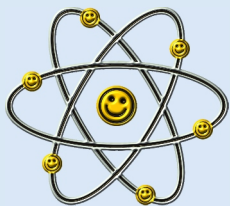


fizikai szemle



2014/5



A fizika mindenkéé

A természettudományok és modern technikai alkalmazásaik egyre nagyobb teret hódítanak mindennapi életünkben. Ugyanakkor mindannyian szomorúan tapasztaljuk, hogy a diákok körében rohamosan csökken a természettudományok, köztük a fizika iránti érdeklődés.

Nekünk, fizikusoknak és fizikatanároknak, a fizikával hivatásszerűen foglalkozóknak mindenképpen feladatunk, sőt kötelességünk, hogy ezt a tendenciát megváltoztassuk. Ebben várjuk a fizikát szeretőket, a fizika iránt érdeklődőket segítségét.

Mindenki számára szeretnénk megmutatni, hogy a fizika sokszínű, érdekes, a világról fontos és alapvető információkat nyújtó, ugyanakkor mindennapi életünket is befolyásoló, kézzelfogható és nélkülözhetetlen tudomány. Alkalmazásai megjelennek más tudományágakban és a technika számos területén, a mobiltelefonról a GPS-en át az orvosi vizsgálati módszerekig (PET, MRI stb.). Jövők fontos kérdéseiben (például az atomenergia alkalmazása, vagy a klímaváltozással kapcsolatos problémák ügyében) sem dönthetünk felelősen, ha a felmerülő kérdések fizikai hátterét nem ismerjük.

Célunk, hogy minél többen kerüljenek közel a fizikához, ismerjék meg kérdéseit, válaszait, problémáit és alkalmazásait. Ezért tenne jó szolgálatot az ügynek, ha az ország figyelmét egy napra a fizikára irányíthatnánk.

E célból az Eötvös Loránd Fizikai Társulat 2015. április 18-ára meghirdeti *A fizika mindenkéé* című országos rendezvényét.

Felkérjük az ország összes fizikatanárát, hogy tanítványaikkal együtt legyenek szószólói a fizika ügyének, segítsenek minél közelebb hozni a fizika tudományát az ország közvéleményéhez. Felkérjük a fizikusként és rokon területeken dolgozókat, az érdeklődő középiskolásokat, egyetemi hallgatókat, valamint mindazokat, akik nem szakmabeliként, csak a Világegyetem rejtélyeire és a természet törvényeire rácsodálkozóként találkoztak ezzel az érdekes és izgalmas tudománnyal, segítsenek ezt az élményt minél több emberrel megosztani. Hiszen *a fizika mindenkéé!*

Elképzeléseink szerint az országos rendezvény számos, ugyanazon a napon (2015. április 18.) megvalósuló helyi kezdeményezésű program sokszínű együttese lenne – határt csak a fantázia szabhat.

Néhány ötlet, példa: tanárok és/vagy diákok kísérleti bemutatói, mérései, csoportos versenyek, vetélkedők, túrák, akadályversenyek, szakmai és/vagy fizikatörténeti előadások, új tudományos felfedezésekhez, szenzációkhoz, vagy napjaink fontos tudományos és tudománypolitikai kérdéseire kapcsolódó előadások, játékok, fizikai képrejtvényverseny – további ajánlatok weblapunkon:

<http://afizikamindenkie.elte.hu>

a *Rendezvények* adatbázisában és az *Ötlettárban*.

Szívesen veszünk minden egyéni programelképzelést, ötletet. Kérjük, hogy aki helyi esemény szervezésével akar csatlakozni országos rendezvényünkhöz, jelentkezzen be weboldalunkon, adja meg adatait, és írjon a tervezett helyi programról szóló néhány soros összefoglalót. Ezeket a terveket a rendezvény weboldalán – a rendező nevével együtt – egy szabad, nyilvános, mindenki által hozzáférhető (természetesen ingyenes) adatbázisban tesszük elérhetővé. Emellett a weblapon *Ötletbörze* is működik, ahol a felvetődő, de nem feltétlenül az ötletgazda által megvalósítandó gondolatokat lehet megvitatni. A letisztult javaslatokat az *Ötlettárban* tesszük közé. A beküldött információk csak szerkesztői jóváhagyás után jelennek meg a weblapon. Ez az adatbázis és ötlettár segítség és támpont lehet más helyi programok kialakításában is.

A rendezvény után beszámolót, fotót, videót várunk a helyi eseményekről. Ezeket szintén közzéteszük a weboldalunkon. Így az első (és reméljük, nem utolsó) országos rendezvény adatbázisa hasznos ötletekkel, tapasztalatokkal járulhat hozzá más későbbi helyi események szervezéséhez is.

Társulatunk kiemelt feladatának tartja, hogy a sikeres helyi programoknak médiafigyelmet biztosítson.

A fizika mindenkéé rendezvényegyüttes teljes egészében nonprofit és politikamentes.

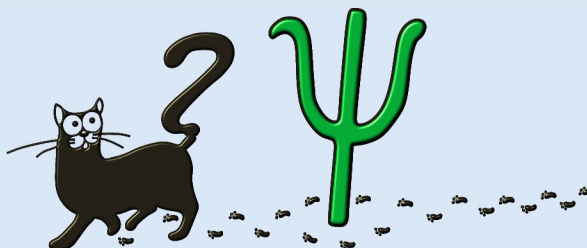
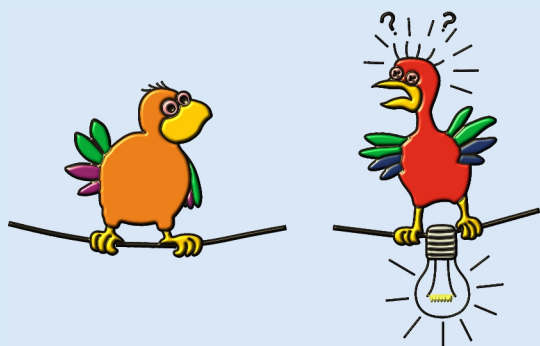
A tervezett rendezvény sikere mindannyiunkon múlik! Hiszen *a fizika mindenkéé!*

Zawadowski Alfréd
az ELFT elnöke

Kürti Jenő
az ELFT főtitkára

Cserti József, Fábrián Margit, Király Andrea,
Dávid Gyula

A fizika mindenkéé eseménysorozat koordinátorai



Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

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

**Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat
havonta megjelenő folyóirata.**

**Támogatók: a Magyar Tudományos
Akadémia Fizikai Tudományok Osztálya,
az Emberi Erőforrások Minisztériuma,
a Magyar Biofizikai Társaság,
a Magyar Nukleáris Társaság
és a Magyar Fizikushallgatók Egyesülete**

Főszerkesztő:

Szatmáry Zoltán

Szerkesztőbizottság:

**Bencze Gyula, Czitrovsky 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 Hunveyor-4 űrszondamodell
a Szaharában 2013 februárjában
a MARS2013 elnevezésű analóg
teregyakorlaton.**

TARTALOM

<i>Erdélyi Zoltán, Balogh Zoltán:</i> Diffúzió és szilárdtest-reakció egy tű hegyén	146
<i>Bereczky Réka Judit, Tőkési Károly, Aleksandar R. Milosavljević, Bratislav P. Marinković:</i> 200 eV energiájú elektronok átvezetése egyedi, teflon kapillárison	153
<i>Erdélyi Miklós, Sinkó József:</i> Optikai pointillizmus: a lokalizációs optikai mikroszkópia	156
<i>Vidovszky István:</i> A Budapesti Kutatóreaktor fűtőelemeinek sorsa	160

A FIZIKA TANÍTÁSA

<i>Bokor Nándor:</i> A gravitációról – 1. rész	165
<i>Hudoba György:</i> Űrszondamodell-építés – út a fizikához	169
<i>Bognár Gergely:</i> Fehér Ipoly Kísérleti Természettana „Az atomoktól a csillagokig” (<i>Király Andrea, Dávid Gyula, Csordás András, Cserti József</i>)	171
	173

KÖNYVESPOLC

174

HÍREK – ESEMÉNYEK

152, 176

<i>Z. Erdélyi, Z. Balogh:</i> Diffusion and solid state reaction processes on a needle's point	
<i>R. J. Bereczky, K. Tőkési, A. R. Milosavljević, B. P. Marinković:</i> Transporting 200 eV electrons through a single teflon capillary tube	
<i>M. Erdélyi, J. Sinkó:</i> Optical pointillism: localizing optical microscopy	
<i>I. Vidovszky:</i> What will be done with the fuel elements of the Budapest Research Reactor	

TEACHING PHYSICS

<i>N. Bokor:</i> On gravitation – part 1	
<i>G. Hudoba:</i> Building spacecraft models – one way to physics	
<i>G. Bognár:</i> I. Fehér's renowned first Hungarian textbook on experimental physics “From atoms to stars” – a series of lectures (<i>A. Király, J. Dávid, A. Csordás, J. Cserti</i>)	

BOOKS, EVENTS

<i>Z. Erdélyi, Z. Balogh:</i> Diffusion und Festkörperreaktionen auf der Spitze einer Nadel	
<i>R. J. Bereczky, K. Tőkési, A. R. Milosavljević, B. P. Marinković:</i> Der Transport von 200 eV-Elektronen durch eine einzige Teflonröhre	
<i>M. Erdélyi, J. Sinkó:</i> Pointillismus in der Optik: die lokalisierende optische Mikroskopie	
<i>I. Vidovszky:</i> Was geschieht mit den Brennstoffelementen des Budapester Forschungsreaktors?	

PHYSIKUNTERRICHT

<i>N. Bokor:</i> Über die sogenannte Schwerkraft – Teil 1.	
<i>G. Hudoba:</i> Ein Weg zur Physik: der Bau von Raumsondenmodellen	
<i>G. Bognár:</i> I. Fehér's berühmtes erstes ungarisches Lehrbuch der Experimentalphysik „Von den Atomen bis zu den Sternen“ – eine Vortragsreihe (<i>A. Király, J. Dávid, A. Csordás, J. Cserti</i>)	

BÜCHER, EREIGNISSE

<i>З. Эрдеји, З. Балог:</i> Диффузия и реакции на острие уголки	
<i>Р. Ю. Берекция, К. Тёкеши, А. Р. Милосавлевич, Б. П. Маринкович:</i> Перевоз электронов через единственную тefлонную трубку	
<i>М. Эрдеји, Й. Шинко:</i> Локализационная оптическая микроскопия	
<i>И. Видовский:</i> Что будет с активными элементами будапештского атомного реактора?	

ОБУЧЕНИЕ ФИЗИКЕ

<i>N. Bokor:</i> О гравитации – часть первая	
<i>Г. Худоба:</i> Постройка модели космических зондов – задача для физиков	
<i>Г. Богнар:</i> Знаменитый первый учебник экспериментальной физики И. Фегера Ряд лекций «От атомов к звездам» (<i>А. Кирай, Д. Лавид, А. Чордаи, Й. Черти</i>)	

КНИГИ, ПРОИСХОДЯЩИЕ СОБЫТИЯ

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

megjelenését támogatják:



DIFFÚZIÓ ÉS SZILÁRDTEST-REAKCIÓ EGY TŰ HEGYÉN

Atommozgási folyamatok vizsgálata atompróba tomográfia módszerrel

Erdélyi Zoltán – Debreceni Egyetem, Szilárdtest Fizika Tanszék
Balogh Zoltán – Műnsteri Egyetem, Műnster, Németország

Csökkenő karakterisztikus hosszak mellett növekszik a határfelületek sűrűsége, amely jelentősen befolyásolhatja a nanostruktúrájú anyagok fizikai tulajdonságait. A határfelületek élessége, a határfelületeknél létrejövő fázisok kialakulásának és növekedésének ismerete technológiai szempontból kritikus lehet. A határfelületek vizsgálata azonban gyakran atomi szintű feloldású technikát igényel. Atompróba tomográfia (APT) segítségével 3 dimenzióban, atomi feloldással lehet rekonstruálni az anyag szerkezetét és kémiai elemeloszlását. Ehhez a mintát egy nanométer nagyságrendű görbületi sugárral rendelkező tű hegyére kell preparálni. A cikkből röviden bemutatásra kerül az APT-technika, valamint az azzal elért néhány érdekes eredményünk.

Az atompróba tomográfia módszer

A modern háromdimenziós (3D) vagy tomografikus atompróba a térion-mikroszkópia és a repülési idő tömegspektroszkópia „házastásából” jött létre [1]. A minta kis (<100 nm) görbületi sugarának köszönhetően néhány kV feszültség hatására a térerősség elég nagyvá válik a minta atomjainak ionizálására és deszorbeálására. A kilépő ionokat egy 2D detektorral analizáljuk, a repülési időből az ion tömeg/töltés aránya, a becsapódás helyéből pedig – egy megfelelő rekonstrukciós algoritmus segítségével – az atomnak a mintában elfoglalt eredeti helye számítható ki. Végül eredményképpen egy atomi koordináták sorozatából álló „virtuális mintát” kapunk, amelyben a tényleges analízist (például kiválások összetételének meghatározása, koncentrációprofil felvétele határfelületeknél stb.) elvégezhetjük.

Az atompróba-kísérletet így négy fontos fázisra bonthatjuk: minta-előkészítés, mérés, rekonstrukció és analízis.

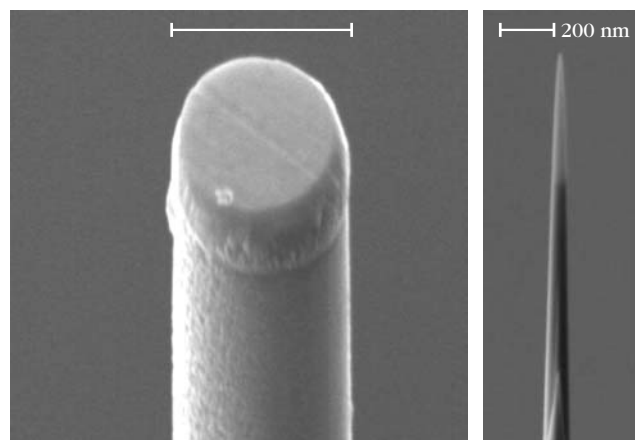
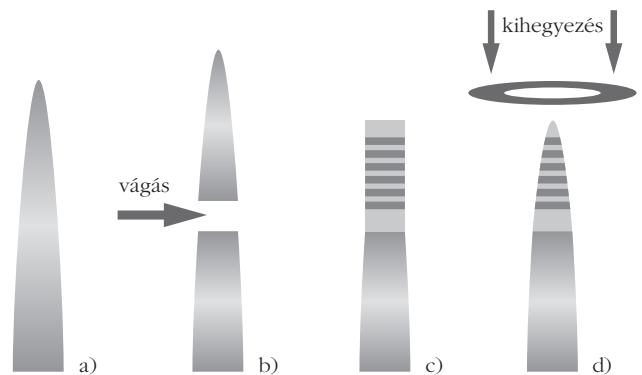
Minta-előkészítés

Az APT-minták legfontosabb tulajdonsága a kis görbületi sugár, amelyet többféle módszerrel érhetünk el. Legkönnyebb dolgunk a makroszkopikusan homogén, huzal geometriájú minták esetében van, ekkor csupán a megfelelő kémiai vagy elektrokémiai mara-

tási eljárást kell alkalmaznunk, és egy gyors, termelékeny módszerrel minták sokaságát állíthatjuk elő. A kémiai maratással keletkező felület ugyan definiálatlan, azonban az optimális geometriától való eltérés nagyon kis lokális görbületi sugarat és ez által nagy helyi térerősséget eredményez. Azaz a minta igen gyorsan eléri az optimális geometriát az APT-mérés folyamán.

Egy ilyen kémiailag maratott és APT- vagy térion-mikroszkóp segítségével megformált, mechanikailag stabil, nagy kritikus deszorpciós térerősséggel bíró fémhuzal (például W, Mo) hordozóként is alkalmazható a vékonyrétegek vizsgálatához. Amennyiben a réteg kellően vékony és a kritikus deszorpciós térerőssége alacsonyabb a hordozóénál, akkor a film APT-vel vizsgálható. Ez a módszer szintén gyors, hatékony mintagyártást tesz lehetővé. Ezzel a technikával néhány 10 nm vastagságú filmek mérhetők. Az így előállított rétegek görbültek és többnyire nanokristá-

1. ábra. a–d) APT-minta preparálása sík felületű W-hordozóra. Az elektronmikroszkópos képek a valós mintát mutatják a c) és d) fázisokban. Mindkét képen jól látható a W-hordozó és a tényleges minta határa.



A publikáció elkészítését a TÁMOP-4.2.2.A-11/1/KONV-2012-0036 számú projekt támogatta. A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg. Továbbá a vizsgálatokat az OTKA No. NF101329 és a Műnsteri Egyetem vendégprofesszori programja is támogatta.

lyosak. Amennyiben ezek a kritériumok problémát okozhatnak, más módszert kell választanunk.

Fókuszált ionnyaláb (FIB) segítségével is készíthetünk APT-mintákat. Egy relatíve termelékeny eljárás keretében először a W-tűk hegyét a FIB segítségével levágjuk. Ennek eredményeképpen egy igen sima felületű 1-3 μm átmérőjű sík W-hordozót kapunk. Ez a laterális méret a nanodiffúziós kísérletekben jelentősen meghaladja a tipikus diffúziós úthosszakat (azaz végtelen nagy méretű, sík hordozónak tekinthető). Erre a hordozóra már tetszőlegesen vastag réteget választhatunk le, amelyet különböző módon hőkezeltünk. Végül lépésként a mintát egy újabb FIB-lépésben kihegyezzük, hogy az atompróbában mérhető mintát kapjunk (1. ábra).

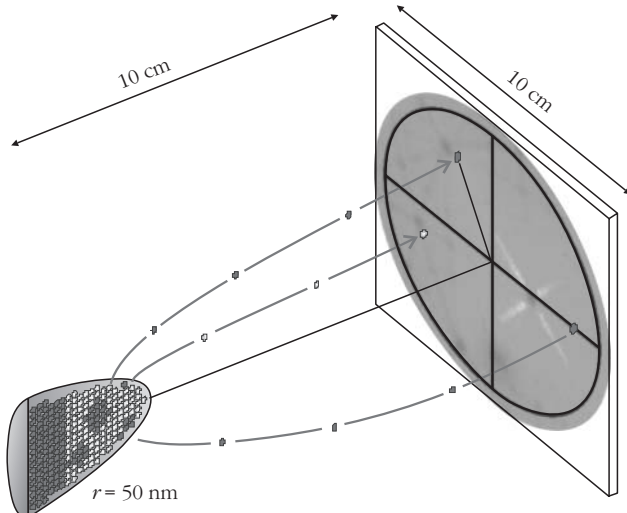
A FIB természetesen alkalmas arra is, hogy tömbi kiinduló anyagból vágjunk ki APT-mintákat. Első lépésként egy normál elektronmikroszkópos lamellát alakítunk ki, amelyből elektromosan vezetőkötőanyag használatával APT-mintákat rögzíthetünk a W-tűkre. Ezt ismét a minta kihegyezése követi.

Mérés

Az APT-mérés során a mintából egyes atomokat távolítunk el, majd ezen atomok repülési idejéből és az észlelt becsapódási pozíciójából meghatározzuk kémiai természetüket és kiindulási helyüket (2. ábra). Ehhez arra van szükségünk, hogy az elektromos tér általi deszorpció kivételével lehetőleg semmilyen más folyamat ne játszódjon le a mintában. Ennek érdekében a mintát kriogén hőmérsékletre (20-100 K) hűtjük.

A mérés során egy konstans alapfeszültséget kapcsolunk a mintára, ezt úgy választjuk meg, hogy a kritikus deszorpciós térorsségnél gyengébb elektromos teret keltsen. Mivel az elektromos tér általi deszorpció az Arrhenius-összefüggést követi ezért ilyen körülmények között gyakorlatilag nem lépnek ki ionok a mintából. A deszorpciót magát egy rövid (ps nagyságrendű) feszültség vagy hőimpulzussal válthatjuk ki (ez a gyakorlatban lézerezést jelent). Míg

2. ábra. Az APT-mérés elvi vázlata a jellemző geometriai méretekkel.



az első módszer jó elektromos vezető mintát igényel, addig a második esetben félvezető, szigetelő (akár szerves anyag is) minták is vizsgálhatók.

A korszerű nagyfeszültségű, nagyfrekvenciás elektronika néhány száz kHz impulzusrátát tesz lehetővé, míg a lézerrendszerekkel a MHz impulzusráta is elérhető. Egy tipikus kísérletben az alap- és impulzusfeszültséget úgy szabályozzuk, hogy a deszorpciós ráta 100 ciklusonként 0,5-5 atom legyen. Azaz óránként körülbelül tízmillió atomot gyűjthetünk be. A detektor maga a nukleáris mérés technikában is használt sokcsatornás analizátor (MCA), az APT esetében többnyire 100 mm körüli átmérővel. A detektor kialakítása miatt a beérkező atomokat csak akkor detektáljuk, ha az magát a csatornát találja el és nem a csatornák közötti térrészt. A detektálási határfok ezért 1-nél kisebb (a konkrét detektortól függően 0,45-0,75), azonban ez a hatás a többi lehetséges hibaforrás mellett nem számottevő. Fontos paraméter még a detektorrendszer nyílásszöge, vagyis, hogy a minta tengelyéhez képest milyen szögben kilépő atomokat vagyunk képesek begyűjteni. Ez a modern rendszerek esetében meghaladja a 30° -ot [2].

Rekonstrukció

A nyers mért adatsor a becsapódási helyek, repülési idők, valamint az alapfeszültség és a feszültségimpulzus/lézerenergia sorozata. A tömegspektrumot a repülési időből képezhetjük a geometria figyelembe vétele mellett [2].

Az APT-kísérlet legkritikusabb eleme az eredeti geometria visszaállítása. Az optimális rekonstrukciós algoritmus problémája napjainkban is nyitott kérdés, itt csupán két egyszerű, általánosan elterjedt módszert mutatunk be röviden. Mindkettő azon a tényen alapul, hogy a deszorpció alapvetően determinisztikus folyamat, vagyis azok az atomok távoznak a minta felületéről, ahol a helyi térorsség a legmagasabb. Ennek következtében a minta alakját a külső elektromos tér kontrollálja, a minta jó közelítéssel egy félgömb alakú csúcsban végződik. Ezen félgömb sugarának és a becsapódás helyének ismeretében az elektrosztatikus törvények alkalmazásával az atom kiindulási helye kiszámítható a félgömbön. Amennyiben ismerjük a félgömb sugarát és az azt alkotó atomok térfogatát, akkor könnyen kiszámíthatjuk, hogy mennyi atomból áll egy réteg. Egy teljes réteg eltávolítása után az egy rácsparaméterrel mélyebben található réteg atomjai következnek a sorban. Az APT fontos jellemzője a szigorú értelemben vett felületérzékenység; csak a szabad felület atomjai (sőt csak bizonyos atomok a szabad felületen) deszorbeálódnak az elektromos tér hatására.

Makroszkopikusan homogén minta esetén feltételezhetjük, hogy a kritikus deszorpciós tér állandó, vagyis stacionárius deszorpciós ráta mellett a mintára adott feszültség egyenesen arányos a minta görbületi sugarával. Az atomok eredeti (x, y) pozíciójának kiszámításakor az aktuális feszültségértékből levezetett

görbületi sugárral számolhatunk. A z koordinátát az egy réteget alkotó atomok számából vezethetjük le, minden egyes új atom beillesztése után a z koordináta $\Omega/2\pi r^2 \eta$ értékkel növekszik, ahol Ω az atomi térfogat, míg η a detektálási határfok.

Amennyiben inhomogén (például multiréteg mintát) vizsgálunk, más módszert kell alkalmaznunk. A legegyszerűbb feltételezés, hogy a minta egy félgömbbel lezárt kúp alakkal rendelkezik és ezt az alakot az egész folyamat során megtartja. Ekkor a görbületi sugár a z koordináta függvénye lesz, míg a z koordinátát ugyanazzal az összefüggéssel számolhatjuk, mint az előző esetben.

E módszerek segítségével bármilyen mérési adatsort rekonstruálhatunk bármilyen tetszőleges formához; vagyis e technikák önmagukban nem garantálják a helyes eredményt. Az adott rekonstrukció jóságát különböző keresztellenőrzésekkel valószínűsíthetjük: a deszorpciós térerősség/mintageometria ésszerűen viselkedik, az atomi síkok távolsága konstans, az atomi sűrűség nem mutat jelentős fluktuációt, a rétegek geometriája megfelel az elvárásoknak stb. Összegezve: az APT-adatok rekonstrukciója a kísérlet kulcseleme, és ez a lépés jelentős tapasztalatot követel mind az APT-módszerben, mind az általános fizikai/anyagtudományi háttérismeretek terén. Természetesen a rekonstrukciót az ezeket az ismereteket felhasználó modern számítógépes algoritmusok végzik, amelyeket folyamatosan fejlesztenek.

Analízis

A sikeres rekonstrukció eredményeképpen atomi pozíciók sorozatát kapjuk meg, azaz lényegében egy 3D virtuális mintát. Ez a virtuális minta az eredeti atomok nagyjából felét tartalmazza, optimális esetben (amelyet igen sok különféle minta esetén elég jól megközelíthetünk) atomi síknak megfelelő mélységi és nanométer alatti laterális feloldással. Mivel az elektromos tér általi deszorpció csak magát a deszorbeált atomot érinti, így ez a feloldás az egész térfogatban állandó, szemben az ionbombázásos módszerekkel.

Azt, hogy milyen analitikai módszert alkalmazunk, természetesen attól függ, milyen információra vagyunk kíváncsiak. Az alábbiakban néhány lehetőséget mutatunk be.

- 1D koncentrációprofil; ez a legegyszerűbb alkalmazás, egy kiválasztott térfogatban egy adott irányban felvett koncentrációprofil. Ami különlegessé teszi ezt a mód-

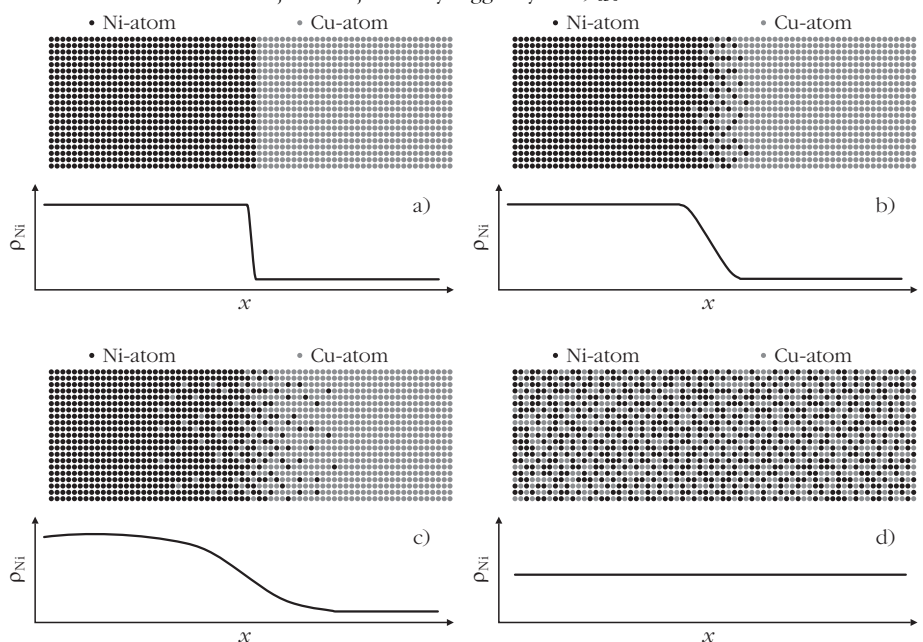
szert az az APT lokális jellege. Az analizálandó térfogat a minta bármely pontján lehet (például egy eltemetett határfelület környezete) és az analízis iránya sem kötött, adott esetben akár egy görbe mentén is történhet (például egy általános, görbült szemcsehatár menti koncentrációprofil).

- Kiválások azonosítása; az APT egyik gyakori felhasználása a különféle kiválások összetételének és gyakoriságának meghatározása. Erre napjainkban többféle módszer áll a rendelkezésünkre. A legrégebbi az úgynevezett izokoncentrációs felületeken alapul, ehhez minden térfogatelemhez meghatározzuk a lokális koncentrációt, majd azokat a térfogatelemeket megjelöljük, ahol ez egy bizonyos határértéknél nagyobb. Mivel az atomi koordináták is a rendelkezésünkre állnak, ezért különféle klaszterkereső algoritmusokat is bevetethetünk (például a kisebbségi atomok közötti legkisebb távolság). Amennyiben a fázisokat elkülönítettük, például lokális tömegspektrumok révén megállapíthatjuk az összetételüket.

- Metszeteket készíthetünk bármely orientációban, amelynek révén a mikrostruktúrára jellemző információkat nyerhetünk. Az APT ugyan csak igen ritka esetben szolgáltat krisztallográfiai információkat, azonban a szemcsehatárok igen gyakran kémiai markerek alapján is azonosíthatók, így tárva fel a mikrostruktúrát.

- Az APT kombinációja különböző elektronmikroszkópiai módszerekkel (korrelatív APT) napjainkban gyorsan terjed. E technikának két fő előnye van: egyrészt az elektronmikroszkópos információ segíti a pontosabb rekonstrukciót, másrészt az APT által adott lokális kémiai információt korreláltathatjuk az elektronmikroszkóp által szolgáltatott strukturális információval.

3. ábra. A Ni és Cu elválasztó, kezdetben éles határfelület időben [(a)–(d) sorrend] elmosódik, azaz mind a Ni, mind pedig a Cu koncentrációgradiense időben ellasszódik (az ábrán az alsó panelek csak a Ni koncentrációját mutatják a hely függvényében) [3].



Érdekes eredmények

Határfelületek élesedése elmosódás helyett

Fick első egyenlete – egy dimenzióban:

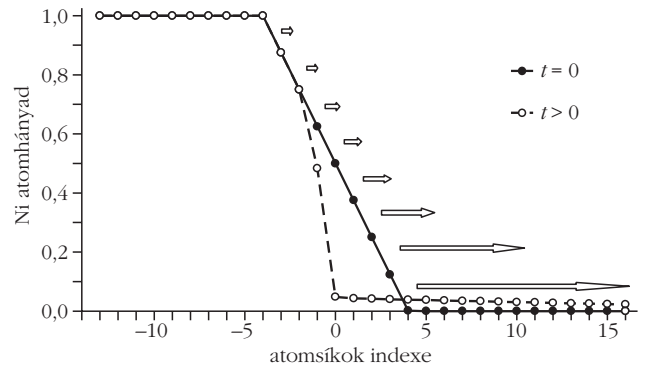
$$j_i = -D_i \frac{\partial \rho_i}{\partial x}$$

kimondja, hogy az diffundáló részek (tipikusan atomok) j_i fluxusa arányos azok ρ_i koncentrációja gradiensevel. A D_i arányossági tényező neve diffúziós együttható. A kifejezésben szereplő i index a diffundáló részek értékét veszi fel, például egy A-B kétalkotós rendszer esetében $i = A, B$. A negatív előjel pedig azt fejezi ki, hogy amennyiben $D_i > 0$, akkor az atomok mindig a koncentráció gradiensevel ellentétes irányban, azaz a koncentráció csökkenésének irányában áramlanak. Ebből arra következtethetünk, hogy a koncentrációgradiens időben csökken. Ez A és B anyag (amelyek kölcsönösen korlátlanul oldják egymást, ekkor $D_i > 0$, $i = A$ -ra és B -re is), például Ni és Cu elválasztó határfelület esetében azt jelenti, hogy a határfelület időben elmosódik, azaz az alkotók koncentrációgradiense időben ellaposodik (3. ábra).

Szilárdtestekben belátható időn belül mindez – általában – csak néhány száz °C hőmérsékleten következik be. A határfelületek a valóságban sohasem atomilag élesek, hanem többé-kevésbé elmosódtak. Azaz a leggondosabb gyártás mellett sem kapunk a 3.a ábrán látható tökéletes határfelületet, hanem inkább a 3.b ábrán látható határfelülethez hasonlót. Mindebből természetes módon arra következtethetünk, hogy a határfelület elmosódottsága növekedni fog az idő előrehaladtával abban az esetben is, ha kezdetben nem volt tökéletesen éles.

Noha Fick a diffúzió első matematikai leírását már több mint 150 éve megalkotta, senki nem gondolt rá, hogy ez másképpen is történhet. 2002-ben publikáltak [4] azt a tanulmányunkat, amelyben felvetettük annak lehetőségét, hogy egy kezdetben elmosódott határfelület ki is élesedhet Ni/Cu típusú, azaz kölcsönösen korlátlanul oldékony (ideális) rendszerek esetében is.¹ A jelenség magyarázata az, hogy a D_i diffúziós együttható nem konstans, hanem koncentrációfüggő együttható. Ez könnyen belátható, hiszen egy A atom diffúziós együtthatója szinte mindig nagyságrendekkel különbözik a tiszta A és B anyagban; például Ni/Cu esetében mind a Ni-, mind pedig a Cu-atomok diffúziója akár 6-10 (hőmérsékletfüggő) nagyságrenddel is gyorsabb a Cu-ben, mint a Ni-ben. Jó közelítéssel mondható, hogy a koncentrációtól általában exponenciálisan függ. Ezért, ha például egy kezdetben lineárisan elmosódott határfelületet tekin-

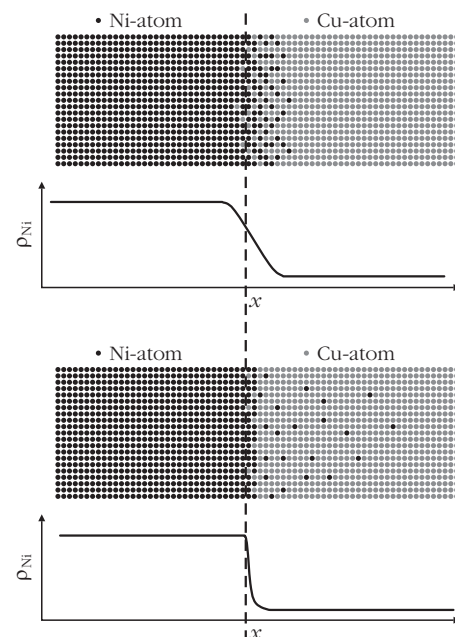
¹ Olyan esetekben, amikor a rendszert alkotó elemek nem oldják egymást korlátlanul, hanem csak részben (fázisszeparálódó rendszerek), már régen ismeretes volt, hogy határfelületek kiélesedhetnek. Ez a rendszerben fellépő kémiai hajtóerővel magyarázható, amely az elemek szeparálódásához vezet.

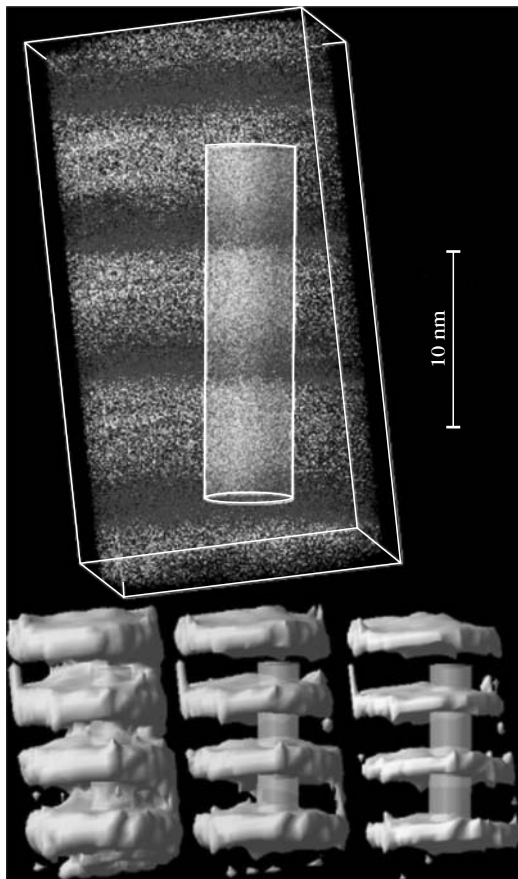


4. ábra. Ni atomhányad (vagy atomtört, azaz az összes atomok hányad része Ni) a távolság (atomsíkok indexe) függvényében (kinetikus átlagtér modell szimuláció alapján). A nyílak a Ni-atomok fluxusát mutatják sematikusan a nyílak kezdőpontjának közelében. A nyílak hossza a fluxus nagyságát érzékelteti. Ez a fluxuseloszlás nyilvánvalóan a koncentrációgradiens növekedéséhez (szaggatott görbe), azaz a határfelület élesedéséhez fog vezetni.

tünk (4. ábra), akkor látható, hogy Fick első egyenletében a koncentráció gradiense konstans lesz, azaz a fluxus helyfüggése pontosan követni fogja a diffúziós együttható helyfüggését. Ni/Cu esetében ez azt jelenti, hogy a fluxus nagysága exponenciálisan növekszik a Ni-től a Cu felé haladva. Ennek megfelelően időegység alatt sokkal több Ni-atom diffundál a Cu-mátrixhoz közeli határfelületi részből a tiszta Cu-mátrixba, mint a Ni-mátrixhoz közeli határfelületi részből. Ez nyilvánvalóan a koncentrációgradiens növekedéséhez, azaz határfelület élesedéséhez fog vezetni. Tehát a határfelület élesedése – érdekes módon – Fick első egyenlete alapján is megérthető, annak ellenére, hogy az egyenlet fennállásának körülbelül 150 éve során mindenki a határfelület elmo-

5. ábra. Határfelület élesedése atomi szinten szemléltetve. A Cu-mátrixban nagyságrendekkel mozgékonyabbak az atomok, mint a Ni-ben. Így azok a Ni-atomok, amelyek már a Cu-mátrixban vannak könnyen tudnak tovadiffundálni a Cu-mátrixba.





6. *ábra.* Ni/Cu multiréteg tomografikus rekonstrukciója analizishengerrel. A Ni-atomokat sötétebb, a Cu-atomokat pedig világosabb pontok jelölik. Alul, balról jobbra a 30, 50 és 70%-os izokoncentrációs felületek láthatók, amelyek segítségével meghatározható a lokális koncentrációgradiens.

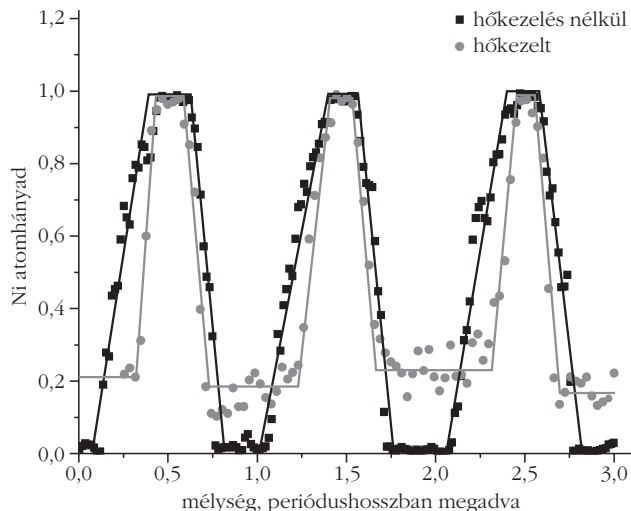
sódását társította ehhez az egyenlethez (s talán még mai is sokan így tesznek).

Az élesedés könnyen megérthető egyenletek nélkül is. Mint fentebb említettük, a Cu-mátrixban nagyságrendekkel mozgékonyabbak az atomok, mint a Ni-ben. Így azok a Ni-atomok, amelyek már a Cu-mátrixban vannak (a határfelület Cu-hez közelebbi része, lásd 5. *ábra* szaggatott vonal jobboldala) könnyen tudnak tovadifundálni a Cu-mátrixba, míg a Cu-atomok nem tudnak behatolni a Ni-mátrixba. Ezért megfelelő hőkezelés után élesebb határfelület marad vissza.

A jelenséget első ízben szinkrotron röntgendiffrakció segítségével mutattuk ki Mo/V rendszerben [5]. A röntgendiffrakció az anyagban lévő elektronsűrűség-eloszlást méri, és ez alapján következtethetünk az elemeloszlásra.

Mindamellet, hogy a módszer jól kidolgozott és megalapozott elméleteken nyugszik, mindenképpen érdemesnek tartottuk a jelenség vizsgálatát egy, az atomokat direkt módon, három dimenzióban elemezni képes módszerrel is, azaz APT-vel.

A Ni/Cu multiréteges minták ionporlasztás segítségével készültek. Az elmosódott határfelületek a Ni és Cu kontrollált együttes porlasztásával kerültek kialakításra. A minták egy részét hőkezelés nélkül analizáljuk, míg a többit hőkezelések után [6]. A 6.

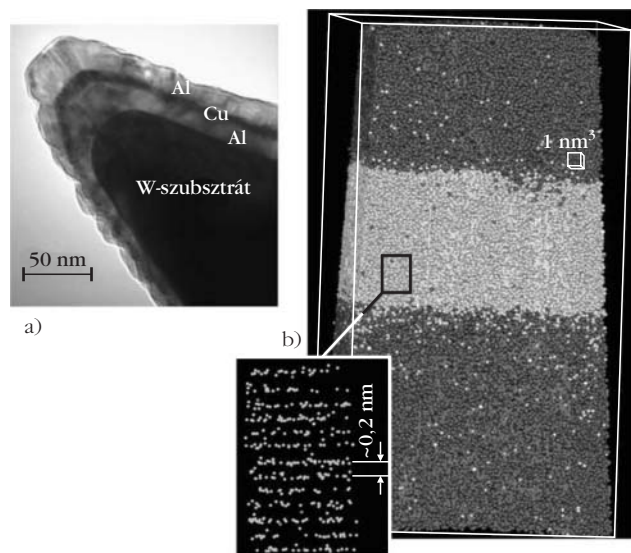


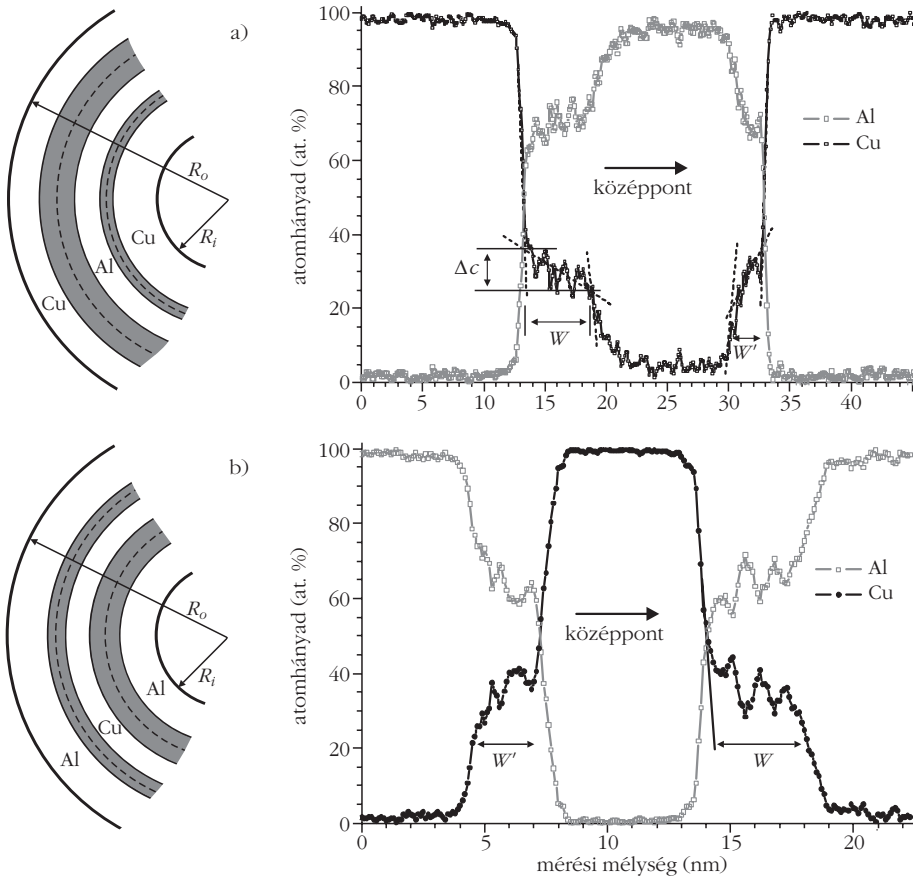
7. *ábra.* Ni koncentrációprofil egy hőkezelés nélküli és egy hőkezelt minta esetében. A hőkezelés nélküli minta esetében a Ni/Cu határfelületek élesebbek voltak mint a Cu/Ni. A kezdetben elmosódottabb Cu/Ni határfelületek élesebbé váltak, míg a relatíve éles Ni/Cu határfelületek gyakorlatilag változatlanok maradtak.

ábra egy minta tomografikus rekonstrukcióját mutatja. Az ábrán is látható analizishenger megfelelő pozicionálásával elérhető volt, hogy a minta azon térfogatát elemezzük, amely a vizsgálni kívánt jelenség szempontjából ideális. Esetünkben, minthogy térfogati diffúzió vezérelte a folyamatot, lényeges szempont volt, hogy olyan térfogatrész vizsgáljunk, amely mentes a diffúziós rövidzáraktól (például szemcsehatárok).

A 7. *ábra* a Ni koncentrációprofilját mutatja egy hőkezelés nélküli és egy hőkezelt minta esetében. Látható, hogy a hőkezelés nélküli minta esetében a Ni/Cu határfelületek élesebbek voltak, mint a Cu/Ni. A kezdetben elmosódottabb Cu/Ni határfelületek élesebbé váltak, míg a relatíve éles Ni/Cu határfelületek gyakorlatilag változatlanok maradtak.

8. *ábra.* a) Al/Cu/Al triréteg egy W-tű hegyén, TEM-kép. b) Egy triréteg tomografikus rekonstrukciója. A kicsi képen jól látható az atomi szintű feloldás.





9. ábra. Cu/Al/Cu trirétegek (a) esetében a külső, míg Al/Cu/Al trirétegek (b) esetében a belső határfelületnél növekedett gyorsabban az Al_2Cu fázis.

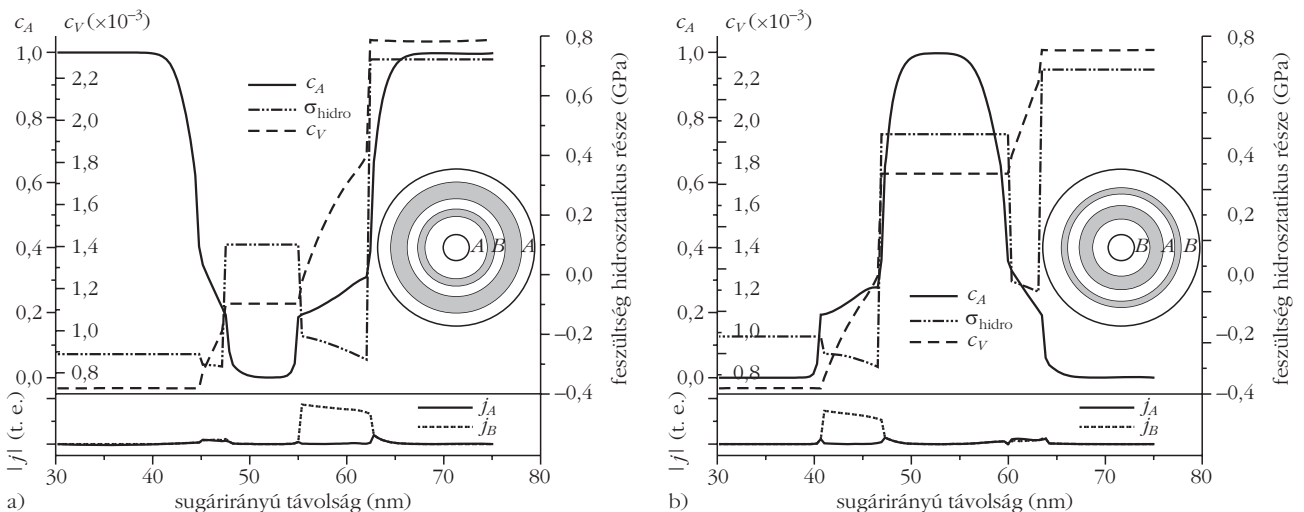
Aszimmetrikus fázisnövekedés nanorészecskékben – feszültség hatás

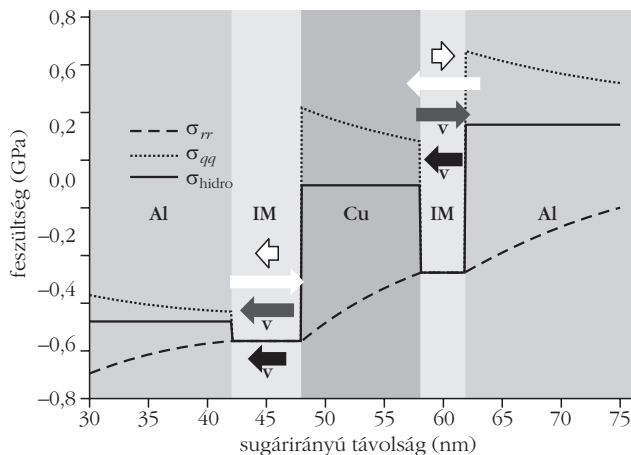
A nanorészecskék jelentőségét nem szükséges részletezni. A nanorészecskék gyakran vannak hőhatásnak kitéve, amelynek következtében atommozgási folyamatok indulnak meg és gyakran új fázisok keletkez-

nek bennük (lásd mag-héj típusú nanorészecskék). Számos kutatás zajlik ezek előállításának, különböző tulajdonságaiknak, viselkedésüknek stb. a vizsgálatára. Azonban mind ez idáig a nanorészecskékben felépülő feszültségek szerepét – tudásunk szerint – senki nem vizsgálta, jóllehet kicsiny gömbi (gömbszerű), azaz zárt geometriákban a feszültségek felépülése valószínűsíthetően igen jelentős, azonban relaxációjuk nehéz. Az első indikáció a feszültségek jelentős szerepére *G. Schmitz* és munkatársai [7] által publikált eredmények voltak. Egy körülbelül 25 nm görbületi sugarú W -tű hegyére vittek fel Al/Cu/Al, illetve Cu/Al/Cu trirétegeket (8. ábra). Majd ezt hőkezelték és az Al_2Cu növekedését vizsgálták a határfelületeknél. Meglepő módon azt kapták, hogy a két határfelületnél nem ugyanolyan gyorsan növekszik a fázis (9. ábra).

A jelenség megértésére kifejlesztettünk egy komplett analitikus egyenletrendszert gömbi mag-héj típusú nanoszerkezetekben történő szilárdtest-reakció leírására. A modell figyelembe veszi az elasztikus feszültségek felépülését, azok plasztikus relaxációját, a lehetséges nem-egyensúlyi vakanciasűrűségeket és a termodinamikai hajtóerőket az intermetallikus termékfázis keletkezésének modellezésére [8].

10. ábra. Atom- és vakanciakoncentráció (c_A – atomhányad, c_V – vakanciahányad) és a feszültség hidrosztatikus komponense a távolság függvényében. Az alsó panel az atomi áramok abszolút értékét mutatja. Jól látható, hogy a fázisnövekedés nem azonos a külső és a belső határfelületnél, valamint rétegrendfüggő.





11. ábra. Feszültségtér Al/Cu/Al gömbi triréteg esetében. A nyilak a növekvő Al_2Cu -fázisban (IM) fellépő atomi és vakanciaáramokat mutatják sematikusán: fehér – Al, körvonalas fehér – Cu, sötétszürke – áramok indukálta vakancia, fekete – feszültségtér indukálta vakancia.

A 10. ábra szemlélteti a modellszámítások eredményét. Látható, hogy a fázisnövekedés nem azonos a külső és a belső határfelületnél és rétegrendfüggő. Az ábra alsó paneljein ábrázolt atomi áramok abszolút értékei arra engednek következtetni, hogy a feszültségtér erősen befolyásolja azokat. Ahol lassabb a fázisnövekedés, ott az áramok abszolút értékei egyenlők és kicsik, míg ahol gyorsabb, ott különbözőek és a gyorsabb B komponens áramának abszolút értéke nagy.

Az eredmény megértéséhez tudnunk kell, hogy a modellszámításokban figyelembe vettük, hogy a növekvő Al_2Cu -fázisban (IM a 11. ábrán) az Al-atomok körülbelül 9-szer gyorsabban diffundálnak, mint a Cu-atomok. Így az ennek következtében fellépő Al- és Cu-áramok (fehér és körvonalas fehér nyilak a 11. ábrán) különbsége eredő vakanciaáramot indít az Al-réteg irányába (sötétszürke nyilak a 11. ábrán). A modellszámítások azonban azt is megmutatták, hogy a triréteg rétegrendjétől függetlenül egy lépcsőzetes feszültségtér (hidrosztatikus komponens) épül fel a mintában, amely a gömb középpontja felé átlagosan csökkenő tendenciát mutat (11. ábra). Ez a feszültségtér szintén vakan-

ciaáramot indukál (fekete nyilak a 11. ábrán), de amíg az áramok által indukált vakanciaáramok ellentétes irányúak a külső és a belső határfelületnél növekedő fázisokban, addig ezek azonos irányúak. Ennek megfelelően annál a határfelületnél, ahol az áramok és a feszültségtér által indukált vakanciaáramok azonos irányúak, ott a feszültségtér segíti a fázis növekedését, míg annál, ahol ellentétes irányúak: gátolja. Ezért Al/Cu/Al rétegrend (11. ábra) esetében a belső határfelületnél, míg Cu/Al/Cu rétegrend esetében a külső határfelületnél lesz gyorsabb a fázisnövekedés.

Összefoglalás

A cikkben bemutatjuk az APT-technika alapjait, amely a minták atomi szintű vizsgálatát teszi lehetővé három dimenzióban. Bemutattuk a vizsgálat négy fő fázisát: minta-előkészítés, mérés, rekonstrukció és analízis. Majd bemutatunk két érdekes eredményt, amelyet a technika felhasználásával értünk el.

Irodalom

1. A. Cerezo, T. J. Godfrey, G. W. D Smith: Application of position-sensitive detector to atom probe microanalysis. *Review of Scientific Instruments* 59/6 (1988) 862–866.
2. R. Schlesiger, C. Oberdorfer, R. Würz, G. Greiwe, P. Stender, M. Artmeier, P. Pelka, F. Spaleck, G. Schmitz: Design of a laser-assisted tomographic atom probe at Münster University. *Review of Scientific Instruments* 81/4 (2010) 043703.
3. <http://web.unideb.hu/zerdelyi/Diffusion-on-the-nanoscale/node4.html> – animáció.
4. Z. Erdélyi, I. A. Szabó, D. L. Beke: Interface sharpening instead of broadening by diffusion in ideal binary alloys. *Physical Review Letters* 89/16 (2002) 165901.
5. Z. Erdélyi, M. Sladeczek, L.-M. Stadler, I. Zizak, G. A. Langer, M. Kis-Varga, D. L. Beke, B. Sepiol: Transient Interface Sharpening in Miscible Alloys. *Science* 306 (2004) 1913–1915.
6. Z. Balogh, M. R. Chellali, G. H. Greiwe, G. Schmitz, Z. Erdélyi: Interface sharpening in miscible Ni/Cu multilayers studied by atom probe tomography. *Applied Physics Letters* 99/18 (2011) 181902.
7. G. Schmitz, C. B. Ene, C. Nowak: Reactive diffusion in nanostructures of spherical symmetry, *Acta Materialia* 57/9 (2009) 2673–2683.
8. Z. Erdélyi, G. Schmitz: Reactive diffusion and stresses in spherical geometry. *Acta Materialia* 60/4 (2012) 1807–1817.

ATOMI ÜTKÖZÉSEK SZILÁRDTESTEKBEN – Debrecen, 2014. július 13–18.

Az *Atomi ütközések szilárdtestekben* (International Conference on Atomic Collisions in Solids, ICACS) egy kétévente megrendezésre kerülő, körülbelül 200-250 fős nemzetközi konferencia, amely az egyik legjelentősebb fórum az atomok és felületek tanulmányozásával foglalkozó kutatók számára.

A 26. konferencia helyi szervezőbizottságának tagjai az MTA Atommagkutató Intézet kutatói. A 16 meghívott előadás mellett 30 kiválasztott szóbeli előadáson és posztereken mutatják be eredményeiket a konferencián részt vevő kutatók. A konferencia nulladik napján 2014. július 13-án, vasárnap neves külföldi előadók tartanak egy-egy témában átfogó előadást a jelen kutatások élvonalbeli eredményeiről főleg egyetemi diákoknak és PhD hallgatónak, de minden érdeklődőt szívesen látunk. Az előadók a következők:

Friedrich Aumayr (Austria): *Surface modification due to interaction with highly charged ions*

Kai Nordlund (Finland): *Molecular dynamics simulations for irradiation effects*

Kobayashi Yasubiko (Japan): *Radiation induced bystander effect studies using heavy ion microbeams.*

Lindhard-előadást tart *William John Weber* (USA): *Nuclear versus electronic energy loss effects.*

Publikációk beküldésének határideje a *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* folyóirathoz: 2014. július 18.

Bővebb információ található a konferencia weboldalán: <http://icacs26.atomki.mta.hu>

Minden érdeklődőt szeretettel várunk.

200 EV ENERGIÁJÚ ELEKTRONOK ÁTVEZETÉSE EGYEDI, TEFLON KAPILLÁRISON

Bereczky Réka Judit, Tókési Károly – MTA Atomagkutató Intézet, Debrecen

Aleksandar R. Milosavljević, Bratislav P. Marinković – Belgrádi Egyetem Fizikai Intézete, Szerbia

Töltött részecskék terelődési jelensége

Napjainkban számos kutatócsoport foglalkozik nagy töltésű ionok és kapillárisok belső felülete közötti ütközések tanulmányozásával. A fő cél a kölcsönhatások komplex megismerése.

Az első, szigetelő mintával, polimerekbe (polietilén-tereftalát, PET) maratott nanométeres, hengeres csövecskékkel, úgynevezett multikapillárisokkal történt kísérletek [1] azt a nem várt eredményt hozták, hogy a szigetelő kapillárisok képesek átvezetni töltésállapot-változás nélkül a nagy töltésű ionokat, még akkor is, ha a geometriai feltételek ezt nem tennék lehetővé.

A töltött részecskék kapillárisokon történő átvezetése a kapillárisokban kialakuló elektromos mezővel hozható összefüggésbe. Az átvezetéshez a kapillárisok belső falának töltést kell felhalmozniuk egyrészt azért, hogy az elektromos taszítás megakadályozza az ionok közeli ütközéseit a felülettel, ezáltal meggátolva az elektronbefogást a felületről, másrészt azért, hogy az ionokat a kijárat nyílás felé terelje. Átvezetés akkor figyelhető meg, amikor a falba való ütközés (feltöltődés) és a tömbi vagy felületi transzport (kisülés) között egyensúlyi állapot alakul ki.

Az elméleti eredmények azt mutatják [2], hogy a lerakódó töltések jelentős része a kapilláris bemene-ténél helyezkedik el. Már ez az egy töltésfelhalmozódás által keltett elektromos tér elegendő a beérkező ionok kapillárison történő átvezetéséhez. A kapilláris nyálábtengelyhez képesti dőlésszögétől, a kapilláris hosszától és a beérkező töltés mennyiségétől függően további kisebb feltöltődött foltok alakulhatnak ki a kapilláris belső felületén.

Az első mérésekhez használt multikapillárisok hátránya, hogy azok számos hibaforrást visznek a kísérletekbe, például a fóliába maratott vagy bombázással kialakított csövecskék tökéletes párhuzamosságát nem lehet biztosítani. Hasonló nehézséget jelent a megfigyelések elméleti leírása is. Az egymás közelében lévő, feltöltődött kapillárisok kölcsönhatnak egymással, így a pontos ionpályák meghatározásához a kapillárisok közege kollektív hatását is figyelembe kell venni, ami igen bonyolulttá teszi az elméleti leírást. Ezért – a kísérleti körülményeket egyszerűsítendő – multikapillárisok helyett egyedi, mikroszkopikus méretű kapillárisokkal vizsgáltuk a töltött részecske-terelés jelenségét. A jelenlegi technikai feltételek mellett

egyedi, nanoméretű csővel nem lehet megvalósítani a kísérleteket, mert bonyolult ilyen típusú mintát előállítani, másrészt pedig a kísérlet kivitelezése is nehézségekbe ütközik.

Amellett, hogy ilyen típusú mintákkal az elméleti feltételek egyszerűbbé, könnyen ellenőrizhetővé válnak, ezen minták technikai alkalmazást is sejtetnek. Az eddigieknél sokkal egyszerűbben és kevesebb anyagi befektetéssel lehet ionoptikai elemeket előállítani. A kapilláris ionterelő képessége a biológia és az orvoslás területén is felhasználható. Egy egyedi kapilláris segítségével nemcsak egy sejt, hanem annak egy meghatározott része is besugározható [3].

Elektronok terelése szigetelő kapillárisal

Az elektronok szigetelő mikro- és nanokapillárisokon történő átvezetésének tanulmányozása még az iontereléses kutatásoknál is frissebb terület. Ezen kutatásokat az motiválja, hogy a kisenergiájú elektronok mikro- és nanométeres skálán való manipulálhatósága alkalmazható lehet a nagy mértékben fejlődő bio-nanotechnológia területén.

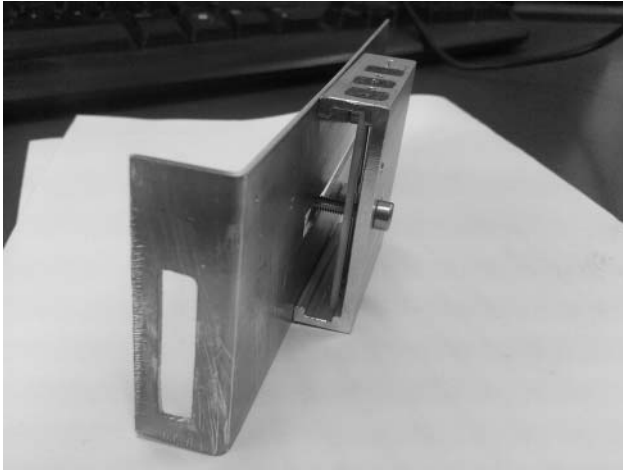
Míg a nagy töltésű ionok szigetelő kapillárisokkal történő terelése alaposan tanulmányozott és megértett területe a kapillárisokkal folytatott kutatásoknak, addig az elektronok továbbítása szigetelő kapillárisokkal sokkal összetettebb probléma. Az általános felfogás szerint mind a Coulomb-eltérítésnek – ahogyan a nagy töltésű ionok esetében is –, mind az elektron-fal kölcsönhatásnak köze van az elektronterelési folyamathoz. Az elektron-átvezetésről szóló munkák többségében a nagy töltésű ionok terelési folyamatának analógiájaként vizsgálták nanokapilláris fólián [4, 5], vagy egyetlen üveg mikrokapillárison keresztül [6, 7] rugalmasan továbbított elektronokat.

A kapillárison belüli rugalmatlan ütközésekkel kapcsolatban kevés eredmény született. *Milosavljević* és munkatársai [8, 9] kimutatták, hogy a kapillárisból kijutó elektronok döntő része nagyon kis kinetikus energiával, közel 0 eV-tal, rendelkezik. Napjainkig ezen alacsony energiájú elektronok tulajdonságait nem vizsgálták.

Ebben a munkánkban a 200 eV-os energiájú elektronok egyedi, teflon kapillárison történő átvitelét tanulmányoztuk.

Kutatásaink célja a kapillárison a kezdeti, beesési energiával átjutott elektronok szögeloszlásának, a kapillárisból kijutó elektronok kinetikusenergia-eloszlásának és az átviteli intenzitás időfüggésének tanulmányozása volt. Úgy hisszük, hogy munkánk új össze-

A munka a Szerbiai Oktatási és Kutatási Minisztérium (Project No. 171020) és a magyar Országos Tudományos Kutatási Alapprogram, OTKA No. NN 103279 támogatásával készült.



1. ábra. A teflon kapilláris minta.

függésekre deríthet fényt az elektronok terelésével kapcsolatban, és érdekes alkalmazási lehetőségekhez is vezethet. Ilyen például a nagyon alacsony energiájú (monokromatizált) mikro/nano elektronnyaláb felülethez közeli irányítása.

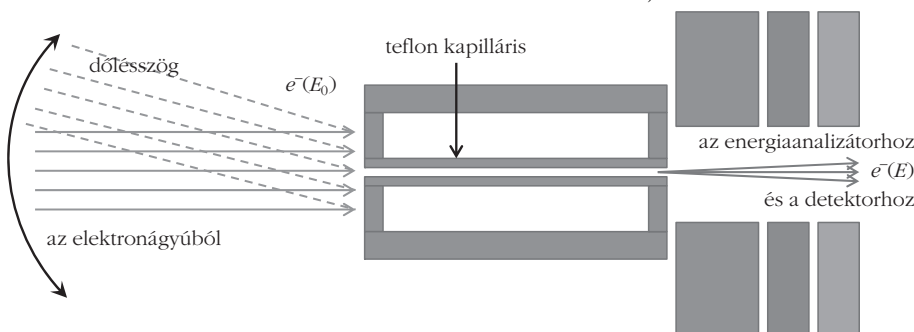
A kísérleti berendezés

A kísérletek során használt teflon kapilláris belső átmérője 0,8 mm, külső átmérője 1,6 mm, hossza 44,15 mm, így a hossz-átmérő aránya 55,2 volt. A kapilláris bemeneti és kijárat felületét grafitral vontuk be, hogy meggátoljuk a minta makroszkopikus feltöltődését. Az MTA Atomkiban készített mintát alumínium mintatartóba rögzítettük ultranagyvákuum-kompatibilis ragasztó segítségével (1. ábra).

A méréseket Belgrádi Egyetem Fizikai Intézetének Atomi Ütközési Folyamatok Laboratóriumában végeztük. Az UGRA elektron-spektrométert – amelyet általában elektron és atomi ütközések vizsgálatára használnak – átépítettük úgy, hogy alkalmas legyen kapillárisok elektronterelési tulajdonságainak tanulmányozására.

A kísérleti berendezés sematikus felépítése a 2. ábrán látható. A vákuumkamrában a nyomás körülbelül 4×10^{-7} mbar volt, amit egy turbomolekuláris szivattyú segítségével értünk el. Minden mérés előtt legalább 24 órán át szívtuk a rendszert, így a nyomás stabil volt. Az elektronágyú segítségével jól kollimált

2. ábra. A kísérleti berendezés sematikus rajza.



elektronnyaláb állt rendelkezésünkre, amelynek átmérője és szögdivergenciája 200 eV energiánál körülbelül 1 mm, illetve 1° . A nyaláb energiaszórása kevesebb, mint 0,5 eV volt.

Jelen kísérletben a kapilláris minta-tartót földeltük, ezért a kapilláris bejáratához érkező elektronáramot nem lehetett közvetlenül mérni. Egy korábbi, hasonló paraméterekre vonatkozó becslés alapján az elektronágyú nagyjából 30-50 nA áramerősségű elektronnyalábot bocsátott ki. Ugyanakkor egyértelműen nem állapítható meg, hogy az áram mely része érkezik meg ténylegesen a minta bemenetéhez, hiszen ez annak dőlésszögétől és a nyaláb fókuszálásától is függ.

A kapillárisból távozó elektronokat egy dupla hengeres típusú energiaanalizátorra fókuszáltuk, amit detektorként egy egycsatornás elektronsokszorozót követ. A kapilláris minta-tartót úgy pozicionáltuk, hogy a kapilláris vége közel legyen az analizátor előtti bejáratú lencsék első földelt elektródájához. Az elektronágyú forgatható, így az elektronnyaláb becsapódási szöge a kapilláris tengelyéhez képest változtatható. Ezt a szöget nevezzük kapilláris-dőlésszögnek.

A transzmisszió energiafüggése a négy elemű analízatorlencse fókuszálási tulajdonságaitól függ. Az átvitel korrekciója – jelen kísérleti paraméterek esetén – elektronpálya-szimulációval jól becsülhető. A szögfelbontást korábban – a nemesgázokról rugalmasan visszaszórt elektronok differenciális hatáskeresztmetszete alapján – $2-3^\circ$ -ra becsültük.

Eredmények

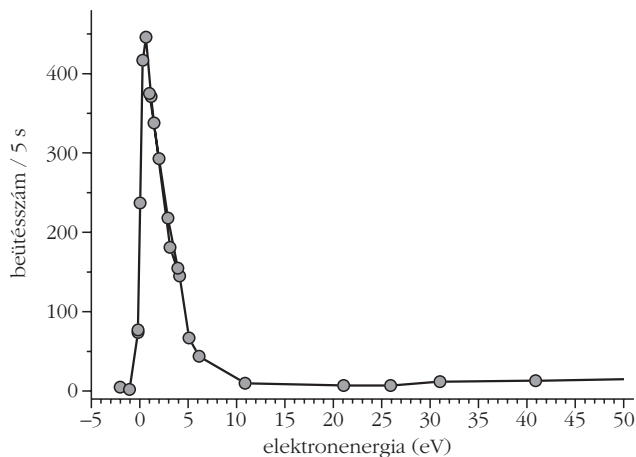
A 3. ábrán a 0 fokos szögben rögzített teflon kapillárisból kilépő kis energiájú elektronok kinetikusenergia-eloszlása látható. A kapillárisba bejutó elektronok kezdeti energiája 200 eV volt.

Ahogy azt korábban megmutattuk, az elektronok szigetelő kapillárison történő áthaladása az elektron-fal kölcsönhatás következményeként intenzív, kis energiájú másodlagos elektronok megjelenésével jár [8, 9].

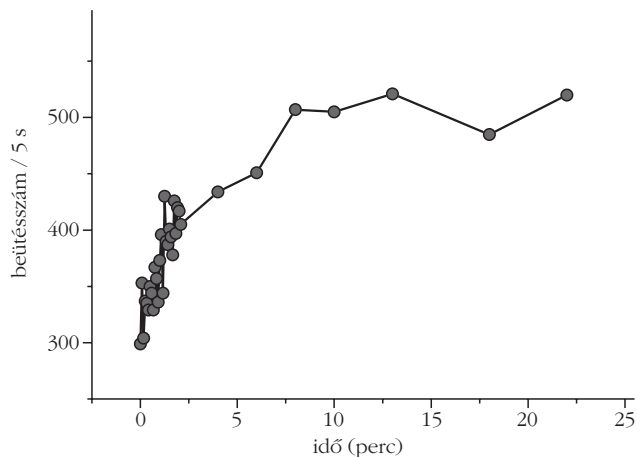
A továbbiakban a 3. ábrán látható, 0 és 10 eV közötti, kis energiával rendelkező csúcs maximumához tartozó elektronáram viselkedését tanulmányoztuk a kapilláris dőlésszögének függvényében. A kapillárisból kijutó kis energiájú (közel 0 eV) elektronok intenzitásának szögfüggését a 4. ábra mutatja.

A rugalmasan szóródott elektronokkal ellentétben – ahol mindig nagy mértékű dőlésszögfüggés volt tapasztalható – a kis energiájú elektronáram nagy tartományban gyakorlatilag független a kapilláris dőlésszögétől.

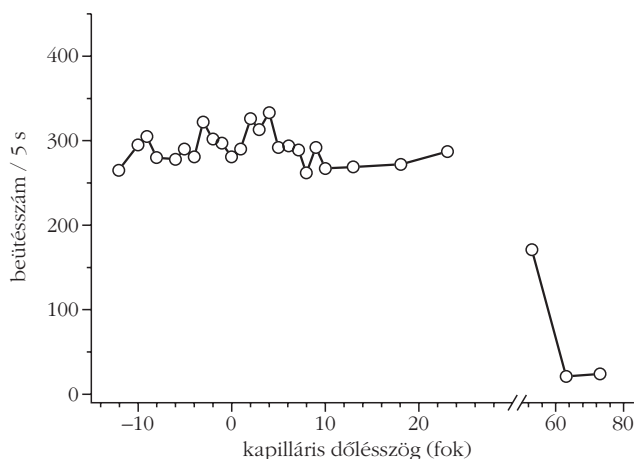
Az 5. ábrán a kis energiájú elektronáram időfüggése látható 200 eV-os energiával beszórt elektronok esetén, a kapilláris 0° -os dőlésszögénél.



3. ábra. A teflon kapillárisból kijutó kis energiájú elektronok kinetikusenergia-eloszlása.



5. ábra. A kapillárison átjutó kis energiájú elektronáram időfüggése. A kapilláris tengelye egybeesik a nyaláb tengelyével.



4. ábra. A teflon kapillárisból kijutó kis energiájú elektronok szög-eloszlása.

Összefoglalás

200 eV energiájú elektronok egyedi, teflon kapillárison történő átvitelét tanulmányoztuk. A kutatás célja a kapillárison a kezdeti beesési energiával átjutott elektronok szögeloszlásának, a kapillárisból kijutó elektronok kinetikusenergia-eloszlásának és az átviteli intenzitás időfüggésének vizsgálata volt. Az eredmények azt mutatják, hogy az elektronok nagy dőlésszögek esetén is – amikor a direkt átvitel geometriailag már nem lehetséges – átjutnak a kapillárison. Azt tapasztaltuk, hogy az átviteli áram intenzitása időben változik, és a mért spektrumban a rugalmatlanul szóródott elektronok jelentős hozama figyelhető meg. Mérési eredményeink érdekessége az a tapasztalat, hogy a kapillárisból kijutó, kis energiájú másodlagos elektronok intenzitása csak kis mértékben függ a kapilláris dőlésszögétől.

További méréseket tervezünk néhányszor 100 eV-os elektronok egyedi kapillárison történő átvitelének vizsgálatára, amelyeket rövidesen publikálni fogunk.

Irodalom

1. N. Stolterfoht, J. H. Bremer, V. Hoffmann, R. Hellhammer, D. Fink, A. Petrov, B. Sulik, *Phys. Rev. Lett.* **88** (2002) 201.
2. K. Schiessl, W. Palfinger, K. Tőkési, H. Nowotny, C. Lemell, J. Burgdörfer, *Phys. Rev. A* **72** (2005) 062902.
3. T. Ikeda, T. M. Kojima, T. Kobayashi, W. Meissl, V. Mäckel, Y. Kanai, Y. Yamazaki, *J. Phys. Conf. Series* **399** (2012) 012007.
4. A. R. Milosavljević, Gy. Víkor, Z. D. Pesić, P. Kolarz, D. Sević, B. P. Marinković, S. Mátéfi-Tempfli, M. Mátéfi-Tempfli, L. Piraux, *Phys. Rev. A* **75** (2007) 030901(R).
5. S. Das, B. S. Dassanayake, M. Winkworth, J. L. Baran, N. Stolterfoht, J. A. Tanis, *Phys. Rev. A* **76** (2007) 042716.
6. B. S. Dassanayake, S. Das, R. J. Bereczky, K. Tőkési, J. A. Tanis, *Phys. Rev. A* **81** (2010) 020701(R).
7. B. S. Dassanayake, R. J. Bereczky, S. Das, A. Ayyad, K. Tőkési, J. A. Tanis, *Phys. Rev. A* **83** (2011) 012707.
8. A. R. Milosavljević, J. Jureta, Gy. Víkor, Z. D. Pesić, D. Sević, M. Mátéfi-Tempfli, S. Mátéfi-Tempfli, B. P. Marinković, *EPL*, **86** (2009) 23001.
9. A. R. Milosavljević, K. Schiessl, C. Lemell, K. Tőkési, M. Mátéfi-Tempfli, S. Mátéfi-Tempfli, B. P. Marinković, J. Burgdörfer, *Nucl. Instrum. Meth. B* **279** (2012) 190.



**SZÁMÍTUNK RÁD, LÉGY
A FIZIKA BARÁTJA!**

**Támogasd adód 1%-ával az Eötvös Társulatot!
Adószámunk: 19815644-2-41**

OPTIKAI POINTILLIZMUS: A LOKALIZÁCIÓS OPTIKAI MIKROSKÓPIA

Erdélyi Miklós, Sinkó József

Szegedi Tudományegyetem, Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék

Az optikai mikroszkópok hamar a tudományos megismerés egyik legfontosabb eszközévé váltak, hiszen a korábban szabad szemmel vizsgált élő vagy élettelen minták felnagyított képének tanulmányozásával a tudósok közelebb kerültek a természeti jelenségek mögött rejlő törvényszerűségek megértéséhez. Ez a folyamatos alkalmazásorientáltság a mikroszkópok egyik legfontosabb paramétere, a nagyítás növelésére sarkallta a fejlesztőket. Az egyre finomabb struktúrák feloldásával újabb és újabb mikrovilágok – napjainkban már nanovilágok – tárulnak fel az ember szeme előtt. Az idők során a mikroszkópia számos részterülete alakult ki, amely igen széles tudományággá nőtte ki magát. Jelen cikkünkben egy viszonylag új (2006-ban publikált), az optikai tartományban működő fluoreszcens mikroszkópiai eljárást mutatunk be, amellyel nanoszkopikus struktúrák feltérképezése vált lehetővé.

A térbeli feloldás fogalma

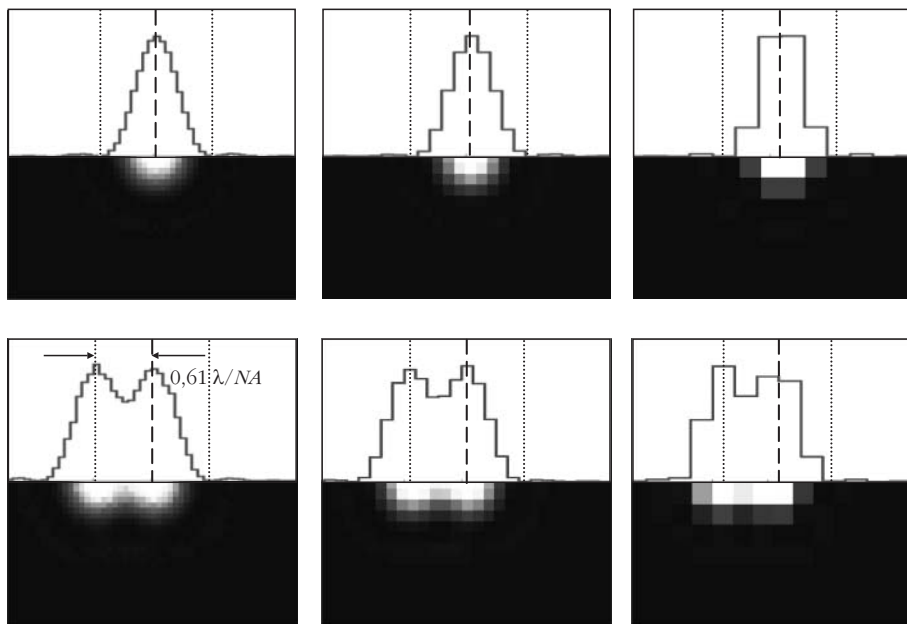
Az optikai mikroszkópiában alapvető kérdés, hogy a nagyítást meddig lehet növelni, illetve a térbeli feloldásnak van-e elméleti határa?

A Wikipedia, korunk „Galaxis útikalauza” *Mikroszkóp* címszava alatt a következőket olvashatjuk: „A fénymikroszkópok fénytörő lencsákat alkalmaznak, melyek gyakran üvegből, néha műanyagból készülnek. Ezek segítségével irányítják a fényt a szembe, vagy más fényérzékenybe. A fénymikroszkóp nagyítása legtöbbször maximum 1500-szoros, elméleti felbontóképességük 0,2 mikrométer. Speciális technikákkal (úgy, mint a konfokális pásztázó mikroszkóp) képesek vagyunk át-

lépni ezt a nagyításhatárt, de a diffrakció miatt a felbontás nem növelhető minden határon túl.”

Elméleti felbontóképesség alatt általában a bevezető optika kurzusokon megtanult Rayleigh-féle feloldási küszöböt szokás érteni, ami a fény hullámtermészetét bizonyító elhajlási jelenségen (diffrakción) alapszik és a leképező eszközök feloldását csupán egyetlen számmal jellemzi. Ennek alapján két pontforrást akkor tekintünk megkülönböztethetőnek, ha az egyik diffrakciós képének központi maximuma egybeesik a másik pontforrás diffrakciós képének első minimumával. Ha a két pontforrás (például két fluoreszcens molekula) ennél közelebb van, akkor a két objektum nem különböztethető meg, a leképező rendszer egy pontforrásnak tekinti őket. Ez a látható tartományban működő hagyományos fluoreszcens mikroszkópoknál körülbelül 200 nm-es határt jelent. A Rayleigh-féle feloldási küszöb egy könnyen érthető jósági tényező, nem csoda tehát, hogy az optikai leképező eszközök jellemzésére széles körben elterjedt. Alkalmazhatósága azonban több esetben megkérdőjelezhető. Nem használható például a fotonszámtól és a detektor pixelméretétől függő egy-molekula mikroszkópiában. Ennek oka, hogy a heurisztikus Rayleigh-kritérium – ami abban a korban fejlődött ki, amikor az emberi szem jelentette a legjobb detektort – nem veszi figyelembe például a detektált fotonok számát, vagy a detektor térbeli méreteit, pixelnagyságát.

1. ábra. Rayleigh-féle feloldóképesség szemléltetése két pontforrással különböző pixelméretű (feloldási határ/10, feloldási határ/5 és feloldási határ/2,5) esetén.



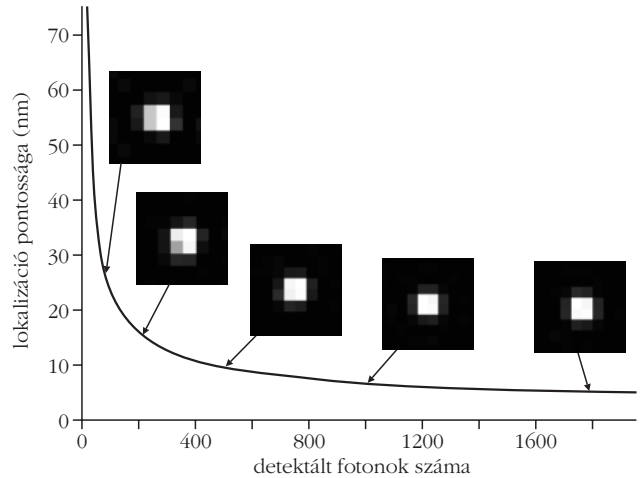
Sinkó József publikációt megalapozó kutatása a TÁMOP-4.2.4.A/2-11/1-2012-0001 azonosító számú Nemzeti Kiválóság Program – Hazai hallgatói, illetve kutatói személyi támogatást biztosító rendszer kidolgozása és működtetése konvergenciaprogram című kiemelt projekt keretében zajlott. A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg. A kutatásokat a Bolyai János Kutatói Ösztöndíj és a Marie Curie Integrációs (618273) pályázat támogatásával végeztük.

Vizsgáljuk meg, hogyan alkalmazható a Rayleigh-féle feloldás a nagyítás függvényében, azaz változtassuk meg a diffrakciós kép és a kamera pixelméretének arányát. Az 1. ábra felső sorában egyetlen pontszerű forrás elhajlási képe látható különböző pixelméretnek esetén. A második sorban két, egymástól pontosan a Rayleigh-kritérium által meghatározott távolságban ($0,61 \lambda/NA$, ahol λ a hullámhossz és NA a numerikus apertúra) levő világító pontforrás képe látható különböző pixelméretnek esetén. Ennél közelebb elhelyezkedő pontforrásokat a leképező rendszer már nem képes feloldani.

Nagyobb pixelméret mellett az elhajlási kép egyre kevésbé rajzolódik ki, a gyűrűs szerkezet és így az első minimum helye nem határozható meg. Ezért logikus lenne minél kisebb pixelméreteket használni, azaz csökkenteni a nagyítást. Egy-molekula detektálás esetén azonban figyelembe kell venni a detektálható fotonok számát is. Kis pixelérték esetén az egyes pixelekre eső fotonok száma igen alacsony lehet, ami nagymértékben rontja a detektálás jel/zaj viszonyát. Meg kell találni azt a középutat, ahol még felismerhető az elhajlási kép és a fotonszám is elegendő a detektáláshoz. Így érthető, hogy a kritérium nem ültethető át a nagy érzékenységű kamerákon alapuló modern mikroszkópok jellemzésére. A „super-resolution” kifejezéssel jelölt új eljárások csupán az eddig alkalmazott heurisztikus definíciók korlátaira utalnak, de nem kérdőjelezzik meg a fizikai törvények igazságát. A diffrakció a küszöb alatti feloldást elérő rendszereknél is ugyanazon törvényszerűségek alapján számítható, csak a feloldás definícióját változtatjuk meg. Egy-egy molekula képe minden esetben a diffrakció által leírt elhajlási kép lesz, ám a Rayleigh-limit alatti térbeli információk egy-egy ötletes trükkkel kinyerhetők.

Nagyfeloldású mikroszkópiai technikák

Az optikai mikroszkópia területén jelenleg három nagyfeloldású módszer áll a fejlesztések homlokterében. A STED (*ST*imulated *E*mission *D*epletion) mikroszkópia [1] egy pásztázó eljárás. A gerjesztő nyaláb fókuszpontjában (korong alakú terület) a fluoreszcens festékek gerjesztett állapotba kerülnek. A gerjesztést követően egy második, nagyobb hullámhosszú és gyűrű alakú, úgynevezett STED-nyalábbal a gerjesztett korong szélén lévő molekulákat kényszerített emisszióval alapállapotba visszük vissza. Ennek következtében a molekulák csak a fókuszpont közepén lévő (a gyűrűs nyaláb kontrasztjától függő) kis tartományban maradnak aktív állapotban. Ezzel a módszerrel a gerjesztett térfogat laterális mérete 50 nm alá csökkenthető. A SIM (*S*tructured *I*llumination *M*icroscopy) mikroszkópia [2] a Moiré-jelenségen alapszik. A mintát egy térben szinuszosan modulált nyalábban szekvenciálisan – általában három orientációval és irányonként három fázissal – gerjesztik. A detektált 2D képek Fourier-kiértékelése során egy, az eredeti feloldásnál kétszer nagyobb feloldású képet lehet



2. ábra. A lokalizációs pontosság fotonszámfüggése.

rekonstruálni. Ez a feloldási küszöb a módszer nemlineáris kiterjesztésével tovább növelhető [3]. A módszer alkalmas valós idejű, élő sejt mérésre is. A harmadik módszer a *lokalizációs elven működő eljárásokat* [4] foglalja magába, és a továbbiakban ezt a módszert tárgyaljuk részletesen.

A lokalizációs mikroszkópia alapjai

A hagyományos fluoreszcenciás technikák esetén a gerjesztett tartományban elhelyezkedő molekulák mindegyike aktív állapotban van, azaz gerjeszthető. A lokalizációs mikroszkópia során fotokémiai folyamatok révén érjük el azt, hogy a képmezőben egy időben csak kevés számú molekulát aktiválunk, azaz hagyunk aktív állapotban, így az egyes molekulák diffrakciós foltjainak leképezését időben szétválasztjuk. Itt a kevés azt jelenti, hogy a molekulák diffrakciós mintázatai ne fedjenek át, az aktív molekulák képei jól elkülöníthetően detektálhatók legyenek (aktív molekulák távolsága $> 3 \times$ Rayleigh-távolság). Ebben az esetben az elhajlási kép maximuma, vagyis a molekula helye egyszerű illesztéssel meghatározható, a molekula lokalizálható. A lokalizáció pontossága függ a detektált fotonok számától, hiszen nagyobb fotonszám pontosabb illesztést biztosít. Részletes számításokkal megmutatható, hogy a lokalizáció pontossága

$$\langle (\Delta x)^2 \rangle = \frac{s^2 + a^2/12}{N} + \frac{8 \pi s^4 b^2}{a^2 N^2}$$

képlettel adható meg [5], ahol s az elhajlási kép standard deviációja (Gauss-eloszlást feltételezve), a a CCD pixelmérete, N a detektált fotonszám és b a zaj. Három következményre érdemes külön felhívni a figyelmet: (i) a fotonszámfüggésre, (ii) az optimális pixelméretre és a (iii) zaj szerepére. Zaj nélkül a lokalizáció pontosságának fotonszámfüggését a 2. ábra mutatja. A pixelméret 130 nm volt, a standard deviáció 208 nm, a zaj 0,7, a detektált fotonok száma pedig 20 és 2000 között változott.

Látszik, hogy <10 nm lokalizációs pontosság eléréséhez ~ 500 db foton detektálására van szükség. Nem meglepő, hogy a lokalizációs pontosság függ a pixelmérettől. A pontos számolások azt mutatják, hogy a lokalizációs pontosság akkor maximális, ha a diffrakciós korong standard deviációja megegyezik a detektor pixelméretével. Ez az eredmény meglepő lehet, de az optimum létezését könnyű belátni, ha meggondoljuk a két szélső esetet, mint ahogy az 1. ábra esetén tettük. Ha konstans fotonszám mellett nagyon megnöveljük a nagyítást, azaz sok pixelen oszlanak el az emittált fotonok, akkor egy pixelre kevés foton jut. Következésképpen romlik a jel/zaj viszony és ezzel együtt a lokalizációs pontosság. Másrészt extrém kicsi nagyítás mellett az összes foton egy pixelre fog jutni, ami lehetetlenné teszi az illesztést. A pixelméret optimalizációjának egy másik következménye, hogy a lokalizációs mikroszkópban nincs mód az elhajlási kép alakjának pontos vizsgálatára, hiszen az eloszlásfüggvény erősen alulmintavételezett, tipikusan csupán egy 5×5 pixel területen oszlik el. A lokalizációs pontosságot befolyásoló harmadik tényező a képet terhelő zajszint. Ennek csökkentése érdekében általában TIRF (teljes visszaverődésen alapuló) gerjesztési módot alkalmaznak, amelynél a mintát csak egy vékony rétegben gerjesztik, ezzel csökkentve a fluoreszcens háttérjelet.

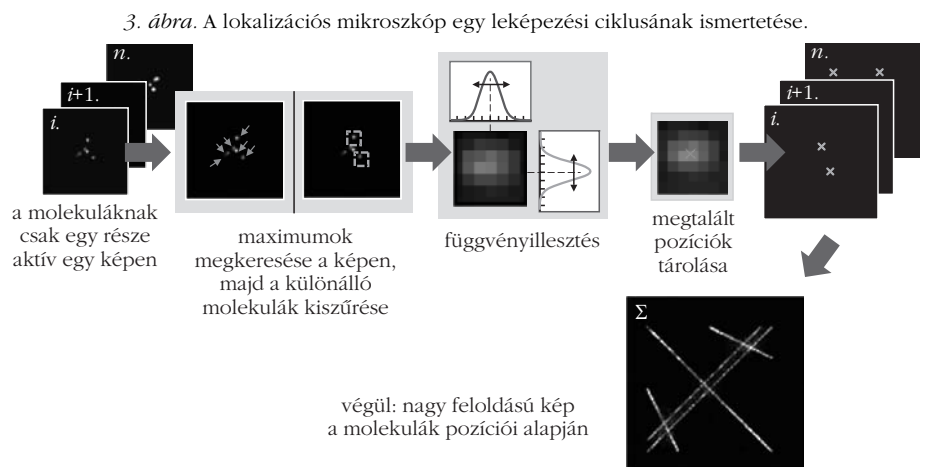
Mivel egy kép felvétele csak véges számú (a látótérrel függő, de tipikusan <50) molekula lokalizációját teszi lehetővé, egy összetett kép rekonstruálásához több ezer, esetleg több tízezer kép felvételére van szükség, ami az adatgyűjtés idejét jelentősen, gyakran >10 perc időtartamra növeli. Ezért fontos, hogy a minta ne mozduljon el az adatgyűjtés során, illetve, ha elmozdul, akkor ismerjük az elmozdulás nagyságát. A gyakorlatban ezt folyamatosan világító, úgynevezett markerek (fluoreszcens gömbök, arany nano-gömbök stb.) segítségével követhetjük nyomon.

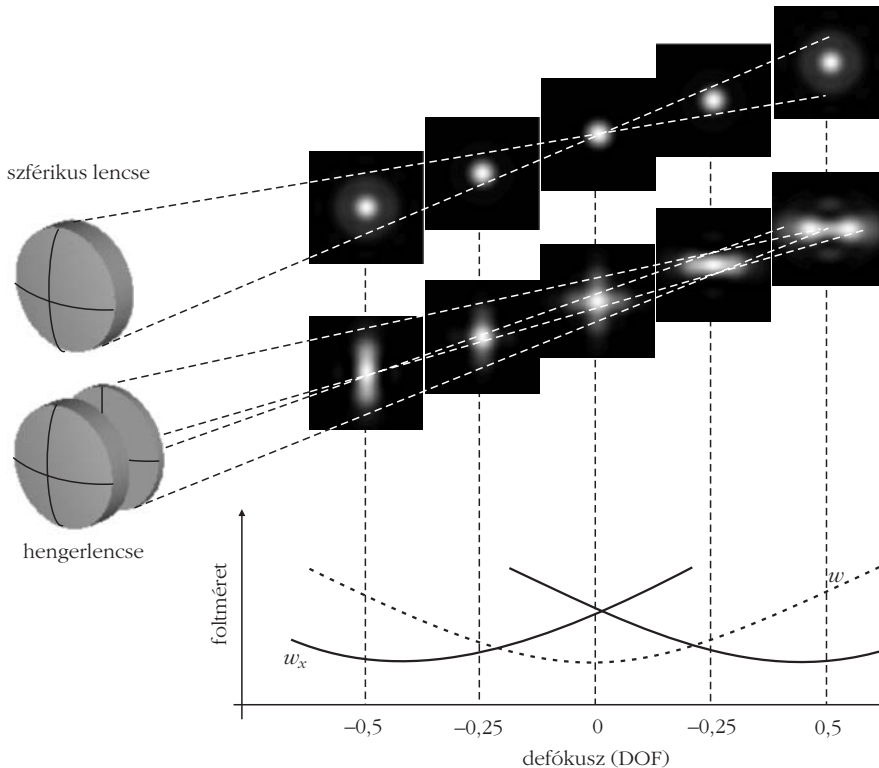
A lokalizációs mikroszkóp egy leképezési ciklusát láthatjuk a 3. ábrán. Mint már említettük, egy olyan képcsoomag áll rendelkezésünkre, amelynek egyes képein csupán néhány, de mindig más molekula képeződött le. A képeket külön dolgozzuk fel: megkeresük a maximumokat, majd kiválogatjuk azokat, amelyekhez tartozó molekulák képei nem fednek át egymással. Ezt követően történik az illesztés, a maximum helyének megkeresése, vagyis a lokalizáció. A pozíciók koordinátáit tároljuk, majd az összes kép feldolgozását követően egy térképet készítünk, összeadjuk a kapott pozíciókat. Végeredményül egy nagy feloldású képet kapunk a molekulák elhelyezkedéséről.

A lokalizációs mikroszkópia kulcsa a festékmolekulák időbeli kapcsolása. Ennek megvalósítási módja szerint beszél-

hetünk fotoaktivációs lokalizációs (PALM), sztochasztikus optikai rekonstrukciós (STORM), illetve direkt STORM (dSTORM) módszerekről. A PALM eljárásban fotoaktiválható fluoreszcens fehérjéket használunk. Egyik példa a PaGFP, amely alapállapotban nem fluoreszkál, de 400 nm-es megvilágítás hatására konformáció-változást szenved és aktív, azaz fluoreszcens állapotba kerül. Ezeket az aktív molekulákat egy 488 nm-en folytonosan működő, kiolvasó lézerral ismételtelen fluoreszcenciára készítjük úgy, hogy irreverzibilis bomlásuk (bleach) előtt a mikroszkóprendszer a lehető legtöbb foton gyűjtse össze. Az aktivált molekulák kiolvasása és bleach-elődése után a 400 nm lézer újbóli használatával új, eddig passzív molekulákat aktiválunk és lokalizálunk. A folyamat lépéseit sokszor megismételve rekonstruálhatjuk a minta képét. A PALM eljárás előnye, hogy a célfehérjét transzfekció útján direkt módon jelölhetjük meg, azaz a jelölés nagyon specifikus. A módszer alkalmas élő sejttes leképezésre, illetve molekulák mozgásának (diffúziójának stb.) követésére. A fluoreszcens fehérjék azonban gyenge emitterek, kevés foton bocsátanak ki, korlátozva ezzel a lokalizációs pontosságát. A STORM módszerekben szerves festékeket alkalmaznak (Alexa, ATTO stb.), amelyek jóval fényesebbek, azaz időegység alatt több foton bocsátanak ki, és ezáltal növelik a lokalizációs pontosságot. A festékek alkalmazása azonban két probléma megoldását is szükségessé teszi: a célmolekulák specifikus jelölését, vagyis az optimális festési sűrűség beállítását, valamint a festékek aktiválásának, azaz a villogás dinamikájának időbeli kontrollját. Ez utóbbit egy pufferyoldék segítségével érik el, amelynek szerepe kettős. Egyrészt oxigént köt meg – tipikusan enzimátikus úton – csökkentve a festék nagy lézerteljesítmény okozta kifakulását, másrészt biztosítja, hogy a triplet állapot kiürítésén keresztül a festék egy hosszú élettartamú, sötét állapotba kerüljön [6]. A mérés során a mintát tartalmazó küvetát gyakran légmentesen le is kell zárni.

Eddigiekben a lokalizációs mikroszkópok kétdimenziós képalkotásának elvét ismertettük. Felmerül a kérdés, hogy a harmadik, axiális kiterjedésben is elérhető-e hasonló diffrakciós küszöb alatti feloldás. Az elmúlt években számos megoldás született az axiális

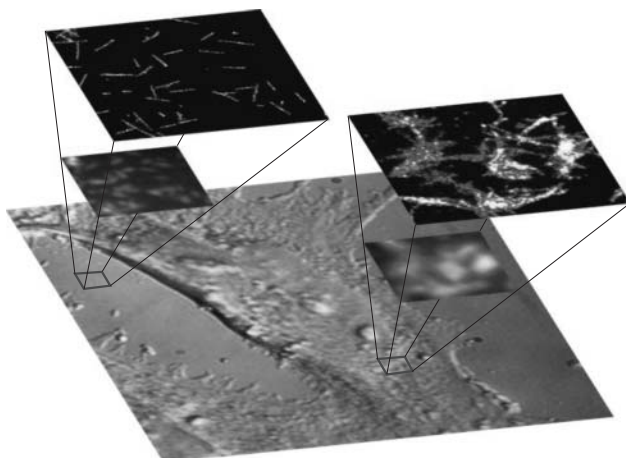




4. ábra. Az asztigmás háromdimenziós leképezés elve.

feloldás növelésére, amelyek közül a legelterjedtebb az úgynevezett asztigmás eljárás. Hasonló módszert használnak a CD-lejátszóknál a lemez pozicionálására. Ennek során egy hengerlencse segítségével egy gyenge asztigmatizmust vezetünk be a detektorokba, ami a fókuszfoltot elliptikussá teszi (4. ábra). A molekula axiális pozíciójától függően (defókusz) változik az ellipszis orientációja, két főtengelyének aránya. Ebben az esetben tehát az illesztéskor a maximum helyének meghatározása mellett a félértékszélességek (w_x és w_y , a 4. ábrán) is információt hordoznak. A rendszer pontos kalibrálást igényel, ami után a molekula axiális pozíciója 50 nm pontossággal meghatározható. Fontos megemlíteni, hogy az axiális tartományt, amelyen belül ez a

5. ábra. Festett amyloid-beta szálak sejten kívül (bal oldali kép) és sejten belül (jobb oldali kép). A dSTORM képek alatt a hagyományos diffrakció limitált fluoreszcens képek látszanak.



pontosság elérhető, a rendszer mélységélessége ($\text{DOF} \approx 600 \text{ nm}$), míg TIRF gerjesztés esetén az evanescens tér behatolási mélysége ($\approx 150 \text{ nm}$) limitálja. Azaz a lokalizációs mikroszkópokkal felvett 3D képek képtere axiális irányban jelentősen kisebb, mint laterális irányban. Valódi 3D felvételhez a minta pásztázására és az így kapott egyes képek pontos összeillesztésére, regisztrációjára van szükség.

Alkalmazási lehetőségek, kitekintés

A lokalizációs elven működő mikroszkópok 2006-os megjelenésük óta intenzív fejlesztés alatt állnak. Jelenleg az optikai mikroszkópia egyik legdinamikusabban fejlődő irányát jelentik, de mint általában minden új módszernek, ennek is bizonyítania kell alkalmazhatóságát és előnyeit a többi technikához képest.

A lokalizációs mikroszkópia – a potenciális 10 nm alatti térbeli feloldással – a közeljövőben a molekuláris szintű mechanizmusokat vizsgáló kutatók egyik fontos eszközévé válhat (5. ábra). A módszert elsősorban biológiai kutatásokra fejlesztették ki részben az – összetett minta-előkészítést igénylő – elektronmikroszkópia kiváltására. A térbeli feloldás ugyan nem éri el az elektronmikroszkópokét, de az optikai módszer számtalan előnye miatt várhatóan széles körben el fog terjedni. E cél eléréséhez még számos problémát kell megoldani, amelyek közül a legfontosabbak a (i) a mérési idő csökkentése, (ii) többszínű és (iii) axiális irányban is kiterjedtebb képterű 3D leképezés fejlesztése, illetve (iv) élő sejt mérések.

Irodalom

1. S. W. Hell, J. Wichmann: Breaking the diffraction resolution limit by stimulated emission: stimulated emission-depletion fluorescence microscopy. *Opt. Lett.* 19/11 (1994) 780–782.
2. M. G. L. Gustafsson: Surpassing the lateral resolution limit by a factor of two using structured illumination microscopy. *Journal of Microscopy* 198 (2000) 82–87.
3. M. G. L. Gustafsson: Nonlinear structured-illumination microscopy: wide-field fluorescence imaging with theoretically unlimited resolution. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 102/37 (2005) 13081–13086.
4. S. van de Linde, A. Löschberger, T. Klein, M. Heidbreder, S. Wolter, M. Heilemann, M. Sauer: Direct stochastic optical reconstruction microscopy with standard fluorescent probes. *Nature Protocol* 6/7 (2011) 991–1009.
5. R. E. Thompson, D. R. Larson, W. W. Webb: Precise nanometer localization analysis for individual fluorescent probes. *Biophys. J.* 82/5 (2002) 2775–2783.
6. S. van de Linde, M. Sauer: How to switch a fluorophore: from undesired blinking to controlled photoswitching. *Cem. Soc. Rev.* DOI: 10.1039/c3cs60195a (2013).

A BUDAPESTI KUTATÓREAKTOR FŰTŐELEMEINEK SORSA

Vidovszky István
MTA Energiatudományi Kutatóközpont

Rövid történeti áttekintés

A Budapesti Kutatóreaktor, Magyarország első nukleáris létesítménye, 1959 óta üzemel. A reaktor elsődleges feladata a kísérleti lehetőségek megteremtése a neutronfizika számára, ám emellett fontos szerepet játszik az ország radioaktív izotópokkal történő ellátásában is. A kutatóreaktor teljesítménye eleinte 2 MW volt, ekkor 10% dúsítású urán fűtőelemekkel üzemelt. Az 1967-es rekonstrukciót követően a fűtőelemeket 36% dúsításúakra cserélték. Ennek és az újonnan kialakított berilliumreflektornak köszönhetően a teljesítmény 5 MW-ra nőhetett. Az 1986 és 1992 között végrehajtott második rekonstrukciót követően a reaktor teljesítménye már 10 MW, a fűtőelem típusa ekkor változatlan maradt. A 21. század elején a terrorfenyegetettség növekedése miatt az Egyesült Államok kormánya szorgalmazta a 20%-nál nagyobb dúsítású urán kivonását a civil forgalomból, ezért támogatta az ilyen fűtőelemekkel működő reaktorok konverzióját kis dúsítású üzemanyagra. Ennek során a Budapesti Kutatóreaktor is konvertáltuk, a művelet 2012 novemberében fejeződött be, azóta a reaktor 19,75% dúsítású üzemanyagot használ, teljesítménye változatlanul 10 MW. A konverzió „ára” mindössze csekély mértékű (körülbelül 5%) fluxuscsökkenés.

Kutatóreaktorok kiégett fűtőelemeiről

A kiégett fűtőelemek kezelése az atomenergetika egyik jelentős problémája. A probléma legnagyobb mértékben atomerőművek esetében jelentkezik, hiszen a nagy teljesítmény miatt ott keletkezik a legtöbb kiégett fűtőelem. E fűtőelemek tárolása, hűtése, újrafeldolgozása vagy végleges elhelyezése már az erőmű tervezésekor meghatározódik. Kutatóreaktorok esetében a kiégett fűtőelemek mennyisége jóval kisebb, ám nem elhanyagolható. Az ötvenes, hatvanas években létesített kutatóreaktorok esetében a kiégett fűtőelemekről történő gondoskodás többnyire kimerült abban, hogy a reaktor részeként építettek egy kiégett-fűtőelem tárolót, ami néhány évtizedre megoldja ugyan a problémát, a hosszabb távú megoldást azonban általában későbbre halasztották. A kiégett fűtőelemek tárolása a nagy fajlagos radioaktivitás miatt hűtést igényel, ezért eleinte a tárolás vizes medencékben történik. Megfelelő vízkémia és jó minőségű fűtőelem-burkolat esetében a tárolás sok évtizeden keresztül is problémamentes maradhat. Ám e két feltétel nem mindenütt teljesült, ezért a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség a kilencvenes évek végén öt éves koordinált kutatási projektet szervezett a kutatóreaktorok kiégett fűtőelemeinek vizes tárolásával kapcsolo-

latos problémák tisztázására. A projektben amerikai (USA) szakemberek játszották a vezető szerepet, további résztvevők orosz, kínai, argentin, brazil, thaiföldi és magyar kutatóreaktorok képviselői voltak. A projekt eredményeként sikerült meghatározni a hosszú távú biztonságos tárolás felételeit. A legfontosabb két paraméter a megfelelő pH-tartomány és az alacsony kloridion-koncentráció. A projekt során egy-egy (magyar gyártású) korróziós indikátorok segítségével minden tároló medencében méréseket végeztünk. A magyar medence a legjobbak egyike volt. Abban mindenki egyetértett, hogy a vizes tárolás nem végleges megoldás.

A Budapesti Kutatóreaktor fűtőelemei

A Budapesti Kutatóreaktor fűtőelemeinek hosszabb tárolására már a hatvanas években megépült az úgynevezett külső tároló. Ez a reaktorépületben lévő és a reaktorral egyidejűleg épített belső tárolóhoz hasonlóan egy vizes medence, ahol a nagy víztérfogat elegendő a fűtőelemek hűtésére, valamint a fűtőelemek felett lévő több méter víz a sugárvédelmet is biztosítja. A tároló vízkémiájára a kezdetektől fogva nagy gondot fordítottak, így lehetséges, hogy közel ötven éves tárolás során sem keletkezett korróziós probléma. A tároló azonban semmi esetre sem végleges megoldásnak készült, ezért a reaktor üzemeltetői már a nyolcvanas években szorgalmazták a fűtőelemek visszaszállítását a gyártó országába, a Szovjetunióba. Az elszállításra vonatkozó tárgyalások megkezdődtek, ám a szállítás megvalósulása előtt a Szovjetunió összeomlott és ez a terv meghiúsult. Később többször is felmerült az elszállítás gondolata, ám Oroszország törvényei akkoriban nem tették lehetővé a külföldön kiégett fűtőelemek visszafogadását. Ezért az ezredfordulón a reaktort üzemeltető KFKI Atomenergia Kutatóintézet vezetése úgy döntött, hogy felkészül a hosszabb távú tárolásra. Ennek során az intézet megvalósította a fűtőelemek felszáraz tárolását. Ez azt jelentette, hogy a már régóta pihent fűtőelemeket, amelyek jelentős hűtést már nem igényeltek, szárítás után alumíniumtokba helyezték, a tokot nitrogéngázzal töltötték fel, majd légmentesen lezárták. A zárt tokokat továbbra is az eredeti tárolóban, víz alatt tárolták, így biztosítva a sugárvédelmet. Ez a tárolási mód hosszabb távra biztosítja a korrózió és így a fűtőelemek inhermetikussá válásának elkerülését, mint a legjobb vízkémiájú nedves tároló.

A tárolás biztonsága így igen hosszú távra is megnyugtatóvá vált, ám a tároló kezdett megtelni. Az eredeti tervek helyesek voltak, a hatvanas években igen hosszú távra elegendőnek látszott a tároló kapacitása,

ám a megnövelt teljesítmény miatt a kapacitás 2000 után egyre közeledett a kimerüléshez, így a fűtőelemek elszállítása a további üzemeltetés feltételévé vált. Szerencsére a nemzetközi helyzet ezúttal kedvezőbb lett a reaktor számára. Az orosz törvények megváltoztak, a kiégett fűtőelemek befogadása ismét lehetővé vált, továbbá az Egyesült Államok és Oroszország vezetői megegyeztek, hogy közös erőfeszítéseket tesznek a nagy dúsítású (20% vagy a feletti) fűtőelemeknek a gyártó országába történő visszaszállítására. Az Egyesült Államok kormánya megkereste az orosz eredetű, nagy dúsítású fűtőelemekkel rendelkező valamennyi ország kormányát és felajánlotta segítségét. E segítség anyagi természetű is, azaz vállalták az előkészítés, szállítás, újrafeldolgozás és húsz évi tárolás költségeit, de szervezési, engedélyezési, kapcsolattartási kérdésekben is segítettek. A magyar kormány, hasonlóan a többiekhez (Észak-Korea volt az egyetlen kivétel) elfogadta az ajánlatot.

Fűtőelem-szállítások

A terrorfenyegetettség csökkentése érdekében minden nagy dúsítású uránt el kellett távolítani az országból, így a konverzió után feleslegessé váló friss fűtőelemeket is, amelyeket az amerikai partnerek díjmentesen becseréltek számunkra azonos mennyiségű hasadóanyagot tartalmazó, kis dúsítású urán fűtőelemekre. A friss fűtőelemek elszállítása nem okozott különösebb nehézséget, noha a szállítás biztonsága ebben az esetben is fontos tényező, ám hasonló szállítmányokkal már a fűtőelemek beszerzése során találkoztunk. Az érdekesség kedvéért el kell mondani, hogy a kutatóreaktor friss fűtőelemei mellett megszüadültünk attól az urántól is, amelyet még a hatvanas években, saját fűtőelemgyártás céljára szereztünk be a Szovjetunióból. A poralakban érkező urán mintegy fele feldolgozatlan maradt, ám másik feléből kritikus rendszer, másnéven zéróreaktor készült. E reaktorok teljesítménye nevüknek megfelelően igen kicsi, közel zérus és reaktorfizikai kísérletek végzésére szolgáltak. Az említett kritikus rendszer a hatvanas évek végén a Budapesti Nemzetközi Vásáron népszerűsítette a nukleáris technikát, segítségével bárki készíthetett gyorsan elbomló radioaktív izotópokat az akkoriban forgalomban lévő alumínium pénzérmékből. A feldolgozott és feldolgozatlan uránporért cserébe szintén kis dúsítású fűtőelemeket kaptunk, amelyek egy további évre biztosítják a Budapesti Kutatóreaktor üzemeltetését. Ez igen jelentős segítség a mai, igen magas fűtőelemárak miatt.

A kiégett fűtőelemek szállítása, ellentétben a friss fűtőelemek szállításával, igen összetett feladat, ezért az előkészítés általában évekig tart. A Budapesti Kutatóreaktor kiégett fűtőelemeinek elszállításával kapcsolatos első megbeszélés 2004 decemberében volt, a fűtőelemek első szállítmánya 2008 szeptemberében, a második szállítmánya 2013 novemberében hagyta el az országot.

Az előkészületek

A projekt elején tisztázódott, hogy a kiégett fűtőelemek szállítása a cseh Skoda Művek által gyártott VPVR/M jelű konténerekben fog történni. E konténerek kiszolgálására a kutatóreaktor telephelyén rendelkezésre álló infrastruktúra nem volt elegendő. A külső fűtőelem-tároló föld alatti medence, amely fölött egy olyan kis méretű könnyűszerkezetes épület állott, ahol az átrakás nem volt kivitelezhető. Fel kellett építeni egy hatalmas csarnokot, amelyben megfelelő daru állt rendelkezésre, valamint egy sínen mozgó szerkezet, amely azt biztosította, hogy ne kelljen a 11 tonnás konténert a medence felett daruzni, mert ez nem megengedhető biztonsági kockázatot jelentett volna. Szükség volt továbbá egy olyan szerkezetre is, amely alkalmas volt a tokozott fűtőelemek tömeges bontására, a rendelkezésre álló tokbontó készülék ugyanis csak a meghibásodás esetén felmerülő egy-egy bontás lebonyolítására volt alkalmas. A csarnok és a hozzá tartozó berendezések elkészítése minden bizonnyal nagyobb feladat, mint a szállítás adminisztratív ügyintézése, ennek ellenére a csarnok készült el hamarabb. 2007 őszére a szállítás valamennyi műszaki feltétele megvalósult, ám az engedélyek beszerzése, az útvonal tervezése korántsem állt ilyen jól.

Az adminisztratív ügyintézés fő nehézségét az okozta, hogy nemzetközi egyezményeket kellett kötni. Eredetileg három egyezményről volt szó, kellett egy amerikai–magyar és egy orosz–magyar egyezmény a fűtőelemek átadásáról, illetve ennek lebonyolításáról, valamint egy háromoldalú szállítási egyezmény, orosz, ukrán és magyar részvétellel. A két kétoldalú egyezménnyel semmi probléma nem volt, ennek ellenére aláírásukra – a diplomáciai folyamatok bonyolultsága miatt – csak 2008-ban került sor. Az orosz–magyar kormányközi egyezmény tette lehetővé, hogy a kiégett üzemanyag feldolgozását követően a nagy aktivitású hulladék végleg Oroszországban maradjon. A háromoldalú egyezmény aláírására azonban nem került sor, ezért más szállítási útvonalat kellett keresni.¹

Az első szállítás – 2008. szeptember

Kiégett fűtőelemeket általában vonaton, közúton vagy hajón szállítanak, tekintettel arra, hogy a nagy aktivitás miatt nehéz védelemre van szükség. A legelőnyösebb a vasúti szállítás, mert így lehet a legolcsóbban és a legkisebb feltűnést keltve szállítani. Tekintettel arra, hogy a Budapesti Kutatóreaktor telephelyén nincs vasúti sín, a közúti szállítás mindenképpen elkerülhetetlen. Az első útvonaljelölt a legközelebbi könnyen megközelíthető vasútállomásról vezetett a célállomásra, a nyugat-szibériai Majak telephelyre. 2008-ra terveztük az első szállítást. A szállítmány tartalmazta a kutatóreaktor valamennyi 2005 előtt kiégett

¹ Az egyezményt végül évekkel később aláírták, majd 2013. október végén ratifikálta az ukrán parlament.



1. ábra. A szállítmány Koperben, a hajó belsejében.

fűtőelemét. Így sikerült a teljes szállító kapacitást, azaz a rendelkezésre álló 16 VPVR/M konténeret kihasználni. 2008 tavaszán azonban nyilvánvalóvá vált, hogy a háromoldalú egyezmény késlekedése lehetlenné teszi az azévi szállítást. Ekkor a projekt vezetője, I. Bolsbinsky úgy döntött, hogy más utat keres, felmerült a tengeri út lehetősége. A legkönnyebben elérhető kikötő a szlovéniai Koper, amely szerencsére az engedélyezés szempontjából kedvezőbb EU tagországban fekszik. Sikerült olyan hajóstársaságot is ta-



2. ábra. A kiégett fűtőelemek víz alatti betöltése a VPVR/M konténer kosarába.

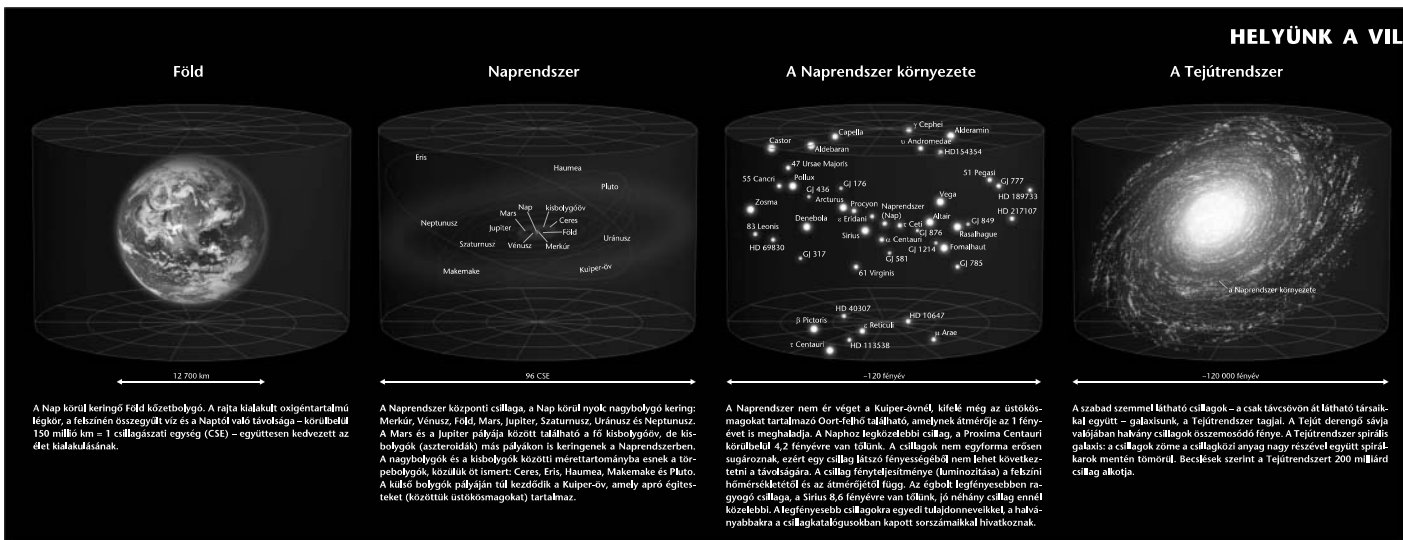
lálni, amely Koperből (1. ábra) Murmanszkba szállította a fűtőelemeket. Az út több mint egy hónapig tartott és nem volt teljesen problémamentes, mert a skót partoknál a vihar horgonyzásra kényszerítette és így néhány napra feltartotta a szállítmányt. Murmanszkból vonaton ment a szállítmány a Majakig.

Ez a szállítás végül is jól sikerült, ám hajszálon múlt, hogy nem hiúsult meg: a szlovén áthaladási engedélyt ugyanis belpolitikai okból visszavonták akkor, amikor a szállítmány már úton volt. Az ok a közelgő választásokkal függött össze. Magas szintű beavatkozás hatására, még mielőtt a vonat a határra ért volna, a visszavonást érvénytelenítették.

E szállítás tanulsága az, hogy ha megvan a megfelelő elszántság, akkor a cél sok nehézség ellenére is elérhető. Ugyanakkor viszont világosan kell látni, hogy ez a megoldás több szempontból hátrányos volt: elsősorban igen sokáig tartott, másodsorban igen drága volt, harmadsorban pedig három átrakást kellett végrehajtani, ami növelte a kockázatot.

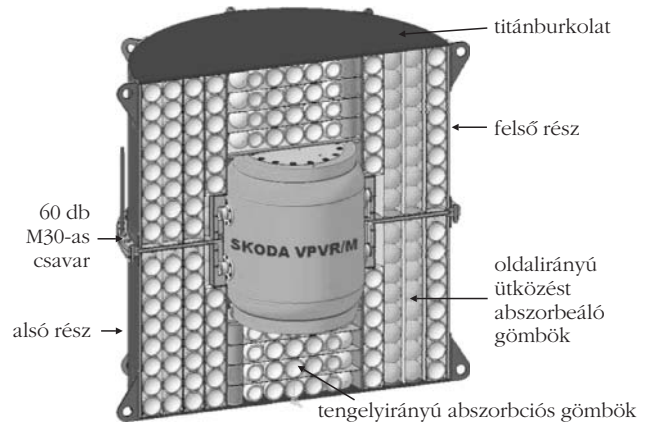
LETÖLTHETŐ ÉS TÖBB, MINT 3 MÉTER SZÉLESEN, SZÍNESEN KINYO

A magyarázó szöveggel kiegészített posztert keresd a Fizikai Szemle (www.fizikaiszemle.hu)





3. ábra. A betöltött VPVR/M konténer sugárvédelmi ellenőrzése.



4. ábra. A biztonságos légiszállításához kifejlesztett huzat szerkezete.

A második szállítás – 2013. október–november

A konverziót követően kerülhetett sor a második szállításra, amelynek eredményeképpen Magyarország megszabadult minden nagy dúsítású urántól. Tekintettel arra, hogy most csak a 2005 után kiegészített fűtőelemek voltak hátra, nem volt szükség mind a 16 VPVR/M konténerre, hanem csak ötre. A fűtőelemek rövidebb pihentetési ideje miatt viszont most nagyobb volt az aktivitásuk, ezért végülis hat konténeret használtunk, ezáltal csökkentve a konténerek hőterhelését. A fontosabb műveleteket a 2. és 3. ábra szemlélteti.

Tekintettel arra, hogy az orosz–ukrán–magyar háromoldalú egyezmény ratifikálására még mindig nem került sor, a második szállítás tervezésekor három lehetőséget vettünk számításba. Az első a már bejárt Koperen át vezető szállítási útvonal volt, a második a rövidebb tengeri szakasz miatt előnyösebbnek tűnő, Szlovákián és Lengyelországon át vezető útvonal, ami az elsőhöz hasonlóan közúti, vasúti és tengeri szállítást is tartalmazott.

A harmadik lehetőség első pillantásra abszurdnak tűnt: légi szállítás. Korábban már előfordult kiegészített fűtőelemek légi szállítása, ám csak néhány speciális esetben, mert a rendelkezésre álló orosz konténer (TUK-6) kapacitása igen csekély.

A Sosny orosz cég kifejlesztett egy „huzat”-nak (overpack) nevezett szerkezetet, amely egy VPVR/M konténer befogadására alkalmas és amely TUK-145/C néven engedélyt kapott a légi szállításra. A kiegészített nukleáris üzemanyag légi szállítása speciális követelményeknek kell megfeleljen, hiszen biztosítani kell, hogy a repülőgép lezuhanása esetén se kerülhessen ki a radioaktív anyag a konténerből. Ezt a célt úgy érték el, hogy gömb formájú elemekből álló, méhrácsra emlékeztető szerkezettel töltötték ki a „huzat” belsejét (4. ábra). A TUK-145/C méretei a fenti cél érdekében igen jelentősek, a henger alakú konténer átmérője és magassága egyaránt meghaladja a 3 métert. Az 5. ábrán a pakolást végző személyek mérete mutatja a „huzat” (a kép alján látható) nagyságát. A

MTATHATÓ A HELYÜNK A VILÁGEGYETEMBEN MIND A NÉGY RÉSZÉ!

Mellékletek menüpontjában, a posztort bátran rakjad ki a fizika-előadó vagy a folyosó falára!

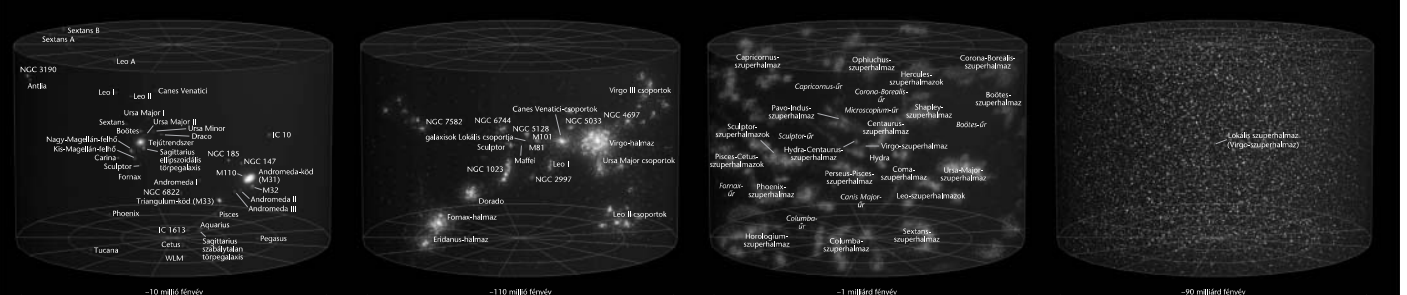
ÁGEGYETEMBEN

A galaxisok Lokális csoportja

Virgo-szuperhalmoz

Lokális szuperhalmozok

Az észlelhető Univerzum



A galaxisok túlnyomó többsége nem eszórán helyezkedik el a térben, hanem csoportosulva. Néhány tucat tagból állnak a galaxiscsoportok, és több száz vagy akár ezer tagja is van a galaxis-halmazoknak. A Tejútrendszer a Lokális csoporthoz tartozik körülbelül 60 ismert galaxissal együtt. E csoport meghatározó tagjai a Tejútrendszeren kívül az Andromeda-kód (M31) és a Triangulum-kód (M33) – mindhárom spirálgalaxis. Mellétek számos szabálytalan és ellipszoidális torpegalaxis alkotja a Lokális csoportot.

A galaxis-halmazok még nagyobb egységekké, úgynevezett szuperhalmozokba szerveződnek. A Lokális csoport (binnen a Naprendszerrel is tartalmazó Tejútrendszerrel) a Virgo-szuperhalmoz része.

A galaxisok halmazait tartalmazó szuperhalmozok között hatalmas kiterjedésű óriások vannak, amelyekben alig fordulnak elő galaxisok. A szuperhalmozokat és az óriásokat egyaránt arról a csillagképről nevezzük el, amelybe a geometriai középpontjuk esik.

Az Univerzum nagy skálájú szerkezte valójában szappanhabba emlékeztet: a buborékok felületén vannak a galaxisok és azok nagyobb szerveződései, a galaxis-halmazok és szuperhalmozok. A fény végig terjedési sebessége (körülbelül 300 000 km/s) miatt minél messzebbre nézünk, annál korábbi állapotokban vehetjük szemügyre az égitesteket és azok rendszereit.

A Fizikai Szemle melléklete, 2014. április
Kereskedelmi forgalomba nem kerültek, oktatási célra szabadon felhasználható.
Andrew Z. Colvin munkája alapján Szabolcs Liszói és Kármán Tamás készítette.



5. ábra. A VPVR/M konténer betöltése a „huzat”-ba.



6. ábra. Útrakészen.

kezelhetetlenül nagy tömeg elkerülése végett a „huzat” anyaga titán, ez természetesen jelentősen növelte az árát. A légi szállítási engedély megadása előtt elvégezték a repülőgép lezuhanását szimuláló kísérletet, a konténeret rakéta segítségével belelőtték egy betonfalba.² A próba sikerült: a huzat roncsolódott, ám a benne lévő VPVR/M konténer sértetlen maradt.

A három lehetőséget mérlegelve a projekt vezetése a légi szállítást mellett döntött, elsősorban azért, mert így lehetett a szállítást a legrövidebb idő alatt végrehajtani és így a szállítás kockázata csökkenthető volt. Két TUK-145/C állt rendelkezésre, így három fordulóra volt szükség. Minden esetben a Volga-Dnyepri légitársaság AN-124 típusú gépével érkeztek az üres TUK-145/C konténer a Liszt Ferenc repülőtérre. A gép orrának nyitása után a gép saját rámpáján a trélerre szerelt TUK-145/C-t egy kamionvontató lehozta, majd felszállította a Budapesti Kutatóreaktor csillebérci telephelyére. A jelentős tömegre tekintettel (a konténer és a tréler együttes tömege körülbelül 42 tonna) a rámpát át kellett építeni úgy, hogy dőlésszöge kisebb legyen. A kutatóreaktor kiégett fűtőelemeit előzetesen már elhelyezték a VPVR/M konténerekben, így csak a konténereket kellett a „huzat”-ba beemelni, majd az előbb leírt szállítási műveleteket kellett fordított sorrendben megismételni. A repülőgép kevesebb mint öt óra alatt elérte a Majakhoz legközelebbi repülőteret, ahonnan a budapestihez hasonló módon továbbították a szállítmányt. A szállítás teljes időtartama jóval 24 óra alatt maradhatott mindhárom esetben. Az AN-124 repülőgép kapacitása lehetővé tette két TUK-145/C együttes szállítását, sőt még a tartalék alkatrészeket szállító ISO konténer is elfért a gépen.

A 6. ábrán látható a TUK-145/C a kamionon, indulás előtt. A 7. ábra mutatja az AN-124 típusú repülőgépbe történő berakodást. A rakodás éjszaka történt, amint látszik a képen.

E szállítás tanulsága az, hogy elegendő anyagi eszköz rendelkezésre állása esetén előnyös a légi szállítás, hiszen így a teljes időtartam csak töredéke minden más szállítási módnak, annak ellenére, hogy na-

gyobb és nehezebb szállítókonténerre kell használni és így a betöltés valamivel összetettebb feladat. Természetesen még az óriási szállító repülőgép kapacitása is jóval kisebb, mint akár a vonaté, akár a kisebb hajóké, ezért nagy mennyiségek esetében ez a szállítási mód nem célszerű. Gondoljunk például arra, hogy a 2005-ös szállítás légi megvalósítása esetén nyolc légi fordulóra lett volna szükség.

Összegzés

A Budapesti Kutatóreaktor konverziója sikeresen befejeződött, majd Magyarország megszabadult minden nagy dúsítású uránt tartalmazó fűtőelemtől. Az ország eleget tett nemzetközi kötelezettségének, méghozzá úgy, hogy továbbra is rendelkezik kutatóreaktorral, ami lehetővé teszi a korszerű neutronfizikai kutatásokat és fontos szerepet játszik a kórházak diagnosztikai és terápiás célú radioaktív izotópokkal való ellátásában.

A sors iróniája, hogy néhány nappal az utolsó szállítás befejezése előtt ratifikálták az orosz–ukrán–magyar háromoldalú egyezményt. A projekt valamennyi résztvevője egyetértett abban, hogy igen helyes volt más utat keresni, ugyanis igen hátrányos lett volna, ha még csak azután került volna sor a kiégett fűtőelemek első szállítására, hiszen például a Budapesti Kutatóreaktor már régen nem üzemelhetne.

7. ábra. Felhajtás a rámpán.



² Megtekinthető: www.youtube.com/watch?v=cNX1fVrdg0g#t=87 és hosszabban: www.youtube.com/watch?v=-8r9f2ojmY#t=461

A GRAVITÁCIÓRÓL

avagy: milyen szerepet játszanak világunkban a lovasszobrok? – 1. rész

Bokor Nándor
BME Fizikai Intézet

Newton 2. axiómája ($\mathbf{F}_e = m\mathbf{a}$) szerint, ha egy testre nem hat eredő erő, akkor a gyorsulása nulla (ha $\mathbf{F}_e = 0$, akkor $\mathbf{a} = 0$). Ahhoz, hogy ezen állítás igazságtartalmát értelmezni tudjuk, meg kell állapodnunk abban, mit értünk erő és gyorsulás alatt. A gyorsulás (a sebességváltozás gyorsasága) definiálásához *vonatkoztatási rendszert* kell bevezetnünk (amihez képest mérjük a sebesség időegységre eső változását). Ez elvileg akármilyen laboratórium, szoba, úrhajó stb. lehet, de Newton szerint a fenti axióma a vonatkoztatási rendszereknek csak egy speciális fajtájában, az úgynevezett inerciarendszerekben igaz. Mi az inerciarendszer? Newton válasza: Inerciarendszer alatt olyan vonatkoztatási rendszert értünk, amelyben ha egy testre nem hat eredő erő, és nyugalmi helyzetből elengedjük, akkor egy helyben marad. (Ez Newton 1. axiómája, ami voltaképpen az inerciarendszert definiáló kijelentés.) Nem odázhathatjuk tehát tovább az erő gondos definiálását, hiszen az inerciarendszer definíciójához fel kellett használni az erő fogalmát. A szokásos megfogalmazás szerint az erő két test közötti kölcsönhatás mértéke. Ezzel a mondattal azonban nem nagyon jutottunk előbbre. Honnan tudjuk, hogy egy tömegpont éppen részt vesz-e egy kölcsönhatásban vagy nem? Ez különösen akkor nehezen eldönthető kérdés, ha a testen *nem látszik*, hogy éppen kölcsönhatásban van egy másikkal. Ha egy testhez éppen nem ér hozzá semmi, közben azért szereplője-e valamilyen kölcsönhatásnak (mondjuk mert a térnek abban a pontjában valamilyen, más testek által létrehozott „erőtér” van, a test pedig rendelkezik olyan képességgel, hogy arra az erőtérre reagálni tud), vagy éppen tényleg „békén van hagyva”?

Tegyük fel, hogy egy szobában állunk, és elejtünk egy követ. Azt látjuk, hogy a kő a szoba egyik kitüntetett irányába, a padló felé gyorsul. Erre a látványra kétféle magyarázatot is adhatunk:

(1) Inerciarendszerben vagyunk, és valamilyen erő hat a kőre, ami gyorsítja (ezt az erőt csak valamilyen erőtér fejtheti ki, mert a kőhöz esés közben – láthatólag – nem ér hozzá semmi).

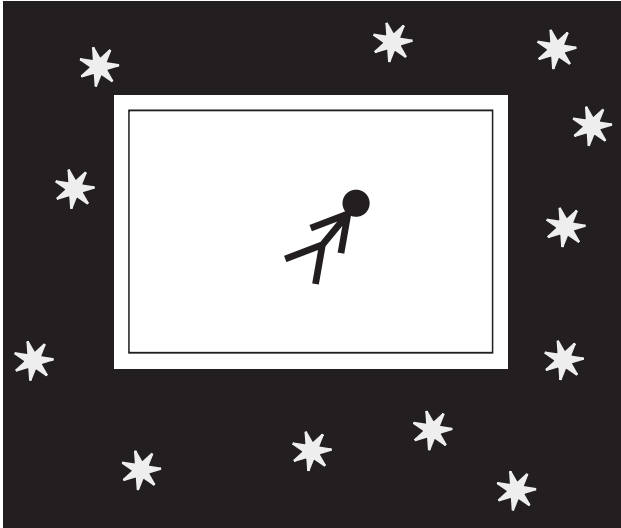
(2) A kőre nem hat semmilyen erő, látszólagos gyorsulását csupán különleges nézőpontunk okozza, tudniillik az, hogy nem is inerciarendszerben vagyunk.

Hogyan tudjuk eldönteni, hogy melyik magyarázat a helyes?

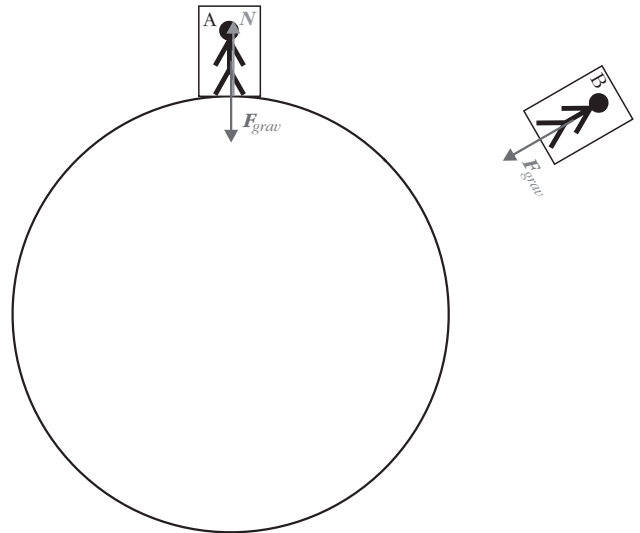
Newton válasza: *ő maga posztulálja*, hogy a Föld az üres téren keresztül erőt fejt ki a kőre, és ez kész-teti gyorsulásra a követ. Newton tehát *önkényesen eldönti*, hogy a gravitációt erőnek kell tekinteni, és ezzel az (1)-es magyarázat mellett teszi le a voksát. Ugyanerre a kérdésre *Einstein válasza: kérdezzük meg a követ!* Mesélje el, hogy miután nyugalmi helyzetből óvatosan elengedtük, „érett-e” valamit. Ha az elengedés pillanatában, illetve esés közben lökést, rántást, nyomást érezt, akkor valami erő rántotta meg (az üres téren keresztül). Ha nem érezt semmilyen rántást, lökést, akkor erő sem hatott rá. Mivel Einstein erő-definíciójából hiányzik az a fajta önkényesség, amellyel Newton besorolja a gravitációt az erők közé, az alábbiakban Einstein erő-fogalmát fogadjuk el jogosnak. Ezzel az inerciarendszer fogalmát bizonyos szempontból ki is hagyhatjuk a diszkusszióból. Az inerciarendszer newtoni definícióját kiválthatjuk a következő állítással: *Ha egy tömegpontra nem hat erő, akkor a tömegpont nem „érez” semmit.*¹ Ezen állításnak vonatkoztatási rendszertől független, invariáns jelentése van. Az erőnek ezzel a szemléletes értelmezésével megszűnt az igény az inerciarendszer fönti, kicsit homályos definíciójára. Természetesen feladatok kiszámításakor továbbra is hasznosak az inerciarendszer, illetve a gyorsuló vonatkoztatási rendszer fogalmak, de értelmezésük egyszerűbb: gyorsuló vonatkoztatási rendszernek például azt a vonatkoztatási rendszert fogjuk nevezni, amelyben az $\mathbf{F}'_e = m\mathbf{a}'$ alakú egyenlet csak akkor írja le helyesen a test mozgását, ha a bal oldalra olyan „erő”-tagokat is felírunk, amelyeket a test *nem érez* (tehát nem erők).

Mint az alábbiakban látni fogjuk, a kezünkől elengedett kő – ha válaszolni tudna – nemleges választ adna Einstein kérdésre: az elengedés pillanata után semmiféle lökést nem „érett”, és végig az esés közben sem rántja meg semmi. Épp ellenkezőleg: amíg a kezünkben tartottuk, addig volt folyamatos nyomásnak kitéve, amikor elengedtük, azonnal a lehető „legellazultabb” állapotba került. Einstein kérdése és a kő válasza alapján a gravitációt nem tekinthetjük erőnek. Most lássuk a részleteket!

¹ A tömegpont fogalmát természetesen nem matematikai pontként értelmeztem – amely elvileg sem „érezhet” semmit –, hanem tágabb értelemben használom: tömegpont az a test, amelynek belső struktúrája az adott fizikai probléma tárgyalása szempontjából figyelmen kívül hagyható.



1. ábra. Az inerciarendszer űrhajó, benne a szabadon lebegő utas.



2. ábra. Gravitációs vonzócentrum közelében.

Mozgás leírása inerciarendszerben

A világűrben kikapcsolt hajtóművel, forgásmentesen lebeg egy űrhajó (1. ábra). Az űrhajóban nincs kitüntetett irány, az űrhajó utasa szabadon lebeg. Az űrhajó *inerciarendszer*.²

Az űrhajós mindenféle fizikai kísérletet végez. Ne kiütözik az űrhajó falának, lebegés közben belekapaszkodik egy falhoz rögzített gumi expanderbe stb. Foglaljuk össze a tapasztalatait!³

(A1) „Amikor egy testre erő hat, azt a test *megérzi*: az eredő erő valamilyen irányban meglöki.” (Éppen ilyesmire – a nagy erőhatások elviselésére – edzenek az űrhajósok a földi kiképzőközpontban, például az úgynevezett centrifugában.)

(A2) „Azokban a pillanatokban, amikor egy testre éppen nem hat erő, a test *nem érez semmi lökést*, szabadon lebeg.”

Pontos atomórákkal végzett kísérletei során az űrhajós meglepő jelenségekre figyel fel. Ha sok atomórát az űrhajó egy adott helyéről elmozgat (kiindulási esemény), majd később ismét összehozza őket egy helyre (érkezési esemény), akkor a két esemény között az atomórák különböző eltelt időt regisztrálnak. Az eredmények rendszerezése után nagyon egyszerű és alapvető természeti törvényt tud megfogalmazni:

(A3) „Adott két esemény között az a test (atomóra) *öregszik* a legtöbbet (regisztrálja a legtöbb eltelt időt), amely a két esemény között végig erőmentes, relaxált mozgást végzett.”

Ezt az elegáns és egyszerű természeti törvényt elnevezi *Extremális Öregedés Elvének*.

² Most a newtoni és az einsteini nézőpont véleménye megegyezik, a gravitáció problémáját – tudniillik erő-e vagy sem – ez a példa egyelőre nem veti fel, hiszen az űrhajó távol van minden égitesttől.

³ Itt könnyű eldönteni, hogy mikor hat egy testre erő, hiszen az összes kölcsönhatás fizikai kontaktust is jelent, a fallal, az expanderrel stb.

Newtoni nézőpont: a gravitáció erő

A newtoni nézőpont elfogadja a fenti (A1), (A2) állításokat mindaddig, amíg azok a világűrben, minden égitesttől távol, forgásmentesen lebegő űrhajóban végzett kísérletekre vonatkoznak. Gravitációs vonzócentrum közelében (2. ábra) azonban az ő nézőpontjából – aki a gravitációt erőnek gondolja – a fenti állítások látványosan nem működnek. A 2. ábrán A-nak elvileg nem lenne szabad semmit sem éreznie (hiszen a rá ható erők eredője zérus), vagy legalábbis felfelé és lefelé ható erőt egyaránt éreznie kéne, ő mégis minden porcikájában csakis felfelé ható nyomóerőt érez. B-nek elvileg folyamatosan nyomást kellene éreznie a gömb középpontja felé (hiszen hat rá arrafelé mutató erő), ő mégsem érez semmi ilyet, hanem relaxált állapotban lebeg a szabadon eső kabin belsejében, és azt sem tudja, merre van a gömb középpontja.⁴

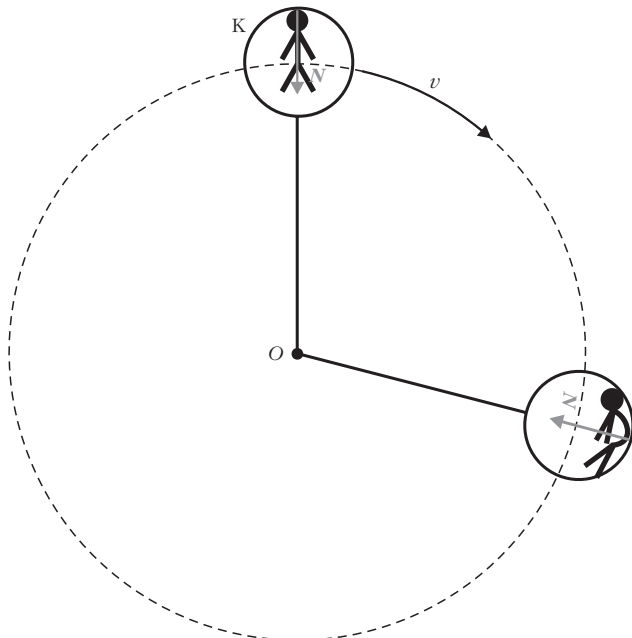
Az (A3) állítás relativisztikus effektus, nem része az időt abszolútnak tekintő newtoni fizikának. Itt is két választás áll azonban előttünk: erőnek tekintjük-e a gravitációt vagy sem. Ha igen, akkor gondba kerülünk. A 2. ábra viszonyai között ugyanis az atomórákkal végzett kísérletek szerint az az óra regisztrálja a legtöbb eltelt időt, amelyik a két adott esemény között – az ábra B űrhajósához hasonlóan – végig csak a gravitációs erő hatására mozgott.

A newtoni nézőpont szerint tehát gravitációs vonzócentrum közelében a fenti (A1), (A2), (A3) egyszerű természeti törvények módosításra szorulnak:

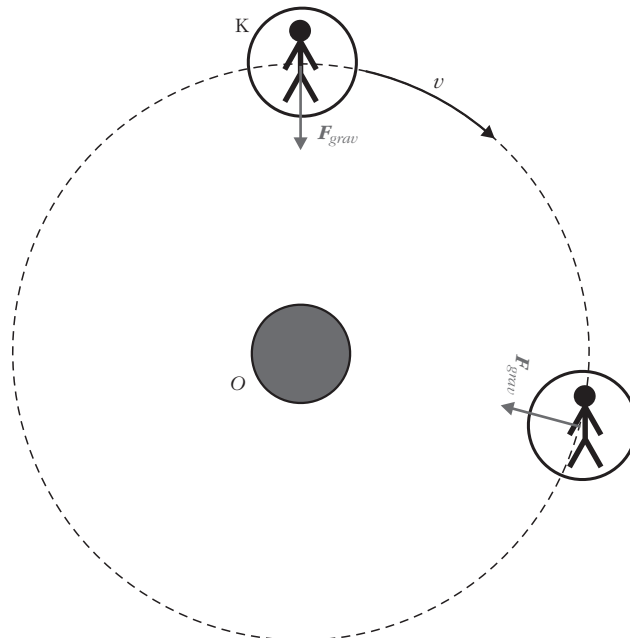
(A1, ha a gravitáció erő) „Amikor egy testre erő hat, azt a test *megérzi*: az eredő erő valamilyen irányban meglöki. *Kivéve ha a testre egyedül a gravitációs erő hat, azt ugyanis a test nem érzi meg.*”

(A2, ha a gravitáció erő) „Azokban a pillanatokban, amikor egy testre éppen nem hat erő, a test *nem érez semmi lökést*, szabadon lebeg. *Kivéve gravitációs*”

⁴ Hogy mégis érezhet *valamit*, arról bővebben lásd az írás következő, jövő hónapban megjelenő részét.



3. ábra. A körhinta.



4. ábra. Nagy tömegű test körül keringő űrhajó.

vonzócentrum közelében, ott ugyanis amikor éppen nem hat rá eredő erő, akkor is érez lökést/nyomást, nincs relaxált állapotban, nem lebeg szabadon.”

(A3, ha a gravitáció erő) „Adott két esemény között az a test (atomóra) öregszik a legtöbbet (regisztrálja a legtöbb eltelt időt), amelyre a két esemény között végig *vagy semmilyen erő nem hatott (gravitációs vonzócentrumtól távol), vagy csak a gravitációs erő hatott.*”

Látható, hogy a newtoni rendszer nagyon nyögve nyelős, erőltetett. Önkényesen besorolja az erők közé a gravitációt, majd kijelenti róla, hogy az *alapvetően* más-hogy viselkedik, mint a többi erőtípus: ez az egyetlen erő, amelyet nem érez az, akire hat, és amely nem engedelmeskedik a Maximális Öregezés Elvének.

Einsteini nézőpont: a gravitáció nem erő

Einstein elmélete sokkal egyszerűbb és elegánsabb. Azzal, hogy a gravitációt nem tekinti erőnek, az űrhajós által talált (A1), (A2), (A3) természeti törvények változatlan formában érvényesek maradnak nagy égitestek közelében is, nincs szükség az erőltetett newtoni módosításokra.

Nincs is tehát gravitáció? Az einsteini nézőpont válasza: gravitációs *erő* valóban nincs. De a gravitáció *jelensége* nagyon is létezik: ha nem létezne, akkor a Földet semmi nem készítené arra, hogy a Nap körül keringjen. *Valami* nem engedi, hogy a Föld – bár erő nem hat rá – egyenes vonalban eltávolodjon a Naptól. Einstein elmélete szerint ez a valami a téridőnek a Nap által létrehozott *görbülete*.⁵

Ha Newton és Einstein magyarázata teljesen azonos mérési eredményeket produkálna és azonos jóslásokat adna a világról, akkor ekvivalens elméletekről lenne

szó. Einsteiné mindössze elegánsabb lenne Newtonénál, de esztétikai érzékünkön kívül semmi nem indokolná, hogy érvényesebbnek tekintsük, mint Newtonét. A perdöntő bizonyítékot arra, hogy Einstein elmélete a pontosabb, azok a kísérletek adják, amelyek eredményére a két elmélet más jósol (például a Nap melletti fényelhajlás, a Merkúr perihélium-vándorlása, a GPS-műholdak helyes óraszinkronizációja).

Miért nem erő a gravitáció? További példák

Tanulságos egymás mellé állítani olyan példákat, amelyekben két egyforma tömegpont – newtoni fejjel gondolkodva – azonos mozgást végez: ugyanolyan irányú és nagyságú erő hat rájuk, és így gyorsulásuk is azonos, viszont *teljesen mást tapasztalnak*. Ez newtoni szemmel nézve igazi rejtély, amelynek megfejtésében az einsteini nézőpontra való áttérés segít bennünket.

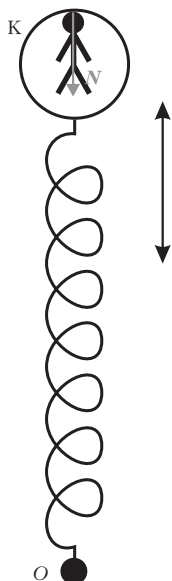
Körhinta

A 3. *ábrán* egy körhinta látható. A K kabint valamilyen centrális (az O pont felé mutató) erő tartja forgásban. Ez lehet például kötél-erő (ekkor a K kabint egy kötélt ténylegesen összekapcsolja a rögzített O ponttal), de lehet Coulomb- vagy Lorentz-erő is.⁶

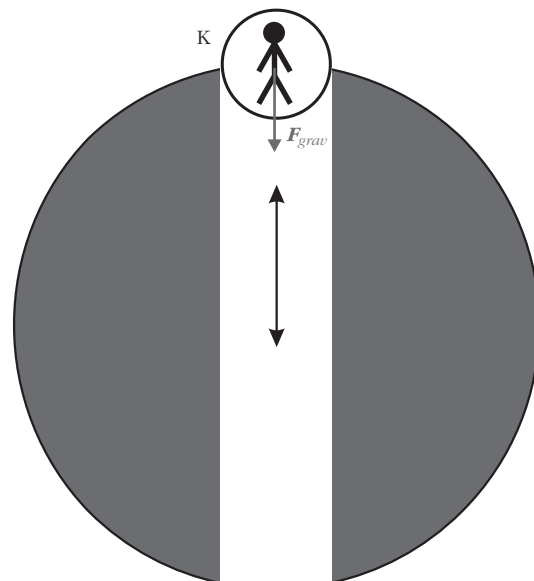
A kabinban levő ember a kabinnal együtt körpályán kering az O pont körül. A kabin utasa *érzi*, hogy odanyomódik a kabinnak mindig az O-val átellenes falához. Az utast a kabin fala által kifejtett **N** nyomóerő tartja a körpályán. Utasunk nem csak arról tud

⁵ Lásd az írás következő, jövő hónapban megjelenő részét.

⁶ Az előbbi esetben például O egy pozitív ponttöltés, amelynek elektrosztatikus tere a negatív töltéssel ellátott K kabint vonzza, az utóbbi esetben pedig az elektromosan töltött kabint az ábra síkjára merőleges homogén mágneses tér készíti körmozgásra.



5. ábra. Inerciarendszerben rugóhoz erősített kabin.



6. ábra. Gravitációval készített rezgőmozgás.

beszámolni, hogy folyamatosan erő hat rá (hiszen érzí), de még azt is becsukott szemmel meg tudja állapítani, hogy éppen merre van az O pont, hiszen az N erő mindig arrafelé nyomja.

A 4. ábra látszólag ugyanilyen mozgást mutat, azzal az eltéréssel, hogy a kabint ezúttal az O pontba tett nagy tömegű test gravitációs hatása készíti körmozgásra. (Az ábra a newtoni nézőpontnak megfelelően erőnek ábrázolja a gravitációt.) Mit érez a kabin utasa, aki a kabinnal együtt körpályán mozog O körül? *Nem érez semmilyen lökést az O irányába.* Nem nyomódik neki a kabin falának, hanem szabadon lebeg a kabin belsejében. Ha nem néz ki az ablakon, akkor fogalma sincs róla, hogy éppen körmozgást végez, és azt sem tudja megállapítani, hogy merre van az O pont.

Rugó

Az 5. ábra inerciarendszerben ábrázol egy K kabint, amely egy rugóhoz van erősítve. A rugó másik végét valamilyen fix O ponthoz rögzítjük.⁷

A kabin a ráerősített rugó rugalmas erejének hatására az O ponthoz képest szinuszos gyorsulással rezeg. A kabinban levő ember is a kabinnal együtt mozog, az ő rezgőmozgásáért a kabin fala által kifejtett nyomóerő a felelős. *Érzi-e* a kabin utasa a szinuszos gyorsulást? Igen, érzi. Képzelnünk el, hogy a kabin fala szivaccsal van kibélelve. Az utasnak, attól függően hogy hol tart a pályáján, a feje vagy a lába fog különböző mértékben a szivacsba nyomódni. Kis gyakorlás után becsukott szemmel is meg tudja állapítani, milyen messze van éppen az O ponttól.

⁷ Most ne akadjunk fenn azon, hogy fizikailag hogyan hozzuk létre ezt a fix pontot. El tudunk képzelni például a világűrben egy kétszeres hosszúságú rugót, amelynek O a középpontja, és a másik végéhez egy a K -val azonos tulajdonságú kabin van erősítve. Ha a két űrkabint ellenfázisban rezgésbe hozzuk, az O pont nyugalomban marad. Egy ilyen elrendezés – amely szabadon lebeg – a felső felét mutatja az 5. ábra.

A 6. ábra látszólag ugyanilyen mozgást mutat, azzal az eltéréssel, hogy a kabint ezúttal a gravitáció készíti rezgőmozgásra.⁸ Ez a fajta rezgőmozgás jön létre, ha egy nagy tömegű, homogén tömör gömbbe lyukat fúrunk, és a lyuk felett kezdősebesség nélkül elengedünk egy kis tömegű kabint.

„A kabin gyorsulását ezúttal is szinuszfüggvény írja le az időben.” Az előző mondat a nagy tömegű gömbhöz rögzített vonatkoztatási rendszerben érvényes. Newton szerint ez a vonatkoztatási rendszer inerciarendszer. Newtoni nézőpontból a kabinban levő embert most a „gravitációs erő” készíti rezgőmozgásra. De *érez-e* a kabin utasa bármit is ebből a készítésből? *Érzi-e* lökést az ábra F_{grav} vektorának irányába? Semmi ilyen nem érez. Nem nyomódik neki a kabin falának, hanem szabadon lebeg a kabin belsejében. Ha nem néz ki az ablakon, akkor fogalma sincs róla, hogy éppen rezgőmozgást végez, és még csak arról sem, hogy melyik irányban van az O pont.

Példánk egyrészt illusztrálja, mennyire erőltetett a gravitációt erőnek tekinteni, hiszen egy tömegpont (amilyenek a kabin utasát a fenti példákban vettük) semmit sem érez a gravitáció hatásából. Másrészt pedig érthetetlennek tűnik: hogyan eredményezhetnek látszólag azonos mozgásokat (azonos pályagörbéket, azonos világvonalakat) ennyire ellentétes fizikai hatások? Einsteini nézőpontból magától adódik a magyarázat: mindkét példában míg az egyik tömegpontra (3. és 5. ábra) eredő erő hat, így inerciarendszerből nézve valóban gyorsul is, a másik tömegpont (4. és 6. ábra) erőmentesen mozog, tehát egy helyesen értelmezett inerciarendszerből nézve nem is gyorsul. Hogy mégis azonosnak látjuk a két tömegpont mozgását, az csupán illúzió, amit az okoz, hogy más típusú vonatkoztatási rendszerből nézzük őket: a 3. és az 5. ábra inerciarendszerbeli nézőpontot mutat be, a 4. és 6. ábra viszont nem.

⁸ Az ábra ismét erőnek ábrázolja a gravitációt, a newtoni nézőpontnak megfelelően.

ŰRSZONDAMODELL-ÉPÍTÉS – ÚT A FIZIKÁHOZ

Hudoba György

Óbudai Egyetem Alba Regia Egyetemi Központ, Székesfehérvár

A napjainkra már-már rutinszerűvé váló űrkutatás még mindig érdeklődésre tart számot, főként, ha egy-egy speciális űreszközre a média is aktívan reagál. Ezen érdeklődésre épít a Hunveyor-projekt, amely számos közép- és felsőfokú oktatási intézményt kapcsol össze, természetesen a helyi sajátosságokhoz, érdeklődési területekhez és lehetőségekhez igazítva. A *Fizikai Szemle* hasábjain korábban már megjelent egy átfogó ismertető, amely bemutatta az űrszondamodell sokoldalú felhasználását a fizika oktatásában és a tantárgyi kapcsolatokban [1]. Jelen cikkben egy konkrét eseten, nevezetesen az Óbudai Egyetem Alba Regia Egyetemi Központjában folyó Hunveyor-4 szonda (1. ábra) építésén keresztül vizsgáljuk meg a részleteket.

Egy kis történelem, motiváció

Intézetünk – amelyet akkoriban még Kandó Kálmán Műszaki Főiskolának neveztek – 2001-ben kapcsolódott be az űrszondamodell-építő programba. Célként azt tűztük ki, hogy a hallgatók számára hosszú távú értelmes és hangulatos keretprogramot biztosítsunk a tudományos diákköri tevékenységhez, és – a tehetségesebb és kitartóbb hallgatók esetén – akár diplomamunkák is születhessenek.

A feladat kiírása ezek után a következőképp körvonalazódott. Képzelnék el, hogy egy Földön kívüli égi

1. ábra. A Hunveyor-4 űrszondamodell a Szaharában.



testre (Holdra, Marsra, a Jupiter, vagy akár a Szaturnusz egyik holdjára) kutató űrszondát küldünk, amelynek feladata egy jövőbeli kolónia megalapításának előkészítése. Készítsünk egy ilyen, távolról vezérelhető mérési adatgyűjtő robotszondát! A korralladva – a szonda legyen elérhető az Internetről is!

A fenti követelményeknek megfelelően a megoldandó főbb feladatok:

- az űrszonda fém tartóvázának elkészítése;
- különböző műszermodulok építése;
- a szonda műszeregyüttesének vezérlése;
- mérési adatok gyűjtése, tárolása, továbbítása, feldolgozása;
- egyéb kiegészítő és kiszolgáló elektronikus és mechanikus elemek készítése;
- a szonda energiaellátásának biztosítása;
- kommunikáció a „földi irányító központtal”;
- a szonda külvilág számára való elérhetősége.

Találkozás a fizikával

Intézetünk fő profilja a villamosmérnök-képzés, így a szonda tartóvázának egyszeri elkészítésén kívül a fenti feladatok jól illeszkednek a diákokkal szemben támasztott követelményekhez. Az egyes részfeladatok számos szakterületre ágaznak szét, a sikeres megoldáshoz azok összehangolt ismerete szükséges. A fizikához alapvetően a különböző műszerek építése, valamint a szonda energiaellátásának biztosítása kapcsolódik. A tananyagban hallottak gyakran nem is elegendőek, az ismeretek további bővítésére, elmélyítésére, kutatásra, az irodalom tanulmányozására és számos saját kísérlet elvégzésére, majd a megépült rendszer összehangolt működésének vizsgálatára, például földi analóg terepgyakorlatokon való kipróbálására is szükség van. Vagyis nem tételes fizikaoktatás folyik, hanem bűjtatott fizikatanulás, amely hasznos melléktermékként jelenik meg a szonda építése során. A továbbiakban a fizikával kapcsolatos tudni-, illetve tanulnivalókat tekintjük át néhány kiragadott példán keresztül.

Érzékelők

A szondának detektálnia kell környezetének fizikai tulajdonságait, állapotát és annak változásait. Egyik alapvető termodinamikai jellemző a hőmérséklet, egy másik a levegő áramlásának sebessége és iránya, mérendő továbbá a beérkező megvilágítás erőssége, spektrális összetétele, ami például a napelemes energiaellátó rendszer számára meghatározó. Néhány további jellemző: a környezeti zaj, villámlás, légköri nyomás, páratartalom, gázösszetétel. Mindezeket különböző



2. ábra. A diákok által épített LED spektrométer.

fizikai vagy kémiai változások, illetve ezek elektromos jellé való átalakítása révén lehet detektálni.

Hőmérsékletmérés

A hőmérséklet mérését lehetővé tevő körülmények:

- a testek hőmérséklet-változása során fellépő fizikai jelenségek:
 - a testek térfogatának, illetve alakjának változása,
 - vezetők és félvezetők elektromos ellenállásának, megváltozása,
 - a termoelektromosság függése a hőmérséklettől;
- az egymással érintkező testek hőmérsékletének kiegyenlítődése;
- olyan folyamatok létezése, amelyek mindig ugyanazon a hőmérsékleten mennek végbe (például: halmazállapot-változások).

A hőmérséklet elektromos meghatározására három lehetőség áll rendelkezésre:

- termoelektromos jelenség;
- a fémek hő okozta ellenállás-változása;
- a félvezetők hő okozta ellenállás-változása.

A mérőeszköznek, így a hőmérőnek is a következő követelményeknek kell eleget tennie:

- a mérendő rendszer állapotát ne változtassa meg, vagyis esetünkben a hőkapacitása elhanyagolható legyen a mérendő rendszeréhez képest;
- a (termikus) egyensúly eléréséhez szükséges idő (beállási idő) kisebb legyen, mint a mérésre rendelkezésre álló idő;

• a beállási időnek lényegesen kisebbnek kell lennie a mérendő (hőmérséklet)-változás időtartamánál;

• megfelelő érzékenységgel kell rendelkeznie a mérési tartományon belül.

További figyelembe veendő paraméterek:

- linearitás: a mérési tartománytól függően a lineáris, az exponenciális, vagy a logaritmikus jellegű görbe az előnyösebb;

- zaj;
- stabilitás;
- mérési tartomány, határadatok (ezt túllépve a detektor érzéketlen vagy tönkremegy).

Fényerősségmérés

A fényerősség mérésére használt eszközök: fotoellenállások (Se, CdS, CdSe, PbS, PbSe), fotodióda, fototranzisztor, bolométer, mikrobolométer mátrix (2. és 3. ábra). Az optikai sugárzás mérésére a következő fizikai hatások alkalmasak:

- külső és belső fényelektromos hatás;
- zárórétegben fellépő fényelektromos hatás;
- termoelektromos fényelektromos hatás;
- egyéb termikus hatás.

A fotodetektorok fontos további paraméterei a különféle zajok (termikus, vagy Johnson-zaj, sörétzaj, fotonzaj, sötétáram).

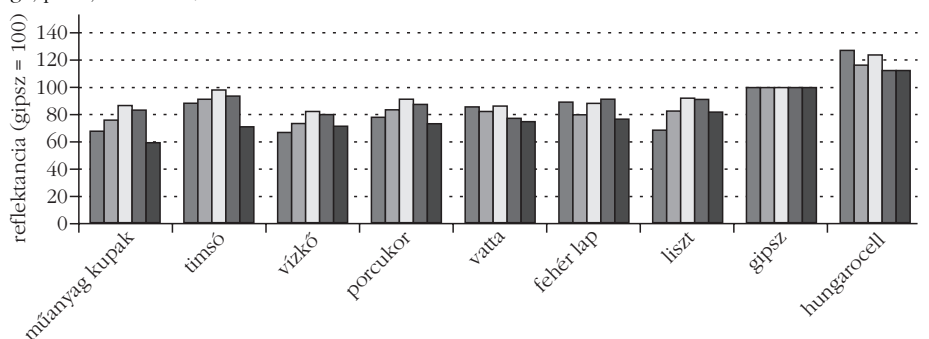
Még sorra lehetne venni a diákok által elmélyülten tanulmányozott témákat, tervezett és megépített további eszközöket is, de már a fenti szemléltetésből is kiviláglik, hogy a szondaépítés komplex feladat és az eredményes megvalósításhoz széles körű fizikai ismeretekre is szükség van.

Az oktatási intézmények sajátossága, hogy egy-egy diák csak viszonylag rövid ideig tud részt venni a munkában, tehát az építést hosszú távra kell tervezni. Időközben a technikák és technológiák változnak és fejlődnek, ami a már meglévő részek újratervezését vagy átstrukturálását vonhatja maga után. Tehát nem egy komplett, működő, befejezett űrszonda elkészítése a valódi cél, hanem maga az építési folyamat, annak ismeretszerzést, tanulást motiváló fenntartása. Ez a cél eddig megvalósult, és remélhetően a jövőben is így lesz (*címkép*). Eddig tíz diplomamunka és még több TDK-dolgozat született a Hunveyor-4 építése kapcsán.

Irodalom

1. Bérczi Sz., Hegyi S., Hudoba Gy.: A Hunveyor gyakorló űrszondamodell sokoldalú fölhasználása a fizika tanításában és a tantárgyi kapcsolatokban. *Fizikai Szemle* 58/2 (2008) 55–61.
2. Morocco 2013 Mars Analog Field Simulation, <http://www.oewf.org/cms/mars2013.phtml>
3. MARS2013 Morocco Mars Analog Field Simulation Recap, http://www.youtube.com/watch?v=VDfENbC_FOY
4. This week on #simulateMars: MARS2013 Simulation Week 01, <http://www.youtube.com/watch?v=kFRDkS9VRoQ>

3. ábra. Különböző, az emberi szem számára egyformán fehér anyagok LED spektrométerrel felvett, a gipsz visszaverő képességére normált „színképei” (a szürke oszlopok rendre kék, zöld, sárga, piros, infravörös).



FEHÉR IPOLY KÍSÉRLETI TERMÉSZETTANA

Bognár Gergely

Révai Miklós Gimnázium és Kollégium, Győr



Fehér Ipoly pannonhalmi főpát, az MTA tiszteleti tagja

Több mint száznegyven évvel ezelőtt 1871–1873-ban jelent meg első kiadásban hazánk egyik legsikeresebb fizika tankönyve, *Fehér Ipoly Kísérleti természettana*. Számtalan kiadást élt meg, és közel ötven éven keresztül használták középiskoláinkban. A napjainkban megjelenő fizika tankönyv már akkor is sikeresnek mondható, ha öt évig forgalomban marad. Mi lehetett Fehér Ipoly titka, hogy könyve generációkon keresztül töretlen népszerűségnek örvendett, és számtalan tanügyi reform után is megállta helyét? A megoldást részben a szerző személyisége szolgáltatja. Páratlan életutat járt le; gimnáziumigazgató, majd Pannonhalmi főpát, kiváló kísérletező szellemű fizikatanár, a testvéreiről gondoskodó báty, következetes és hiteles szerzetes, és halálos betegségben is állhatatos főpát. Egyénisége és életműve mintaként áll mindannyiunk előtt. Pár sorban emlékezünk a szerzőre és megpróbáljuk feltárni tankönyve titkát.

Fehér Ipoly 1842. április 11-én *Fehér Kálmán* néven látta meg a napvilágot. Szülei korai halála miatt hamar árvaságra jut. Nagybátyja, *Fehér Ipoly* nagymenyi plébános veszi magához a gyerekeket. Kálmán tehetségét hamar felismeri, közbenjár érte, hogy elnyerhesse a királyi püspöki ösztöndíjat. Ezt követően

a Komáromi Bencés Gimnáziumban tanul, majd közép fokú tanulmányai után belép a Bencés rendbe és nagybátyja iránti tiszteletből felveszi az Ipoly nevet.

Teológiai tanulmányai mellett mennyiség- és természettant tanul, és 1866-ban tanári oklevelet szerez. A rend Komáromi Gimnáziumában tanít fizikát és matematikát. A gimnáziumi katedra mellett tankönyveket ír: *Az alcemia szerepe a természettudományok fejlődésének történetében* (1869), *Felsőbb mennyiség-tan elmélete* (1871), *Kísérleti természettan I–II.* (1872), *A vegytan rövid vázolata* (1872), *A vegytan alapvonalai* (1874).

1874-ben *Kruesz Krizosztom* főpát Fehér Ipolyt kinevezte az Esztergomi Főgimnázium igazgatójává, 1882-től pedig a szegedi tankerület főigazgatója. *Vasszary Kolos* főpátot esztergomi hercegrímássá avatják. A bencés kongregáció új főpátnak a tehetséges fizikatanárt, Fehér Ipolyt választotta, aki 1892-től haláláig viselte ezt a tisztséget. Főpátként megújítja a rend gazdasági ügyeit, és bekapcsolódik a millenniumi ünnepekbe. Oktatásszervező munkája ekkor a legaktívabb. 1893–96 között az Országos Középiskolai Tanács elnöke, majd haláláig másodelnöke. Tanulmányt ír *A Közoktatási Tanács reformja* címmel. A Komáromi Gimnáziumot (ahova ő is járt), valamint a Kőszegi Gimnáziumot főgimnáziummá szervezi át. 1896-ban a Magyar Tudományos Akadémia tiszteletbeli tagja.

1906-ban súlyos emésztési gondokkal küszködik, az orvosok megműtik, majd tumort diagnosztizálnak. Súlyos betegsége közben dolgozik, testi szenvedései nem törik meg lelkét és szellemét, végül 1909. október 27-én, hosszú betegség után, egy páratlan életút végén átadja lelkét Teremtőjének.

Kísérleti Természettan

A tankönyvírás nem egyszerű feladat, különösen akkor, ha az első magyar nyelvű középiskolai tankönyvet kell elkészíteni. Hazai előzmények híján elsősorban német nyelvű munkákra támaszkodhatott. Több ábrát és képet is átvett külföldi tankönyvekből. Érdemét mindez nem kisebbíti, mert a tartalmi rész önálló munka és nem fordítás.

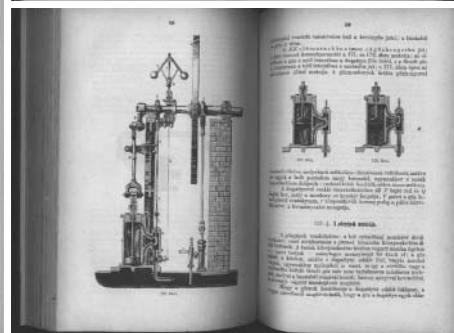
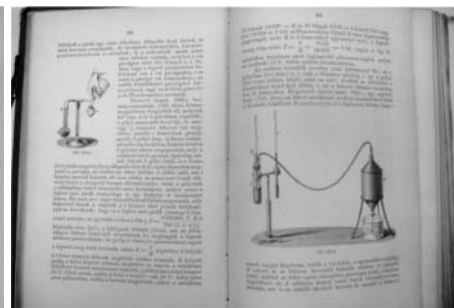
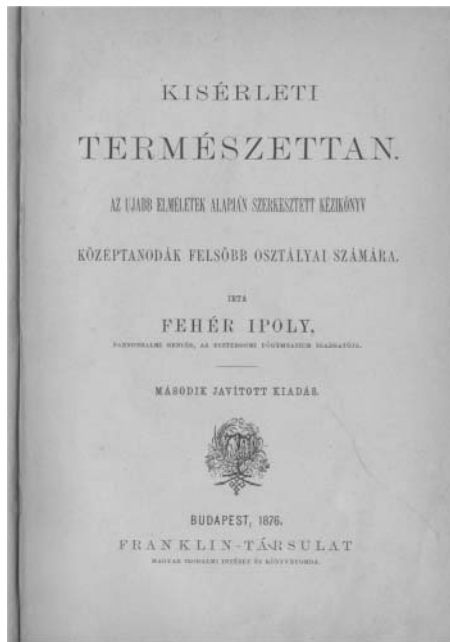
A *Kísérleti Természettan* megírásának első nehézsége nyelvészeti jellegű volt. A fizikában ma használatos szakkifejezések és fogalmak magyarul vagy még nem léteztek, vagy csak nagyon korlátozott számban álltak rendelkezésre. Fehér Ipoly a kor természettudósaihoz hasonlóan megpróbálja az idegen kifejezéseket magyarosítani. A tankönyv korai kiadásaiban szereplő néhány fogalom mára mosolyt csal arcunkra: erély = energia; hőmértan = hőtan; nyugtan = sztatika

(például hignyugtan = hidrosztatika); fénytalálkozás = interferencia; villam = áram; hajcsövesség = hajszálcsövesség; higmozgtan = hidrodinamika; erőműtan = dinamika; nedvhidegmérő = párolgáshőmérő; tűnemény = jelenség; összhangzás = felharmonikusok stb. A későbbi kiadásokban fokozatosan eltűnnek a régies szakkifejezések és helyüket a számunkra ismertek veszik át.

Fehér Ipoly tankönyvének legnagyobb érdeme nem az úttörő munka vagy a nyelvészeti megoldások, hanem a néhány évtizedes új fizikai felfedezések átültetése a középiskolás tananyagba. Külön fejezetben szerepel a mindössze pár évtizede megszületett termodinamika, és több fejezetben tárgyalja a század első felében kialakult elektromosságot és mágnesességet. Nem kis teljesítményről van szó. Gondoljunk bele, mennyire lehetetlen vállalkozásnak tűnik ma, a nyolcvanas évek részecskefizikai eredményeit egzakt módon tárgyalva beépíteni egy gimnáziumi tankönyvbe!

A *Kísérleti Természetan* sikereit méltatva nem feledkezhetünk meg *Szekeres Kálmánról* sem. A századforduló tanügyi reformjai megkövetelték, hogy a könyv kisebb mértékben átdolgozásra kerüljön. Mindezt Szekeres Kálmán oly sikeresen végezte el, hogy a tankönyv még közel húsz évig volt használatban. Egyes fejezetek felcserélődtek, a régies kifejezések néhány kivételtől eltekintve eltűntek és *Kísérleti Fizika* néven új címet kapott. 1901-től a könyv szerzőjeként Fehér Ipoly mellett Szekeres Kálmánt is feltüntetik.

Ha korunk fizikatanára kezébe veszi, természetesen egy más szemléletű, inkább az elméleti ismeretek átadására törekedő könyvet olvashat. A régies kifejezések mellett mára néhány megfogalmazás is elavultnak vagy szakmailag kevésbé precíznek tűnik, jellemzően a hőtani fejezetekben. Ne felejtjük el, hogy a fizika egy új ágának elméleti összefoglalását vetette papírra Fehér Ipoly. Én örülnék, ha százegynéhány év múlva visszanezve mindaz, amit a mai fizikáról tanítok, csak annyi hibát tartalmazna, mint a *Kísérleti természetan*. Mai szemmel nézve ámulatba ejtő az a számtalan kísérlet és mérés, amit a könyv ábrákkal illusztrálva élénk tár. Több leírást egy az egyben átültethetnénk mai könyveinkbe is.



Minden visszatekintés csak akkor ér valamit, ha korunkra vetítve kamatoztathatjuk. Mit üzen hát nekünk Fehér Ipoly tankönyve száznegyven éves távlatból? Elsősorban rávilágít, hogy az érték és a tudás mindig utat tör magának, még akkor is, ha első vagy második ránézésre ez nem nyilvánvaló. Másodsorban bízni kell a jövő nemzedékben, és nem kell félni a tananyagba beépített legújabb ismeretektől. Ha ezek szakmailag igényesen és érthető módon bemutatottak, akkor a felnövekvő generáció érdeklődését felkeltik, és nem rettentik el őket az új felfedezésektől. Az ifjúság rendkívül fogékony az újra, hiszen neki kell élnie majd az eljövendő korokban. Ezért vétek lenne megfosztani őket a természetről alkotott legteljesebb tudásunktól, legújabb ismereteinktől. Harmadszor egyetlen tankönyv sem nélkülözheti a kísérletek és jelenségek ábrákkal segített részletes bemutatását, az egyes témakörök logikai és módszertani egymásra épülését. Természetesen mindez mit sem ér, ha nem a kor szakmai színvonalának megfelelő, vagy anyanyelvünk szépségeit meghazudtoló módon tanítjuk a fizikát. Soha ne feledjük, hogy „természettudományt csak logikusan taníthatunk!”¹

Irodalom

Sörös Pongrác: *A Pannónbalmi Főapátság története*. VI. kötet. Budapest, 1916, 138–145.

¹ *Somogyi Sándor*, a Révai Miklós Gimnázium és Kollégium egykori tanárának hitvallása.

Szerkesztőség: 1121 Budapest, Konkoly Thege Miklós út 29–33., 31. épület, II. emelet, 315. szoba, Eötvös Loránd Fizikai Társulat. Telefon/fax: (1) 201-8682

A Társulat Internet honlapja <http://www.elft.hu>, e-mail címe: mail.elft@gmail.com

Kiadja az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, felelős: Szatmáry Zoltán főszerkesztő.

Kéziratokat nem őrizzük meg és nem küldünk vissza. A szerzőknek tiszteletpéldányt küldünk.

Nyomdai előkészítés: Kármán Stúdió, nyomdai munkálatok: OOK-PRESS Kft., felelős vezető: Szatmáry Attila ügyvezető igazgató.

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

Megjelenik évente 11 alkalommal (egy duplaszámmal), egyes szám ára: 800.- Ft (illetve 1600.- Ft) + postaköltség.

HU ISSN 0015–3257 (nyomtatott) és HU ISSN 1588–0540 (online)

»AZ ATOMOKTÓL A CSILLAGOKIG«

– a fizika népszerűsítése középiskolások körében

<http://www.atomcsill.elte.hu>

2014 szeptemberében kezdődik az Eötvös Loránd Tudományegyetem Fizikai Intézete által szervezett *Az atomoktól a csillagokig* (röviden *Atomcsill*) című előadássorozat tizedik évada.

A sorozat 2005 decemberében, a Fizika Évében indult. Az előadásokat a Fizikai Intézet oktatói és kutatói, valamint hajdan itt végzett fizikusok tartják, akik bemutatják a fizika modern, gyorsan fejlődő szakterületeinek legújabb eredményeit, valamint az ELTE-n folyó kutatásokat, amelyekbe akár a fizikushallgatók is bekapcsolódhatnak. Ismertetjük azokat a lehetséges tanulmányi utakat is, amelyeket a hazai felsőoktatás patinás, nemzetközi hírnévnek és elismertségnek örvendő egyeteme kínál a vállalkozó kedvű, érdeklődő fiataloknak. Nem titkolt szándékunk – a középiskolások érdeklődésének felkeltése mellett – a fizikatanároknak és más érdeklődőknek is bepillantást nyújtani a fizikai kutatások aktuális híreibe, a modern fizika frontvonalához tartozó újdonságokba.

Célunk elsősorban annak bemutatása, hogy a fizika ma is élő, fejlődő tudomány. Még az olyan lezártnak tűnő diszciplínákban is, mint a newtoni mechanika, születnek új, meglepő eredmények, amelyek az egész témakört más megvilágításba helyezik. Nem is beszélve a gyorsan fejlődő kísérleti technika, a hatalmas gyorsítók, a korábban sohasem látott óriási adattömegek feldolgozására képes számítógépes és képfeldolgozó rendszerek által ontott kísérleti adatokra épülő új elméletekről, amelyek a végtelen kicsi és a végtelen nagy objektumok, valamint az igen komplex jelenségek áttekintését és megértését teszik lehetővé.

Ezek az alap kutatási eredmények egyre gyorsuló ütemben kerülnek át az alkalmazásokba és így a mindennapi életbe. Ma már egyre inkább közhely, hogy ha nemcsak élvezni akarjuk a modern technika áldásait, hanem ennek a termékeit gyártó, sőt továbbfejlesztő, innovatív gazdasági rendszert akarunk kiépíteni, akkor ehhez a legfőbb kulcs a modern természet- és műszaki tudományokhoz értő, azokat alkalmazni tudó, kreatív értelmiség nevelése. Elengedhetetlen az is, hogy az e tudományokkal közvetlenül nem foglalkozó, művelt laikusok is értsék a modern természettudomány nyelvét, ismerjék eredményeit, meg tudják különböztetni a nyomtatott és elektronikus sajtó által ontott áltudományos ocsút a tudomány tiszta búzájától. Ehhez kívánunk hozzájárulni előadásaink.

Sorozatunk arra is fel kívánja hívni a figyelmet, hogy a modern fizika művelése nem csupán a gazdag országok hatalmas kutatóintézeteiben, milliárdokba kerülő nagyberendezések körül dolgozó több ezer fős kutatócsoportok tevékenysége. Bár e kutatásokban sok magyar tudós is részt vesz, a tudományt nem csak ilyen drága eszközökkel lehet művelni. Magyarorszá-

gon, ezen belül az ELTE-n is dolgoznak olyan kutatócsoportok, amelyek a tudományos kutatás élvonalába tartoznak, eredményeiket nemzetközileg is számon tartják. Előadónk jelentős része e körből kerül ki – ők tudományterületük általános áttekintése mellett saját legfrissebb eredményeiket is ismertetik.

Az egyes előadások előtt hírt adunk a fizikával kapcsolatos aktuális és fontos eseményekről (például friss Nobel-díjak, más tudományterületek hasonló jellegű előadássorozatai, fizikaversenyek, diákpályázatok, magyar kutatók és diákok tudományos sikerei). Az előadást látványos kísérleti bemutató követi. Hasonló felépítésű az ELTE TTK Kémiai Intézete által szervezett, az *Atomcsill* után két évvel indult program, az *Alkímia ma* című előadássorozat is.

Törekvéseink nagy örömeinkre találtak a hallgatóság igényeivel. Volt olyan alkalom, amikor 250 fő jött el az adott előadásra, de minimálisan 50 fő minden előadáson részt vett. Majd mindegyik előadáson megtelt az egyik legnagyobb, 160 fős előadóterem, sőt sokszor annak lépcsőin is ültek. A sorozat jubileumi 100. előadását pedig 2012 szeptemberében közel 400 fős lelkes hallgatóság előtt tartottuk a TTK aulájában.

Igen sok középiskolás vált visszatérő hallgatónkká. Már a sorozat első éve után többüket láttuk viszont az ELTE fizikus szakára felvett diákok soraiban. Ez a tendencia azóta is tart.

Előadásainkat az utóbbi időben egyre több felnőtt érdeklődő is látogatja. Ez egyrészt sorozatunk növekvő ismertségét jelzi, másrészt arra utal, hogy programunk lassan átveszi a hajdani, TIT által szervezett természet-tudományos ismeretterjesztő előadások szerepét is.

A középiskolás diákok mellett célközönségünk másik fő részét a középiskolai fizikatanárok alkotják. Ezért 2011 tavaszától *Az atomoktól a csillagokig* előadássorozat akkreditált formában harminc órás, ingyenes pedagógus továbbképzést nyújt az érdeklődő tanárkollégák számára. (További részletek találhatóak a <http://pedakkred.oh.gov.hu/PedAkkred/Catalogue/CatalogueDetails.aspx?Id=3208> webcímen.)

Fontosnak tartottuk és tartjuk, hogy előadásaink anyaga eljuthasson azokhoz a diákokhoz, tanárokhoz és más érdeklődőkhöz is, akik nem tudnak személyesen jelen lenni a programon. Ezért az előadásokat az ELTE TTK Videostúdió munkatársai lelkes diákok közreműködésével videofelvételen rögzítik. E felvételek a sorozat indításától kezdve megjelennek és mindenki számára elérhetőek, letölthetőek honlapunkról (<http://www.atomcsill.elte.hu>). Emellett az utóbbi években már az interneten keresztül élőben is követhetőek az előadások (<http://www.galileowebcast.hu/kozvetites.html>). Egyes előadások írott formában is megjelentek a *Természet Világa*, illetve a *Fizikai*

Szemle hasábjain. Az *Atomcsill* weblapján a felvételeken kívül megtalálhatók az előadók által készített prezentációs anyagok és az általuk írt vagy ajánlott magyar nyelvű népszerűsítő cikkek, videók és egyéb kapcsolódó információk is. Az elmúlt években óriási mennyiségű anyag gyűlt össze honlapunkon, amelyet – reményeink szerint – mind a diákok, mind tanáraik fel tudnak használni a tanulásban és az oktatásban.

Előadóink örömmel fogadták a lehetőséget, és nagy gondot fordítottak arra, hogy a főként középiskolás hallgatóság számára is érthető és élvezetes módon fogalmazzanak, előadásukat sok látványos képpel, ábrával, érdekességgel színesítsék. Bár voltak olyan előadók, akiket több alkalommal is meghívtunk, de mindig más-más témáról beszéltek, így az eddig elhangzott előadások egyike sem volt ismétlés.

Fontos megemlíteni, hogy a sorozat nem lehetne ilyen sikeres, ha nem állna mögötte egy lelkes csapat, amelynek tagjai a szervezésben, a videofelvételek készítésében, a honlap karbantartásában fáradhatatlanul tevékenykednek. Ugyancsak köszönettel tartozunk támogatóinknak is, az ő anyagi hozzájárulásuk elengedhetetlen a sorozat színvonalas megrendezéséhez.

Nehezen számszerűsíthető, de reméljük, hogy sorozatunk hatására tovább növekszik a természettudomány, ezen belül a fizika iránti érdeklődés, valamint a kutató és tanári fizika szakokra jelentkező, jól képzett hallgatók száma. Emellett úgy érezzük, hogy a sorozat a hazai tudományos ismeretterjesztés rangos és meghatározó elemévé nőtte ki magát.

*Király Andrea, Dávid Gyula,
Csordás András, Cserti József*

KÖNYVESPOLC

L. Susskind, G. Hrabovsky: AZ ELMÉLETI MINIMUM

Klasszikus mechanika, amit a fizikához tudni kell

Fordította: Hraskó Péter, Typotex, 2013.

Mint korosztályom minden fizikusának, nekem is azonnal *Landau* és *Lifsic Elméleti fizikája* jutott eszembe, amikor megláttam a könyv címét. Az előszó is azt mondja, hogy ez a könyv egy minimum, habár nem Landau értelmében: azoknak szól, akik szeretnek volna fizikát tanulni, de nem tették, és szeretnék megérteni, hogyan gondolkodnak a fizikusok. Belelapoztam a könyvbe, és azt gondoltam, hűha, ebben még Hamilton-mechanika és Poisson-zárójel is vannak, az talán mégis túlzás. Amikor azonban észrevettem, hogy a könyvet *Hraskó Péter* fordította, úgy döntöttem, hogy biztosan érdekes lesz. Elkezdtem olvasni és nem tudtam letenni.

Hát le a kalappal: a könyv tényleg mindent elmagyaráz, még hozzá közérthetően: valóban elég a középiskolás matematika ahhoz, hogy elolvassuk, hiszen még a differenciálást és integrálást is bevezeti. *Leonard Susskind* elméleti fizikus professzor, *George Hrabovsky* pedig saját maga szerint amatőr fizikus: az együttmű-

ködésből kialakult egy tankönyv, amely nem-fizikusoknak nem fizikáról, hanem fizikát tanít.

Minden fejezet mottóval kezdődik két fáradt vándorról. A stílust jól érzékelteti az 1. fejezetet követő 1. közjáték mottója:

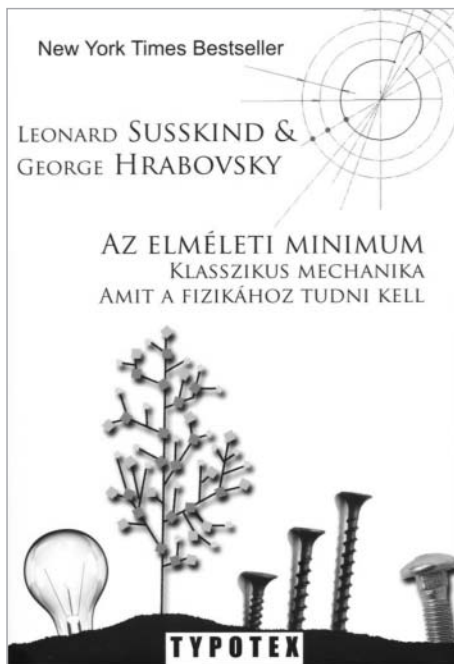
– *Hol vagyunk most, George?*

George előszed egy térképet és kiteríti Lenny elé.

– *Itt vagyunk most, Lenny, a koordinátáink: északi szélesség 36,60709, nyugati hosszúság –121,61862.*

– *Hűha! Mi az a koordináta, George?*

A könyv tehát a legalapvetőbb matematikai ismeretektől kezdve végigvezeti az olvasót a klasszikus mechanika gyönyörű felépítésén keresztül egészen a Maxwell-egyenletek vektorpotenciális, Hamilton-féle tárgyalásáig. Ahogy említettem, nem tudtam letenni. Ajánlani tudom mindazok számára, akik valamilyen régen tanultak ilyesmit, hiszen nagyon fogják élvezni a rég tanult és elfelejtett, igen szép dolgok felidézését.



Az elméleti minimum megmutatja, hogyan jutunk el a gondolatoktól az egyenletekig, azután az egyenletektől újabb gondolatokig. A tanultakat feladatok tarkítják a legelszántabb olvasók számára. A megoldásokat a könyv maga nem tartalmazza, de a weben jól emészthető formában megvannak (<http://www.madscitech.org/tm/slns>). Három részből állnak, magyarázat, tipp és a teljes megoldás.

Ugyanakkor kételkedem benne, hogy egy kizárólag középiskolás matematikával rendelkező olvasó ezt igazán végigolvasná. A könyv szerintem inkább mérnökök, orvosok, közgazdászok és fizikatanárok számára lesz élvezhető, akiket a megfelelő matematikai alapképzettség birtokában nem sújt le a rengeteg új

információ. *Hawking* híres mondása szerint minden leírt egyenlet felére csökkenti az eladott kötetek számát. A könyv alcíme, *Amit a fizikához tudni kell*, jól tükrözi a könyv alapvető és az előszóban bevallott célját: megértetni az olvasóval, hogyan gondolkodnak a fizikusok. Ezt ugyanis sok misztikum övezi, pedig igazából egyszerű. Egy orvos barátom, akivel sokat beszélgetek a modern fizikáról, a kezdet kezdetén egyszer csak a homlokára csapott, és azt mondta: *Hiszen ti egyenletekben gondolkodtok, amikor fizikáról mondtok valamit, általában valamilyen formula motoszkál a fejetekben, azt próbáljátok szavakban elmagyarázni. Ezt mindig említsd meg, amikor fizikáról mesélsz!*

Horváth Dezső

Hargittai István: ELTEMETETT DICSŐSÉG

avagy hogyan tették a szovjet tudósok szuperhatalommá a Szovjetuniót
Akadémiai Kiadó, Budapest, 2014, 456 oldal.

Az atombomba története évtizedeken keresztül lebilincselte az olvasók millióit. Részben hatalmas pusztító képessége miatt, de legalább annyira a létrejöttének történelmi körülményei miatt. A kulcsszereplők elmenekülése a Harmadik Birodalomból mindmegannyi kalandtörténet. A szövetséges Szovjetunió nem kapott lapot, majd később már kommunista ellenfélként csak biztonsági kockázatot jelentett. A jelentősebb mozzanatok eljutottak a szovjetekhez, a Rosenberg-házaspár halálos ítélete pedig nem oldott meg semmit.

Az orosz tudomány a szovjet időkben is jelentős volt és hatékony. Igaz, maga a rendszer, a szüntelen gyanakvás és az önkény hatalmas fenyegetés volt a tudományra nézve, és egyes ágak ebbe bele is rokkantak, mint például a biológia alulmaradt *Liszenkóval* szemben. Máig vitatott, hogy történhetett volna valami hasonló a fizikával. Csaknem biztos hogy nem, hiszen Liszenkó csak milliók éhezéséért volt felelős, amit a rendszer lelkiismerete rutinosan tolerált. De a nukleáris fegyver hiánya elviselhetetlen lett volna, ami az alapeszmét, a kommunizmus világméretű győzelmét kérdőjelezte volna meg.

A szovjet fizika legnagyobbjai így vagy úgy, de átvészelték a legvadabb terror éveit, nagy eredményekre jutottak, számosan lettek Nobel-díjasok. Am

ez csak a végeredmény, az odáig vezető út – az elkeverülhetetlen összefonódások ellenére – igencsak egyéni izgalmaktól terhes. Aki egy kicsit is érteni szeretné az egyes életpályák alakulását a huszadik század hú-

szas és nyolcvanas évei között, annak a korszak szovjet történelmét is ismernie kell, méghozzá nem a korabeli változatot, hanem a fenyegetettség és terror éveinek utólag feltárt hullámainak. *Hargittai István* könyvéből mindezt megtanulhatjuk, noha nincs benne történelmi bevezetés. Helyette minden egyes életrajzot, tudományos pályaképet a korszakba ágyazva állít elénk. Így, mire a tizenkét tudós életútját végigjárjuk, azaz elolvassuk a könyvet, gyakorlati tudósai leszünk a korszak szovjet történelmének.

Megtanuljuk, hogy a Szovjetunióban nem volt antiszemitizmus, csupán változó intenzitással folyt a harc a kozmopolitizmus ellen, ami könnyen végzetes lehetett a zsidókra nézve. Hogy ki a zsidó, az nem volt kérdés, az benne szerepelt a személyi igazolványban: az ember le-

hetett orosz, ukrán, tatár vagy zsidó és még számtalan egyéb. Ezzel a könyvben szereplők többségének gyerekkoruktól akadémikussá választásukig meg kellett küzdeniük. Persze nem csak ezzel, hanem a rendszer minden kicsinyességével és halálos veszedelmével. A legkiválóbb tudósokról van szó, és még



sincs két hasonló életút. *Pjotr Kapica* társadalmi elismertsége akkora volt, hogy felelősséget vállalhatott és kihozhatta az NKVD fogságából *Lev Landaut*, de *Berijával* szemben nem lehetett igaza. Hosszú életének egyik titka, hogy *Hruscsov* likvidálta Beriját. Azt pedig, hogy élete utolsó húsz évében kedvére utazhatott nyugatra, Hruscsov hatalomból való eltávolításának köszönhető.

Jakov Zeldovics és *Igor Tamm* is fontos szerepet játszott a szovjet nukleáris programban, de tudományos teljesítményük más területen volt meghatározó. Zeldovics óvatosan kerülte a politikát – nem úgy, mint *Andrej Szabarov*, akinek szembenállását a hatalommal még a legfiatalabb fizikusgeneráció is ismeri.

Tizenkét fizikus és kémikus (pontosabban 13, mert ugyan a Landauról szóló fejezetben, de megfelelő részletességgel szerepel *Lifsic* története is, kiemelve, hogy „nem csak Landau tolla”) sorsa alkotja a könyvet. Hatalmas tudományos teljesítményről van szó, a szereplők többsége Nobel-díjas. Az egyes történetek a tudománytörténet fontos fejezetei. Ehhez jön a hitelesség kérdése, ami esetünkben a személyes ismeretséget jelenti. „A szereplők csaknem felét személyesen ismertem, és néhány olyan tudós családtagjaival is találkoztam, akit sohasem láttam. A rokonok időnként a könyv többi szereplőjéről is meséltek. A nagy szovjet tudósok általában a szovjet társadalom kivételezett köréhez tartoztak, gyermekeik nemritkán ebből a körből házasodtak.” (20. oldal)

A szerző közelsége hőseihez lehetővé tette, hogy pártatlan maradjon, ne csináljon romantikus hősokeket vagy ellenállni képtelen bűnbakokat. Objektivitása eredményeként 13 realista élettörténetet olvashatunk, sokoldalúan jellemzett szereplőkkel és mindezek hátterében megjelenik a sztálini, majd a poszt-sztálini önkény. A legkiválóbbak nem közvetlenül tapasztalhatták a rendszer elviselhetetlenségét. Ők „kaphattak lakást, biztos állást, jó egészségügyi ellátást, ha nem akartak, még tanítaniuk sem kellett; még valamicske kemény valutával is rendelkezhetek... Alacsonyabb, de még mindig privilegizált szinthez tartoztak például a neves professzorok, akiknek külön asztal és kiszolgálás járt...” (380. oldal)

Amíg egy feljelentés vagy egyéb baleset nyomán a köznépek a GULAG, a kreatív mérnököknek (például *Tupoljev*) a saraska járt:

– *Azt mondja – saraska. Mit jelent a saraska?*

– *És hogy adagolják itt a kenyeret?*

– *Fehér kenyérből negyven dekát adnak fejenként, a feketé meg ott van az asztalon.*

– *Ne haragudjon, de hogybogy – az asztalon?*

– *Hát úgy, az asztalon, felszeletelve, aki akar, vesz belőle, aki nem akar, nem vesz.*

– *Ne haragudjon, de mi ez itt: Európa vagy mi?*

(*Szolzenyicin: A pokol tornáca*)

A könyv szereplői (Landau 1 évétől eltekintve) a saraskát is elkerülték.

Füstöss László

HÍREK – ESEMÉNYEK

KITÜNTETÉSEK

Az év ismeretterjesztő tudósa

2014. február 19-én *Patkós András* akadémikus, az ELTE részecskefizikus professzora vehette át a díjat a Tudományos Ismeretterjesztő Társulat (TIT) budapesti székházában.

„Minden díj igazi lényegét és fontosságát a kitüntetettek szakmai munkája, minősége szabja meg” – hangoztatta *Vizi E. Szilveszter* akadémikus, a TIT elnöke az elismerés átadásakor. Hangsúlyozta: a magyar tudományos újságírók munkájának lényege, hogy magyarul, közérthetően tegyék hozzáférhetővé mindenki számára a kor legújabb és legfontosabb kutatási eredményeit. Nekik köszönhető az a díj is, amelyet a legkiválóbb ismeretterjesztő tudósoknak adományoznak.

A Tudományos Újságírók Klubja által alapított elismerés részeként a díjazottakról egy kisbolygót is elne-

veznek, amelyről oklevelet kap a kitüntetett. Az 1996-ban alapított díjat elsőként *Simonyi Károly* fizikaprofesszor vehette át, majd az évek során az elismerésben részesült többek között *Marx György* fizikus, *Csermely Péter* biokémikus, *Vámos Tibor* villamosmérnök, *Lukács Béla* fizikus, *Almár Iván* úrkutató, *Illés Erzsébet* planetológus, *Hargittai István* és *Hargittai Magdolna* kémikusok, valamint *Schiller Róbert* kémikus.

A tudomány legkiválóbb művelői közül a díjazottak tették – a tudományos újságírók szavazatai szerint – a legtöbbet a tudomány közérthető megjelenítéséért, népszerűsítéséért. A 2013. évi kitüntetett *Patkós András* a díjátadás után előadást tartott *Alkotás és hatás* címmel.

Folyóiratunk állandó szerzőjének szívből gratulálunk a szerkesztők.

Széchenyi-díjas fizikusok 2014-ben

2014. március 14-én, pénteken délután *Áder János* köztársasági elnök *Orbán Viktor* kormányfő és *Kövér László* házelnök társaságában átadta a 2014. évi Széchenyi-díjakat.

Farkas Győző, az MTA doktora, az MTA Wigner Jenő Fizikai Kutatóközpont kutató professzor emeritusa a magyarországi lézerfizikai kutatások megteremtésében való közreműködése, valamint az „Attofizika” tudományágának megteremtése érdekében végzett munkája elismeréseként részesült Széchenyi-díjban.

Kertész János, az MTA rendes tagja, a Közép-európai Egyetem, valamint a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem egyetemi tanára a statisztikus fizika és interdiszciplináris alkalmazásai, különösen a hálózatkutatás terén elért, világviszonylatban is nagy elismerést kiváltó eredményeiért vehette át a Széchenyi-díjat.

A folyóiratunkban is publikáló, a hazai fizikus közéletben jelentős szerepet játszó kitüntetetteknek szívvel gratulálunk!

AZ AKADÉMIAI ÉLET HÍREI

„A tudomány értékelése, az értékelés tudománya” – tudományometriai műhely-konferencia az Akadémián

Az egyéni tudományos teljesítmény hiteles mérésének szempontjairól, a mennyiségi és minőségi mutatók szerepéről, a nemzetközi trendekről, valamint a tudományometriai módszerek új irányairól, a Magyar Tudományos Művek Tára fejlesztésének távlatairól tanácskoztak a széles szakmai érdeklődéssel kísért tudományértékelési workshop résztvevői az MTA Székházában.

„Az egyéni kutatói munkásság értékelésének mechanizmusa – a Doktori Tanács és a tudományos osztályok minőséget biztosító eljárásrendjeihez illeszkedve – az elmúlt években szervesen beépült az akadémiai tudományos közösségek munkájába. Ennek jegyében indítottuk el a Magyar Tudományos Művek Táráat, amely hiteles adatokat szolgáltat a tudományos teljesítmény számszerű értékeléséhez” – emlékeztette a műhely-konferencia résztvevőit köszöntőjében *Pálinkás József*, a Magyar Tudományos Akadémia elnöke.

„Ezek az adatok latba esnek az egyes intézmények és a doktori iskolák akkreditálásánál, a PhD-fokozatok odaítélése során. Az Akadémia osztályainak is feladata, hogy az egyes tudományterületek sajátosságait figyelembe véve folyamatosan korszerűsítsék az értékelés módszertanát, lehetővé téve a különböző szakterületeken a kutatói teljesítmények összehasonlítását” – emelte ki *Pálinkás József*, valamint köszönetet mondott a műhely-konferencia moderatori feladatait ellátó *Makara B. Gábornak* az MTMT Felügyelő Testülete elnökeként végzett munkájáért.

Wolfgang Glänzel, a Leuveni Egyetem professzora a nemzetközi gyakorlat tükrében mutatta be a bibliometria korszerű alkalmazásait. Rámutatott: a kutatásértékelésben a szakterülettől függően többféle megközelítési modell is használható. Tudományterületenként más megítélés alá esnek például a társszerzőként

jegyzett publikációk: míg a sok száz szerzős fizikai, matematikai tanulmányoknál a szerzőket gyakran betűrend szerint sorolják fel, az élettudományoknál az első, illetve utolsó hely a kutató kiemelt szerepét mutatja. „A kutatói minősítéseket nem szabad egyetlen számmá redukálnunk. A publikációk minőségét és mennyiségét mérő módszereket egyaránt alkalmazni kell” – intett a különböző paraméterek körültekintő használatára, hozzátéve: általános kiindulópontként elmondható, hogy mindig az adott helyzet határozza meg, mely mérőszámok adják a legpontosabb képet valamely tudományterület, intézmény vagy kutató teljesítményéről. Tíz-tíz tanácsot is megfogalmazott arról, mit érdemes és mit nem szabad tenni az egyéni tudományos teljesítmény értékelése során.

A tudományos értékelés új lehetőségeit mutatta be *Soós Sándor*, az MTA Könyvtár és Információs Központ Tudománypolitikai és Tudományelemzési Osztály vezetője. A szakember elmondta, hogy a közelmúltban számos tudományometriai kutatási eredmény született, és röviden összefoglalta, ezek hogyan használhatók fel az egyéni kutatói értékelésben. Az általa ismertetett, több szempontú kutatói profil a produktív mutatók mellett a hatás- és sikermutatókat, valamint a strukturális mutatókat is figyelembe veszi. Kitért arra is, hogy a kutatói életművek a szakterületeket tekintve gyakran heterogének, több szinten is multi- és interdiszciplinárisak: „A közlemények különböző szakterületeket érintenek, illetve egy-egy publikáció több kategóriába is besorolható.”

A tudományos osztályok képviselői között élénk eszmecsere bontakozott ki az elhangzottakról, valamint az egyes mutatószámoknak a kutatók értékelésében betöltött szerepéről. Többen rámutattak, hogy a kvalitatív mérőszámok teljesítése minimumfeltételül szabható pályázati eljárások, illetve az MTA doktora

cím megszerzése során. „A számszerűsíthető teljesítménymutatók elérése szükséges, de nem elégséges feltétel. Ezután az illető munkájának tartalmi, szakértői elemzésére van szükség” – értettek egyet a Műszaki és a Biológiai Tudományok Osztályának képviselői. A humán tudományok képviselői rámutattak, hogy esetükben a folyóiratcikkek alapul vevő érté-

kelési rendszer korlátozottan ad csak képet egy-egy tudós teljesítményéről.

A konferencia résztvevői egyetértettek abban, hogy az egyes szakterületek sajátosságait figyelembe vevő szabályozások kidolgozása, a mérőszámok meghatározása az egyes tudományos osztályok feladata.

http://mta.hu/mta_hirei

HÍREK ITTHONRÓL

XXXIV. Fizikusnapok az MTA Atommagkutató Intézetben

Az MTA Atomki 2013. november 18. és 23. között 34. alkalommal rendezte meg a hagyományos Fizikusnapokat. A hagyománytól azonban eltértünk, hogy egy új kezdeményezéshez csatlakozzunk: az egyhetes eseményt ezentúl március helyett novemberben rendezzük meg, így kapcsolódva a Magyar Tudományos Akadémia *Kutatóhelyek tárt kapukkal* elnevezésű programjához, amely az egy hónapon keresztül tartó Magyar Tudomány Ünnepe (MTÜ) eseménysorozat része.

A Fizikusnapok témája nem is lehetett volna aktuálisabb: 2013 – A Higgs-bozon éve; a fizikai Nobel-díjat 2013-ban *Francois Englert* és *Peter W. Higgs* kapták a Higgs-mechanizmus és a Higgs-bozon elméletéért.

A hétfőtől csütörtökig délután 4 órai kezdettel elhangzó előadások ezen téma köré csoportosultak: Van-e az elemi részecskének tömege? (*Trócsányi Zoltán*); Higgs-bozon: a keresés húszéves kalandja (*Horváth Dezső*); Mi a tömeg, avagy hogyan lesz a bolhából elefánt? (*Kovács Tamás György*); A CERN és a gyógyítás (*Sükösd Csaba*). Az utolsó előadás – ahogy a címe is mutatja – az Európai Részecskefizikai Kutatóközpont neves kutatóinak tevékenységét mutatta be, hangsúlyozva a tudományos felfedezéseken alapuló célzott kutatások közvetett és közvetlen társadalmi jelentőségét, a *Velünk élő tudomány* hatását.

Hétfőtől csütörtökig a délelőtti órákban az előre bejelentkezett iskolás csoportok adták egymásnak a kilincset rendhagyó fizikaóráinkon. Voltak tisztán elméleti órák, kísérletekkel fűszerezettek és kimonodottan kísérleti jellegűek. A legnagyobb sikert most is a hidegfizikai bemutató aratta, ahol folyékony nitrogénnel végzett kísérletek közben a gyerekek megismerkedtek az anyag tulajdonságaival és a hőmérsékleti skálákkal. A rendhagyó órák színes palettájára felkerült az Atomki disszeminációs programja keretében működő *Utazó fizika* eddig elkészült két előadása: a *Víz* és a *Földünk természetes védelmi rendszerei*. Ezekkel az előadásokkal egyébként az észak-alföldi régió hátrányos helyzetű kistérségeinek középiskoláit látogatjuk meg, videóra vett változatuk már az internet népszerű fájlmegosztó portálján is elérhető.



Milyen nyomok láthatók a diffúziós ködkamrában?

A vidékről érkezett csoportok egymás után több előadást is meghallgattak bámulatos kitartással, akár egész napon keresztül. Noha a résztvevők létszáma ezer feletti volt, a tavalyihoz képest jelentős visszaesést tapasztaltunk az érdeklődés tekintetében. Reméljük, hogy a tanárok és iskolák életében az utóbbi időben bekövetkezett jelentős változások a következő években az új helyzethez való sikeres alkalmazkodásnak köszönhetően már nem fognak kedvezőtlenül hatni a lelkesedésre.

A Fizikusnapok keretében, november 18-án nyitotta meg kapuit az Atomki Látogatóközpontja, amelyben többek között a CERN CMS műondetektorának érzékeny pozíciómérő elemei, egy diffúziós ködkamra, alfa-kamera, részecske-detektorok és Tesla-transzformátor kaptak helyet. A Látogatóközpont kínálata folyamatosan bővül és változik, megtekintése a csoport előzetes bejelentkezése alapján lehetséges.

A pénteki nyílt nap keretében az érdeklődők megismerkedtek a ciklotron működési elvével, a sugárvédelmi alapokkal és bepillanthattak a vastag sugárvédelmi ajtó mögé. Majd közelről megszemléltek Magyarország első PET (Pozitron Emissziós Tomográf) készülékét, amely az Atomkiban 20 éven keresztül szolgálta a betegeket, ma pedig oktatási és kutatási célokra alkalmazzák. Továbbá megtekintették azt a

világszínvonalú kisállat PET készüléket, amelyet egy nemrég zárult európai program keretében fejlesztetünk a Debreceni Egyetemmel együttműködésben. A nyílt napi látogatók létszáma nem mondható nagy-nak, viszont aki eljött, alig akart hazamenni; középiskolás és a középkoron már túljutott érdeklődő is feszült figyelemmel hallgatta a magyarázatokat.

A Fizikusnapok programja szombaton érdekes kísérleti bemutatóval zárult, amelynek a Debreceni Egyetem Szilárdtestfizikai Tanszéke adott helyet.

Az Atomki által kínált ismeretterjesztő programokról további részletek is elérhetők: www.atomki.mta.hu/fizmind

Király Beáta

EURÓPAI ÉRDEKESSEGEK A *EUROPHYSICS NEWS* VÁLOGATÁSÁBAN (2014. január–február)

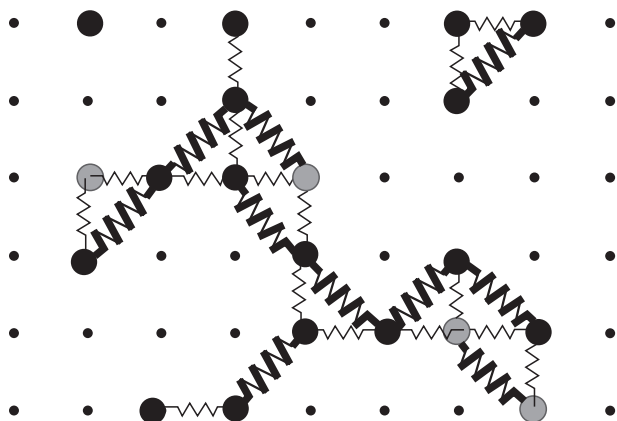
Egy lépéssel közelebb a kompozitokra épülő elektronikához

I. Balberg, D. Azulay, Y. Goldstein, J. Jedrzejewski, G. Ravid, E. Savir: The percolation staircase model and its manifestation in composite materials. *Eur. Phys. J. B* 86 (2013) 428.

A kompozit anyagok azért keltenek fokozottabb érdeklődést, mert szabályozható ellenállásuk kapcsolódik rugalmas és fényvezető tulajdonságaival. Ezért ígéretes rugalmas elektronikai alkalmazásuk. A jelen elméleti modell, amely kísérleti bizonyítást is nyert, részletesebben dolgozza ki, miként változik e kompozit anyagok elektromos ellenállása a részecskék koncentrációjával.

A szerzők elméleti jóslatot tettek az elektromos ellenállás lépcsőszerű viselkedésére a vezető részecskék koncentrációjának változásakor, amelyet ezüst-alumíniumoxid, illetve szén-fekete-polimer összetételű granuláris kompozitokon kísérletileg is kimutattak. Az effektus különösen világosan jelentkezett nanoskálájú rendszerekben, amelyekben karakterisztikus távolságok jól meghatározott diszkrét sorozata létezik a részecskék és szomszédjaik között. Minden lépcsőt a perkolációelmélettel megjósolható univerzális (a konkrét anyagi részletektől független) tulajdon-

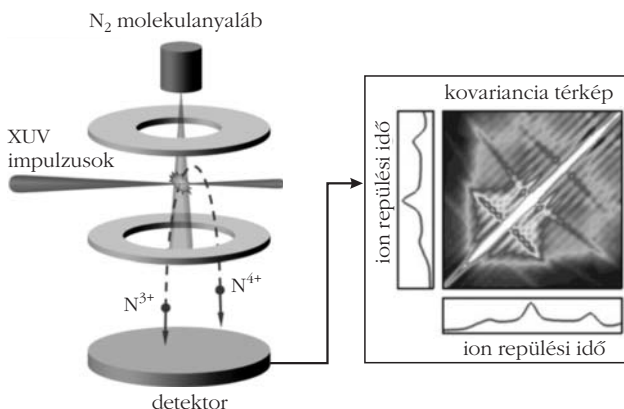
A rácspontok és a rác-élek betöltöttségi koncentrációjának vezetőképesre gyakorolt hatását szemléltető ábra kétdimenziós, négyzetes rácson.



ságokkal lehet jellemezni. Az egymást követő lépcsőfokokhoz tartozó elektromos ellenállás a vezető részecskék koncentrációjának növekedésekor csökken.

A molekuláris Coulomb-robbanás kovarianciatérképe

O. Kornilov és mtársai: Coulomb explosion of diatomic molecules in intense XUV fields mapped by partial covariance. *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* 46 (2013) 164028.



A szabadelektron-lézerrel végzett részlegeskovariancia-kísérlet sematikus ábrázolása.

Szabadelektron-lézerek (FEL) példátlan intenzitású XUV és röntgentartományba eső sugárzást állítanak elő. Ezen impulzusokban olyan nagy a fotonszám, amellyel egyetlen FEL-lövés hatására létrejövő elhajlási mintázatból rekonstruálható nagy makromolekulák (fehérjék és vírusok) szerkezete. E folyamat elkerülhetetlen kísérője a molekulák sokszoros ionizációja és Coulomb-robbanása. A minta roncsolásának korrekt értékeléséhez feltétlenül szükséges tehát a Coulomb-robbanás dinamikájának megértése. A szerzők olyan kísérleti technikát mutatnak be, amely alkalmas e kérdés kezelésére. Az ábrán sematikus bemutatott kísérletben a molekulákat (ez esetben nitrogén és jód) a hamburgi FEL-berendezéssel előállított XUV impulzusokkal ionizálták. A molekulákat a Coulomb-robbanás különböző töltésű fragmentumokra szakítja szét. A töredékeket

minden egyes lövést követően egyszerű reptelésidő-spektrométerrel detektálják. A *részleges kovariancia térképezés* (partial covariance mapping) néven ismert statisztikai elemzéssel azonosítják az azonos molekulából érkező ionok keltette jelek közötti pozitív korrelációt. Ennek révén a nagyon összetett kísérleti spektrum ellenére elegendő információ nyerhető a különböző disszociációs csatornákról.

Még egyszer a MEMS-ekben fellépő kvantumhatásokról

R. Esquivel-Sirvent, R. Perez-Pascual: Geometry and charge carrier induced stability in Casimir actuated nanodevices. *Eur. Phys. J. B* 86 (2013) 467.

Mikro- és nano-elektromechanikai eszközök, amelyeket általában MEMS (Micro Electro-Mechanical Sys-

tems) és NEMS (Nano Electro-Mechanical Systems) rövid neveken emlegetünk, immár igencsak elterjedtek. Megtalálhatók a gépkocsik légszákjaiban és az okos telefonokban is. A gond csak az, hogy méretük csökkentésével azok az erők is fontossá válnak ezekben a nano-eszközökben, amelyek általában kvantum szinten jelentkeznek. A szerzők a MEMS-ek és NEMS-ek mechanikai és elektromos stabilitásának az alkalmazott anyagtól és a lapvastagságtól való függését vizsgálták. Rámutattak, hogy a korábbi munkákban túlbecsülték ezen eszközök működőképességi tartományát, miután elhanyagolták a Casimir/van der Waals hatásokat. Megmutatják, hogy ezen eszközöknek a Casimir-erő változásával mutatott stabilitása függ az alkalmazott fémbevonat vastagságától és anyagától. Továbbá függ a kvarcban található szabad töltéshordozó koncentrációjától is, amelyet a dőpolás szintjével lehet szabályozni.

TURINÉ FRANK ZSUZSA, 1924–2014

Életének 90-ik évében eltávozott Társulatunk tiszteletbeli elnöke, a *Fizikai Szemle* fél évszázadon át volt szerkesztője.

Frank Zsuzsa 1953-tól a szerkesztőbizottság titkáráként, majd 1958-tól 2003 januárjáig felelős szerkesztőként – mindvégig társadalmi munkában, az MTESZ-ben betöltött főtitkár-helyetteség (1953–1982) mellett, később nyugdíjas éveiben is – vett részt a folyóirat készítésében. Ő és *Marx György* legendás párost alkotva, hosszú évtizedeken át, hónapról-hónapra, gyakran éjszakába nyúlóan szerkesztették-írták-javították a *Szemlét*. Zsuzsa szakértelmét közel 600 lapszám őrzi.

Marx György halála után, közel a 80. évéhez Zsuzsa is befejezte a lapkészítést, átadta helyét a következő generációnak, és kettejük szellemét, elkötelezettségüket is rábízta a lap új készítőire. A készítés öröme-gyötrelme mindvégig hiányzott neki, annak ellenére is, hogy láthatta: a főszerkesztők-szerkesztők őt követő együttesesei hűek maradtak a hagyományokhoz.

Kedves Zsuzsa! Hiányzol és hiányozni is fogsz nekünk, akik ismertük munkabírádod, a fizika és megismertetése iránti konok – vitát, konfliktust is vállaló – elkötelezettséged, a Társulat és a *Fizikai Szemle* felé sugárzó szereteted, sajátos fanyar humorod.

Emléked megőrizzük.

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat elnöksége
A *Fizikai Szemle* szerkesztői

Társulatunk, az Eötvös Loránd Fizikai Társulat állított ide ezen a szomorú napon, hogy a nevükben vegyék búcsút tiszteletbeli elnökünkötől,¹ egy különleges személytől. Szomorúan tesszük, mert végleges a búcsú,

Készült a ravatalnál elhangzott beszéd alapján.

noha tehetjük ezt azzal a vígasszal, hogy egy olyan élet ért véget, amely példakép és tisztelet tárgya volt és marad, amelynek mi, szakmai partnerei, a közösséget végzett önzetlen, odaadó oldalát láttuk és fogadtuk, majd szinte vártuk el természetesként. Amely munkának a pótolhatatlan értéke csak akkor manifestálódik, amikor abbamarad.

A vad háború néhány tudás-csira kivételével elpusztította a hazai tudományt, benne a fizikát is, emberestül. A fizika újjáélesztésének szándéka gyűjtötte össze ezeket a csírákat, hozta létre a kutatóintézeteket és néhány kiváló tanszéket. De életre hívta azt a szervezetet is, a Műszaki és Tudományos Egyesületek Szövetségét, a Maga másik aktivitási területét.

Az MTESZ-ben betöltött főtitkár-helyettesége mellett – majd nyugdíjas éveiben is – szervezte, készítette a Társulat folyóiratának számait. Ezzel vált a *Fizikai Szemle* a hazai szakmai prioritásokat is kijelölő fórummá a kutatók, de még inkább a fizikatanárok felé.

Nagy szomorúságomra, éppen az én elnökségem idején vesztettük el *Marx Györgyöt* és talán ez a cezúrát jelentő esemény készítette Zsuzsát, hogy a fiatalos aktivitását leplezve, átadja a *Szemle* szerkesztését a fiatalabbaknak – indokul a magas életkorát hozva fel. Tiszteletbeli elnökként azonban egyedülálló tapasztalatával hosszú évekig segítette elnökségünk munkáját és csak – az előlünk eltagadott – gyengülése vonta ki lassan a munkából. Amikor arról szólt nekem, hogy terhes az ülésekre járnia, nagyon elszomorodtam: egy aranykorszak végét jelentette ez a mondat.

A *Fizikai Szemlére* a Zsuzsát követő generáció is minden idegszálával ügyel, a folyóirat fennmaradásáért a Társulat is minden követ megmozgat.

Szeretném hinni, hogy továbbra is Zsuzsa gondolatához hű cikkek fogják megtölteni a Szemlét, hogy

terjesszék szakmánk napjainkban is hihetetlenül bővülő ismereteit, multidiszciplináris hatását.

Zsuzsa, kedves, Maga pótolhatatlan. Hasonlóan elkötelezett szakmaszeretők már alig teremnek, de mi, akik ismertük Magát, akik igyekeztünk lépést tartani Magával, akik igyekeztek nem okozni csalódást Magának és a szakmának a lelkesedésük netánvaló lohadásával, ígérjük, hogy merítünk életének példájából.

Gyulai József tiszteletbeli elnök

Mindketten a Pázmány Péter Tudományegyetem fizikatanári szakán tanultunk, de én őt az egyetemen nem ismertem, mert két évfolyammal fölöttem járt. Mégis egyszerre végeztünk, ugyanis a nagy tanárhiány miatt lerövidítették a tanulmányi időt.

Az egyetemi tanulmányok után mindketten a Fizikai Intézetbe kerültünk oktatónak (meglehetősen sokan talán tizen vagy tizenketten), mert a háború után itt is oktatóhiány volt. Az első két félévben számítási gyakorlatokat tartottam a kísérleti fizika tantárgyhoz, ezen túlmenően, fizikai laboratóriumi gyakorlatokat is vezettem két, szintén ekkor végzett kollégámmal, *Biró Gáborral* és *Zsuzsával*. Innen van az ismeretségünk.

Azt nem tudom, hogy Zsuzsa mikor távozott az egyetemről az Eötvös Loránd Fizikai Társulathoz, ahol a *Fizikai Szemlét* szerkesztette évtizedekig, minden magyar fizikus teljes megalégedésére. A *Szemlében* közölt cikkeim megjelenésekor minden alkalommal beszélünk egymással, nemcsak fizikáról, vagy az oktatás aktuális problémáiról, hanem az embereket foglalkoztató egyéb kérdésekről is. Jóban voltunk. 2010-ben még utójára talákoztunk a gyémántoklevél átvételekor. Erre úgy emlékezem vissza, mint ahogy két öregember talán utójára találkozik.

A földi életből távozásakor tisztelettel emlékezem rá, és búcsúzom Tőle.

Nagy Károly

Első találkozásunkra ma is emlékszem. 1970 őszen nemzetközi fizikaoktatási konferencia volt Egerben. Én buzgó, kezdő tanárként már jóval a megnyitó előtt ott voltam az előadóteremben. Megérkezett Zsuzsa és valami hibát észlelt az előkészítésnél. Azonnal, rendkívül erélyesen követelte a hiányosság megszüntetését.

Az adott ügy iránti elkötelezettség jellemezte felelős szerkesztői munkáját is. Saját írásaim korrektúrájánál, bírálataimnál, konferenciaszervezéseknél nem volt elég a levélváltás, a telefonálás, több esetben személyes megbeszélést is kért. Egy alkalommal az MTESZ központi, Kossuth téri főtitkár-helyettesi irodájába kellett hozzá mennem. Meglepett, hogy munkatársai milyen nagy tisztelettel övezték Őt. Ez ellenében állt azzal a kollegiális, közvetlen hangulattal,



Turi Zsuzsa és Pál Lénárd a *Fizikai Szemle* ünnepi számával köszöntik Marx Györgyöt Mátraderecskén, 75. születésnapján, 2002 májusában.

ami az Eötvös Társulat irodáit, Zsuzsa szerkesztői munkahelyét jellemezte.

Mindig különösen jól esett a kefelenyomatokat kísérő hivatalos leveleit olvasni: „Kérjük az esetleges szerzői korrektúrákat piros színnel, a nyomdahibákat kék színnel jelölni, ... a tördelt korrekturát imprimálni szíves legyen”, „Köszönjük, hogy megtisztelte lapunkat dolgozatával, a továbbiakban is várjuk írásait”. Megcsodáltam rendkívüli memóriáját: hosszú évekre visszamenőleg emlékezett minden beküldött kézíratra. Volt ugyan egy füzet, amelyben gondosan feljegyezte a cikk-tervezeteket, de ezt csak a szóbeli közlés után, mintegy bizonyítékként nézte, mutatta meg.

Kovács László

Turi Zsuzsát – rajtam kívül – már mindenki ismerte, amikor 1992 elején először találkoztam Vele. Nem örült nekem, én meg féltem – hiszen híre messze előtte járt – Tőle. Azután lassan, több év alatt összecsiszolódtunk. Ő foggal-körömmel védve a *Fizikai Szemle* több évtizedes hagyományait, nyesegette vadhajtásaimat, de az elfogadhatónak tartott újításaimnak nem állta útját.

Az együtt dolgozott 11 év alatt (munkaidőnk gyakran este 10-kor indult és bőven éjfél utánig tartott) életem egyik legzárkózottabb, legtalányosabb embere kinylt. Így nem csupán szakmaszeretetet, imádott lapja/lapunk iránti feltétel nélküli elkötelezettséget, hanem családi háttéréből és egyéni sorsából (Ő és férje a holokausztot éppencsak túlélte) fakadó megalkuvásmentes tartást, elhivatottságot is tanulhattam Tőle.

Marx György halála után nem akart, nem tudott volna ugyanúgy dolgozni közös szenvedélyükön, a *Szemlén*. Annak tudatában hagyta abba, hogy vigyázni fogok a folyóirat szellemiségére, hagyományára. Kedves Zsuzsa, jó lenne azt írni, hogy én megtettem, de szerencsére azóta is csak olyanok készítik a lapot, akiknek mindez természetes.

Kármán Tamás

Gyere el a múzeumba!

A kiállítás
korhatár nélkül,
fényképes
igazolvánnyal
ingyenesen
látogatható.

Nyitva tartás:
hétfő-péntek: 8.00-15.00
szombat: 9.00-13.00
vasárnap: ZÁRVA

Érdeklődni lehet: 75/50-74-32

MVM Paksi Atomerőmű Zrt.
7031 Paks, Pf. 71. hrsz. 8803/15
telefon és fax: 06-75-505-000; 1/355-1332
weboldal: www.atomeromu.hu
Facebook profil:
www.facebook.com/paksiatomeromu



Atomenergetikai Múzeum



mvm paksi atomerőmű

