 eFt): *Hunyadi János Gimnázium, Csorna*

A *SIF Alapítvány* (System International Foundation) felajánlott két, egyenként 250 eFt-os *különdíjat*. Ezeket a következő iskolák kapják:

Széchenyi István Gimnázium Dunaújváros

Szent László Általános Művelődési Központ Baja

A Kuratórium megállapította, hogy minden, pályázatot beadó iskola nagyon értékes és nagy munkát végzett, és ezért jutalmat érdemelne. Azt javasolta az Magyar Nukleáris Társaság elnökének, hogy tegye lehetővé a fennmaradó négy iskola díjazását is. Az MNT elnöke úgy döntött, hogy a Társaság a pályázatban kiírt III. díj mértékét 200 eFt-ról 250 eFt-ra emeli, és különdíjat ajánl fel a többi, pályázatot beadott iskolának.

Ennek alapján az *MNT különdíjait* (50 eFt) a következő iskolák kapják (névsorban):

Energetikai Szakközépiskola, Paks

Petőfi Sándor Gimnázium, Budapest

SEK Budapest, Óvoda, Általános Iskola és Gimnázium,

Vajda János Gimnázium, Keszthely

Valamennyi díjazottnak a Kuratórium és a magam nevében őszintén gratulálok.

A díjak átadására, és az első három helyezett – egyenként 20 perces – előadására a Magyar Nukleáris Társaság Ünnepi Közgyűlésén (2011. december 1., 13 óra) kerül sor.

Az MNT Ünnepi Közgyűlésének helye: Magyar Vilamos Művek székház, Budapest, III. Szentendrei út 207–209.

Az Ünnepi Közgyűlésre valamennyi, pályázatot benyújtó iskola delegációját meghívjuk. A delegációkban tanárok és diákok is lehetnek.

Sükösd Csaba, a Kuratórium elnöke

Lovas István köszöntése

Lovas István fizikust, az MTA rendes tagját köszöntötték 80. születésnapja alkalmából 2011. október 24-én az MTA Atommagkutató Intézetében. Lovas István a magyar fizika, különösen az elméleti magfizika



Pálkás József köszönti Lovas Istvánt.

kiemelkedő alakja. Budapesten, Debrecenben, külföldi intézményekben kifejtett gazdag tudományos kutató és oktató tevékenységében a debreceni kötődés fontos megnyilvánulása volt, hogy 1986-tól 1992-ig a Kossuth Lajos Tudományegyetem (ma: Debreceni Egyetem) elméleti fizikai tanszékének vezetője volt. Az ünnepségre összegyűlt munkatársak, tanítványok köszöntései és előadásai lehetőséget adtak tevékenysége néhány fontos elemének felidézésére. Köszöntőt mondott *Pálkás József*, az MTA elnöke, *Sólyom Jenő*, az MTA Fizikai Tudományok Osztályának elnöke, *Sailer Kornél*, a DE TTK dékánja, *Bitskey István*, az MTA DAB elnöke, *Trócsányi Zoltán*, a DE professzora és *Bondor Károly*, a Nagyváradi Egyetem

professzora. A következő előadások hangzottak el: *Végh László* (Atomki, Elméleti Fizikai Osztály): *Lovas István, a tanár*; *Wolf György* (RMKI, Elméleti Fizikai Főosztály): *Lovas István és az anizotrópia a nehézion-ütközésekben*; *Kovács Tamás György* (PTE, Elméleti Fizikai Tanszék): *Anderson-lokalizáció kvarkgluon plazmában*; *Nagy Sándor* (DE, Elméleti Fizikai Tanszék): *Infravörös fixpont és korrelációs hossz a skalártérelméletben*; *Bíró Tamás Sándor* (RMKI, Elméleti Fizikai Főosztály): *Lovas István és az Acta Physica Hungarica*. Ezután állófogadásra került sor, ahol pohárköszöntőt mondott *Dombrádi Zsolt*



Lovas István az ünneplők sorában.

(Atomki) és *Szőkefalvi-Nagy Zoltán* (RMKI). Lovas István megköszönte a jókívánságokat, és arról is megemlékezett, hogy pályája kezdetén munkatársa volt az Atomkinak is *Szalay Sándor* alapító igazgató vezetése alatt.

Máté Zoltán, MTA Atomki

Jövőnk energiája



paksi atomerőmű