

fizikai szemle

A black and white photograph of two men riding bicycles towards the camera in a large, arched tunnel. The man on the left is older, with white hair, wearing a dark suit, white shirt, and dark tie. The man on the right is younger, with dark hair, wearing a white short-sleeved shirt, dark tie, and dark trousers. They are both smiling. The tunnel has a ribbed interior and is lit by overhead lights. On the left side of the tunnel, there are various pipes and mechanical equipment. On the right side, there are large metal structures, possibly part of a train or industrial machinery.

2006/7

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

Főszerkesztő:

Németh Judit

Szerkesztőbizottság:

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

Szerkesztő:

Tóth Kálmán

Műszaki szerkesztő:

Kármán Tamás

A folyóirat e-mailcíme:

szerkesztok@fizikaiszemle.hu

A lapba szánt írásokat erre a címre kérjük.

A folyóirat honlapja:

<http://www.fizikaiszemle.hu>

A címlapon:

**A hatvanas éveiben járó Hans Bethe
kerékpározik a Wilson-laboratórium
szinkrontrónja föld alatti alagútjában.
(Fotó: Russ Hamilton/CU)**

TARTALOM

<i>Mezei Pál, Cserfalvi Tamás:</i> Gázkisülésselés analízis a környezetvédelemben	217
<i>Vinkó József:</i> Távolagsmérés szupernóvákkal: tények és talányok	221
<i>Koós Antal Adolf:</i> Szén nanocsöveken alapuló szelektív gázérzékelők	226
<i>Hargittai Magdolna:</i> Beszélgetés Telegdi Bálinttal	229
<i>Németh Judit:</i> Hans A. Bethe, a magfizika és a nukleáris asztrofizika egyik szülőatyja	234
A FIZIKA TANÍTÁSA	
<i>Radnóti Katalin:</i> A kopernikuszi fordulat	236
<i>Nyerges Gyula:</i> Globe at Night – Mi is részt vettünk a felmérésben	240
<i>Raics Katalin:</i> A radioaktivitás megismerésének egy jó lehetősége	242
DOKUMENTUM	243
VÉLEMÉNYEK	
Az energiaválság mellékterméke (<i>Füstöss László</i>)	243
<i>Tél Tamás:</i> Az emelt szintű érettségiről	244
PÁLYÁZATOK	245
HÍREK – ESEMÉNYEK	246
KÖNYVESPOLC	252
MINDENTUDÁS AZ ISKOLÁBAN	
Rendezetlenségbe fagyva – az üvegállapot sajátosságai (<i>Temesvári Tamás</i>)	252
<i>P. Mezei, T. Cserfalvi:</i> Gas discharge analytical methods and their use in environment protection	
<i>J. Vinkó:</i> Measuring distances by supernovas: facts and riddles	
<i>A.A. Koós:</i> Selective gas detectors using carbon nanotubes	
<i>M. Hargittai:</i> A talk with Valentine Telegdi	
<i>J. Németh:</i> Hans A. Bethe, pioneer in nuclear physics and nuclear astrophysics	
TEACHING PHYSICS	
<i>K. Radnóti:</i> The Copernican decisive change	
<i>J. Nyerges:</i> Globe at Night – the Hungarian participation in survey data acquisition	
<i>K. Raics:</i> An easy way of getting acquainted with radioactivity	
DOCUMENTS	
OPINIONS	
A fake product of the power crisis (<i>L. Füstöss</i>)	
<i>T. Tél:</i> Secondary school's final examination of raised level	
TENDERS, EVENTS, BOOKS	
SCIENCE IN BITS FOR THE SCHOOL	
The peculiarities of the glass-like state (<i>T. Temesvári</i>)	
<i>P. Mezei, T. Cserfalvi:</i> Gasentladungs-Analysatoren und ihre Anwendung im Umweltschutz	
<i>J. Vinkó:</i> Entfernungsmessung mit Supernovae: Tatsachen und Rätsels	
<i>A.A. Koós:</i> Selektiver Nachweis von Gasen mit Kohlenstoff-Nanoröhren	
<i>M. Hargittai:</i> Ein Gespräch mit Valentin Telegdi	
<i>J. Németh:</i> Hans A. Bethe, Wegbereiter der Kernphysik und der nuklearen Astrophysik	
PHYSIKUNTERRICHT	
<i>K. Radnóti:</i> Die Kopernikanische Wende	
<i>J. Nyerges:</i> Globe at Night – der ungarische Beitrag zur Bereitstellung von Messdaten	
<i>K. Raics:</i> Bekanntwerden mit der Radioaktivität – leicht gemacht	
DOKUMENTE	
MEINUNGSÄUSSERUNGEN	
Ein Abfallprodukt der Energiekrise (<i>L. Füstöss</i>)	
<i>T. Tél:</i> Über der Reifepfung gehobener Stand	
AUSSCHREIBUNGEN, EREIGNISSE, BÜCHER	
WISSENSWERTES FÜR DIE SCHULE	
Die besonderheiten des glasartigen Zustands (<i>T. Temesvári</i>)	
<i>П. Мезей, Т. Черфалви:</i> Анализ на основе газового разряда и его применение в охране среды	
<i>Й. Винко:</i> Измерения расстояний с сверхновым: факты и загадки	
<i>А.А. Коос:</i> Селективное обнаружение газов с помощью углеродных нанотрубок	
<i>М. Харгитай:</i> Разговор с В. Телегди	
<i>Ю. Немет:</i> Х.А. Бэтэ и его роль в обосновании ядерной физики и ядерной астрофизики	
ОБУЧЕНИЕ ФИЗИКЕ	
<i>К. Радноти:</i> Коперников переворот	
<i>Д. Нергес:</i> Globe at Night – участие Венгрии в сборе количественных данных	
<i>К. Раич:</i> Удобный способ ознакомления с радиоактивностью	
ДОКУМЕНТЫ	
ЛИЧНЫЕ МНЕНИЯ	
Об одном детище энергетического кризиса (<i>Л. Фюштэс</i>)	
<i>Т. Тел:</i> Об атестата зрелости за вышенного уробин	
ОБЪЯВЛЕНИЯ-КОНКУРСЫ, ПРОИСХОДЯЩИЕ СОБЫТИЯ, КНИГИ	
НАУЧНЫЕ ОБЗОРЫ ДЛЯ ШКОЛ	
Особенности стекловидного состояния (<i>Т. Темешвари</i>)	

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

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

LVI. évfolyam

7. szám

2006. július

GÁZKISÜLÉSES ANALÍZIS A KÖRNYEZETVÉDELEMBEN

Jánossy Mihály emlékének ajánlva, aki mindig figyelemmel kísérte,
támogatta és bátorította ezt a kutatást

Mezei Pál, MTA Szilárdtestfizikai és Optikai Kutató Intézet
Csersfalvi Tamás, Aqua-Concorde Kutató Laboratórium

Egy speciális, egyenáramú ködfénykisülést ismertetünk, amelyet a szennyvizek nehézfém (Zn, Cd, Cu, Cr, Ni, Pb) koncentrációjának közvetlen mérésére hoztunk létre.

Az egyik legártalmasabb környezetkárosítás a vizek, szennyvizek nehézfémekkel történő szennyezése. Ezt azok az üzemek okozzák, amelyek a magas nehézfém-tartalmú ipari vizeket nem szállítatják el a veszélyeshulladék-tárolóba, hanem éjjel és hétvégeken a közüzemi csatornába engedik le. A csatornahálózaton keresztül ez a szennyezés a szennyvízkezelő telepekre, illetve a természetes vizekbe jut. Mivel ezek a nehézfémek igen mérgezőek, a velük szennyezett folyó vagy állóvíz az egész élővilágra veszélyes. Ezt a környezetszennyezést csak úgy lehet csökkenteni, valamikor talán majd megszüntetni, ha a csatornáknál, főleg a lehetséges szennyező forrásoknál, a szennyvíz nehézfém-koncentrációját állandóan (éjjel-nappal) mérik, monitorozzák. A szennyvíztelepekre bejövő szennyvizek állandó ellenőrzése azért is szükséges, mert a nehézfémek lehetetlenné teszik a szennyvizek biológiai tisztítását is.

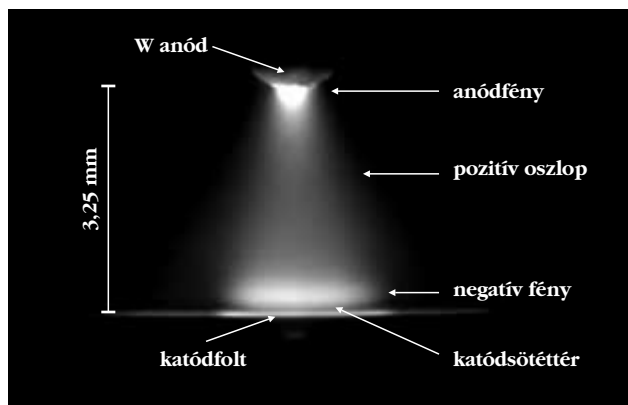
A jól ismert spektroszkópiai mérési eljárások, mint például az atomabszorpciós spektrometria (AAS = Atom Absorption Spectrometry), a plazma-atom emissziós spektrometria (ICP-AES = Inductive Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry) monitorként nem használhatóak. Ezek ugyanis laboratóriumi nagyberendezések, amelyek méretük miatt sem helyezhetőek ki a fenti helyszínekre. A zsíros emulziókat, lebegő anyagokat tartalmazó szennyvizet ezekbe a berendezésekbe közvetlenül nem lehet bevezetni. A kívánt mérések komoly mintaelőkészítést, mintafeltárást igényelnek. Ezek pedig laboratóriumi eljárások, amelyek egy külső helyszínen nem végezhetőek el. Végül, de nem utolsó sorban, a fent említett monitorozási célra ezek igen drága berendezések, áruk több százezer dollárnál kezdődik. Szennyvízmoni-

torként a felületi érzékelésen alapuló módszerek (szenzorok) szintén nem használhatóak, mivel ezek ilyen közegben már egy mérés után tönkremennek.

Mindezek alapján nyilvánvaló, hogy a szennyvizekben működő nehézfémmonitor elkészítéséhez egy teljesen új mérési eljárás szükséges. Ez az új módszer az általunk felfedezett elektrolitkatódos, atmoszférikus nyomáson működő ködfénykisülés (Electrolyte Cathode Atmospheric glow Discharge = ELCAD). Itt a szennyvíz, amely feloldva tartalmazza a nehézfémeket (ez egy vizes elektrolitoldat), maga a katód. Ennek felszíne felett, attól körülbelül 3 mm távolságban elhelyezett wolfram rúd (1,4 mm átmérőjű) az anód. E két elektróda között a levegőben, atmoszférikus nyomáson, egyenáramú kisülést hozunk létre (kisülési áram ~50–80 mA, égési feszültség ~700–850 V). A kisülés ideje alatti állandó folyadékszint megtartása érdekében az elektrolitot áramoltatni kell. Ha az elektrolitoldat megfelelően savazott ($\text{pH} < 2,5$), akkor a kisülés emittált spektruma tartalmazza a benne feloldott fémek atomi vonalait [1, 2]. Ezek intenzitásait megmérve az elektrolitbeli nehézfémek koncentrációja meghatározható. Az ELCAD működése automatizálható, működését a szennyvizekbeli zsíros emulziók, lebegő anyagok nem zavarják (a durvább, nagyobb lebegő anyagok egy fémháló segítségével egyszerűen kiszűrhetők). Az ELCAD tehát nem igényel semmilyen mintaelőkészítést, mérete sem nagy. Ennek alapján a helyszínen telepíthető, a nehézfémmonitor elkészíthető.

Az ELCAD főbb jellemzői

Az ELCAD egy atmoszférikus nyomáson működő ködfénykisülés, amelynek a következő, szabad szemmel megkülönböztethető részei vannak (1. ábra). Az elektro-



1. ábra. Az ELCAD-kisülés képe

litkatód felületén észlelhető fényes folt a katód folt, ez a kisülés által lefedett katódterület. Felette helyezkedik el a katódcsötéttér, amelyet a negatív fény, majd pedig a pozitív oszlop követ. Az anódon az anódfény látható.

A ködfénykisülések egyik legfontosabb paramétere a katódcsötéttéren eső feszültség, a katódcsésés (U_{cf}), a kisülés fenntartásához szükséges, betáplált energia. Ezt az elektródák távolságának függvényében mért égési feszültségből kapjuk meg, ha ezt a függvényt a zérus elektródátávolságra extrapoláljuk. Az ELCAD esetében ez $U_{cf} = 515 \text{ V}$ ($i = 80 \text{ mA}$). Ha az elektrolit pH-ja kisebb, mint 4, a savazás növelésével (a pH csökkentésekor) az égési feszültség és az U_{cf} jelentősen csökken.

A katódcsötéttér hossza $d = 10^{-4} \text{ m}$, amit a kisülés képének nagyítása alapján mértünk meg. Lineáris teret feltételezve a csötéttérben (a katódnál maximális, a csötéttér–negatív fény határán pedig zérus), a fenti két adatból az

$$E_c = \frac{2 U_{cf}}{d}$$

képlet alapján számolt elektromos tér nagysága a katódnál $E_c = 10^7 \text{ V/m}$ [3].

Elektrolitkatód, önfenntartási folyamatok

Egy hagyományos, fémkatódos ködfénykisülés önfenntartási mechanizmusa a következő: a katódba becsapódó pozitív ionok hatására a katódból szekunder elektronok lépnek ki. Ezek a katódcsötéttérben lévő tértől energiát nyerve ütközéses ionizációk sorozatát indítják el. Így létrehozzák az adott áramhoz tartozó, a kisülés önfenntartásához szükséges töltésmennyiséget. A fémek esetében a szekunder elektronok emisszióját nagyjából értjük is, hiszen a fémek szabad elektronokkal rendelkeznek. A vízben azonban nincsenek ilyen szabad elektronok. A kisülés mégis működik, tehát valami történik, amit meg kell értenünk.

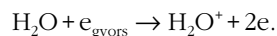
Hart és Anbar szerint az elektronok a vízből egy kémiai alagúteffektus segítségével is kiléphetnek. Ez a 2. ábrán vázolt körfolyamat révén lehetséges [4].

A kisülésből érkező, a vízbe csapódó pozitív ionok a felületi rétegben a H_2O molekulákkal ütköznek, és egy ionizációs reakciósort indítanak el. Ennek közbülső termékeként hidratált proton H_3O^+ és szolvatált elektron

e_{aq}^- keletkezik. Ezek között egy igen gyors reakció megy végbe, amely semleges H-atomokat hoz létre. A hidrogén igen illékony, ezért könnyen a folyadék felületére jut, ahol azonnal ionizálódik, azaz e_g^- és H^+ keletkezik. A H^+ -iont a tér visszalöki a vízbe, az elektron pedig a plazmabeli ionizációs és gerjesztési folyamatokban vesz részt a továbbiakban.

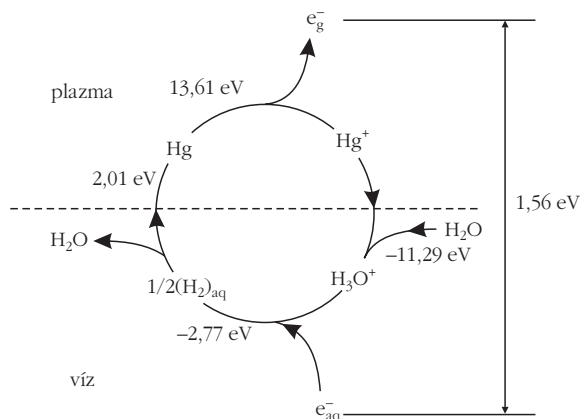
A vízből való közvetlen elektronkiléptetés 6,1 eV energiát igényel, a fenti körfolyamatnál ehhez 1,55 eV energia is elegendő. Amikor az oldatot savazzuk, az oldat nagymértékű protontöbbletre tesz szert. Emiatt a szolvatált elektronok befogásának és ezen keresztül a fenti körfolyamatnak a hatásfoka jelentősen megnő a többi reakcióhoz képest, a vízből kilépő elektronok száma is emelkedik. Tehát a nagyobb oldatbeli savkoncentrációhoz több kilépett elektron, nagyobb szekunder elektronemisszió tartozik. Ezért a katódcsötéttérben, egy adott kisülési áramhoz tartozó töltésmennyiség létrehozásához kevesebb ionizáló ütközés, azaz kisebb befektetett energia, kisebb katódcsésés szükséges.

Habár az ELCAD levegőben, atmoszférikus nyomáson működik, a kisülés során fellépő katódporlasztás és részben a párolgás miatt a kisülési plazma telített vízgőzben alakul ki. Ezt alátámasztja az a kísérleti tapasztalat is, hogy zárt cellát használva, N_2 , He és Ar atmoszférában is működtetve az ELCAD-ot, az égési feszültségben és az emittált intenzitásokban semmilyen változást nem észleltünk. Ez azt jelenti, hogy a katódcsötéttérbeli ionizációs ütközések az elektronok és a H_2O molekulák között mennek végbe. Az irodalom szerint ebben az esetben a legvalószínűbb ionizációs folyamat a következő:



Az ELCAD-plazmában tehát a H_2O^+ molekulaionok a pozitív ionok. Atmoszférikus nyomáson, ahol az ELCAD működik, a H_2O^+ molekulaionok legvalószínűbb veszteségi forrása az, hogy elektronokkal ütközve semleges részecskékre esnek szét (disszociatív rekombináció): $\text{H}_2\text{O}^+ + e \rightarrow \text{H} + \text{OH}$. Ez az oka annak, hogy míg egy klasszikus, fémek között működő ködfénykisülés esetében a katódos áramsűrűség a nyomás négyzetével arányos, $j_c \approx \text{konst.} \cdot p^2$, az ELCAD esetében a kísérleti eredmények szerint, a $p \sim 25 \text{ torr} - 1 \text{ atm}$ nyomástartományban, a $j_c \approx \text{konst.} \cdot p^{1/2}$ összefüggés érvényes.

2. ábra. A Hart–Anbar-körfolyamat



Az emittált spektrum

Kísérleteinkben elektrolitoldatként csapvizet használtunk (ennek átlagos összetétele Budapesten: Na 16 mg/dm³, Ca 80 mg/dm³, Mg 25 mg/dm³). A többi, vízben nem található fémek egy több elemes, minden fémre 5000 mg/dm³ koncentrációjú törzsoldathoz adtuk a mintához, amivel a hozzáadott fémekre nézve 0,1–50 mg/dm³ koncentrációtartományt állítottunk be. A savazásra HCl-ot használtunk.

Az ELCAD-plazma által kibocsátott színekben megjelennek az elektrolitban feloldott fémek atomi vonalai, így a H_β 486 nm-es vonala, az OH ultraibolya sávjai, az N₂ 334 és 405 nm sávjai. Az atomi fémvonalak főbb tulajdonságai a következők:

1. Létezik egy savazási küszöb: pH ~ 2,5. Csak ennél kisebb pH esetén jelentkeznek az atomi fémvonalak az emittált spektrumban, és ekkor a pH további csökkentésével (savazás növelésével) az intenzitásuk nő.

2. Létezik egy nyomás küszöb: $p \sim 600$ mbar. Csak ennél nagyobb nyomásokon figyelhetők meg az atomi fémvonalak. A nyomás növelésével az intenzitásuk is nő körülbelül 1500–2000 mbar értékig, majd ezután az intenzitások csökkennek.

3. Létezik egy áramküszöb: $i \sim 25\text{--}30$ mA. Csak ennél nagyobb kisülési áramoknál jelentkeznek az atomi fémvonalak az emittált spektrumban, azt elérve intenzitásuk az árammal együtt nő.

4. Az intenzitások jelentős elemfüggést mutatnak.

Az 1. és a 2. megfigyelés egymással szorosan összefügg. Miként korábban említettük, a savazás növelése csökkenti a katódosítást és így a kisülésbeli átlagos elektronenergiát (kT_e). Ha a nyomást növeljük, az ütközések számának emelkedése miatt a kT_e csökken. Az 1. és a 2. eredmény szerint az emittált atomi fémvonalak intenzitása tehát nő, ha a kT_e csökken. Ezt az alábbi módon értelmezhetjük.

A katód egy oldat, amelyben a feloldott fémek pozitív ionokként vannak jelen. A kisülés alatt működő katódporlás hatására ezek a pozitív fémionok (M^+) kilépnek az oldatból, de a katód előtt lévő pozitív tértöltésen csak úgy juthatnak át, ha rekombináció révén semlegesítődnek. Erre, az ELCAD esetében, a kételektronos ütközéses rekombináció adódott a legvalószínűbbnek: $M^+ + 2e \rightarrow M + e$. A reakció mértéke (r) kT_e -vel fordítottan arányos. (Pontosan $r \sim kT_e^{-9/2}$. Az így számolt intenzitás nyomásfüggése igen jól egyezett a mért eredményekkel). A létrejött semleges fématomok a negatív fénybe diffundálnak, ahol elektronütközéssel gerjesztődnek.

A savazás, illetve a nyomás növelése egyaránt kT_e -t csökkenti, ami viszont növeli a rekombináció mértékét, tehát a semleges fématomok számát. A megfigyelt küszöbök ahhoz a kT_e értékhez tartoznak, amely már elegendően alacsony ahhoz, hogy ez a rekombináció végbemenjen.

Az áramküszöb fellépte a katódporlás áramfüggésével magyarázható. Kis áramoknál a katódporlás mértéke elhanyagolható, nem lép ki elegendő számú M^+ fémion ahhoz, hogy a fenti folyamatok végbemenjenek. Az elektronütközéses gerjesztés és a rekombináció mértéke is függ az elektronok sűrűségétől, amelyet a kisülési áram határoz meg. Ezért nagyobb áramhoz nagyobb M^+ sűrűség, na-

gyobb elektronsűrűség és nagyobb mértékű rekombináció tartozik, ami az intenzitás növekedéséhez vezet.

Az emittált spektrumban csak fémek atomi vonalait figyeltük meg, ionos vonalakat általában nem észleltünk. Kivétel: a Ca-II 393,4 nm és az Mg-II 297,6, 280,3 nm ionvonalak. Ennek oka az, hogy a legkülső elektronhéj a többi egyszeresen ionizált fém esetében a nemesgázokéhoz hasonlóan teljesen betöltött, így ezek gerjesztett nívói igen magasak (20–30 eV) ahhoz, hogy az ELCAD-plazmában gerjesztődjenek.

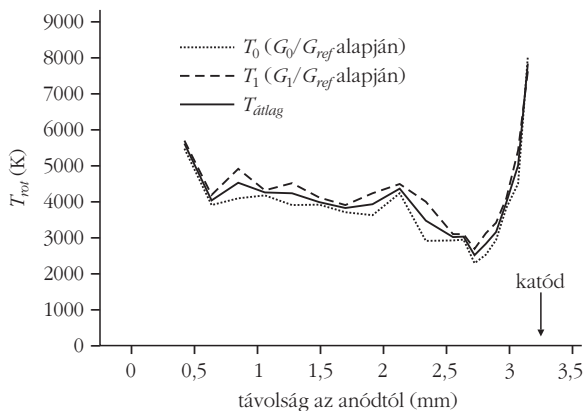
Az emittált intenzitások igen jelentős elemfüggésének megértéséhez az előbbi rekombinációs modellt némileg módosítani kell: A katódporlasztás során nem M^+ fémionok, hanem $M^+ - OH^-$ komplexek lépnek ki az elektrolitból. E komplexek kötése annál erősebb, minél inkább kovalens jellegű a kötés. Ez pedig az egyes fémek és az OH-gyök elektronegativitásának különbségétől függ. Ha ez a kötés gyenge (ionos jellegű), akkor a közvetlenül a katódfelületnél lévő igen nagy elektromos tér szétszakítja, a keletkezett pozitív fémiont pedig visszalöki a katódba. Emiatt a plazmabeli fématomok sűrűsége és így az emittált atomi fémvonalak intenzitása is kicsi. Ha ez a kötés erős, akkor az adott komplex bomlás nélkül áthalad a katódhoz közeli, nagy térerősségű részen, és a sötétter katódtól távolabbi tartományába kerül. Itt, miként a következő részben bemutatjuk, a hőmérséklet elég magas ahhoz, hogy a komplex széttessen. Az elektromos tér pedig már annyira lecsökkent, hogy a rekombinációhoz a megfelelő számú és alacsony energiájú elektron jelen van. Így elegendően nagyszámú semleges fématom keletkezik, ami a korábban leírtak szerint nagy emittált fémintenzitást eredményez. Ez a módosított modell jól egyezik a mérési eredményekkel, de van kivétel, ezek közül a legfontosabb a króm. E modell szerint az ELCAD emittált spektrumában nagyintenzitású atomi krómvonalat kellene megfigyelnünk. Ezt azonban eddig nem tapasztaltuk. Holott, az ICP-s kísérletek egyértelműen nagy mennyiségű króm jelenlétét jelzik a kisülési plazmában. Ennek tisztázása további kutatást igényel.

Hőmérsékletek és intenzitások eloszlása

Az ELCAD-plazmában a gáz- (T_g) és az elektronhőmérséklet (T_e) eloszlását is megmértük a kisülés függőleges tengelye mentén. A T_g -t az OH ultraibolya, nem felbontott, $G_0 = 306,5$ nm, $G_1 = 306,8$ és a $G_{ref} = 308,9$ nm sávfejeinek intenzitásarányaiból (G_0/G_{ref} vagy G_1/G_{ref}) kapott rotációs hőmérséklettel közelítettük. Ebben az esetben ugyanis $T_{rot} \approx T_g$.

Az anód közelében $T_{rot} \sim 5700\text{--}6000$ K. A kisülési plazma központi részében, a pozitív oszlop tartományában $T_{rot} \sim 4000$ K, a katódnál pedig $T_{rot} \sim 7500\text{--}8000$ K. Ez utóbbi érték igen jól egyezik a korábbi független számításainkkal, miszerint a katódfelület–katódsötétter határrétegben $T_g \sim 7000$ K.

Mivel az ELCAD atmoszférikus nyomáson működik, ahol az irodalom szerint az elektronok energiaeloszlása Maxwell-szerűnek vehető, a T_e -t az emittált Cu-I 510,5 nm és a Cu-I 515,3 nm vonalak mért intenzitásainak arányából határoztuk meg (4. ábra).



3. ábra. A mért G_0/G_{ref} és G_1/G_{ref} intenzitásarányból és ezek átlagából számolt T_{rot} az anódtól mért távolság függvényében.

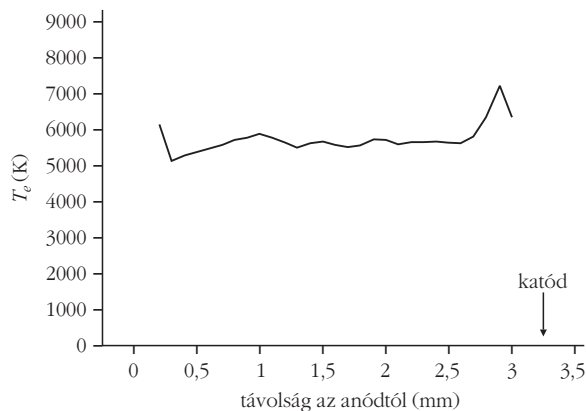
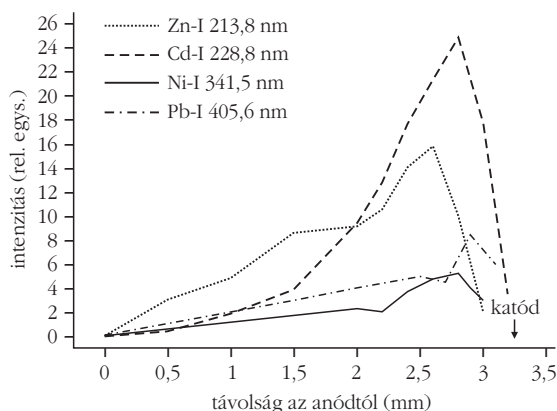
Az anódnál $T_e \sim 6000$ K, a pozitív oszlopban $T_e \sim 5500$ K, a katód közelében pedig a legnagyobb, ~ 7500 K, elektronhőmérséklet érték adódott.

A fenti eredmények szerint a rotációs és az elektronhőmérsékletek térbeli eloszlása az ELCAD-plazmában egymáshoz igen hasonló. Mindkét esetben az anód és a katód közelében a hőmérsékletek növekednek, ezt az anód és a katód felé növekvő elektromos potenciálnak, az anódesésnek, illetve a katódesésnek tulajdoníthatjuk. Az anódhoz és a katódhoz közeli tartományokban a $T_{rot}/T_e \rightarrow 1$, míg a kisülési plazma más helyein ez az arány körülbelül 0,6–0,8. Figyelembe véve a hőmérsékletek meghatározásának ~ 20 – 30% -os bizonytalanságát, a T_{rot} és T_e közötti eltérés nem jelentős. Itt meg kell említeni, hogy a T_{rot} a T_e -nek csak egy jó közelítése. Ezek alapján az ELCAD-plazmában kapott T_{rot}/T_e arányok igen jó eredménynek tekinthetők, amelyek az irodalommal egyezően azt mutatják, hogy atmoszférikus nyomáson a T_{rot}/T_e arány az 1-hez közeli értékű.

Az elektrolitban feloldott fémek emittált atomi vonalainak intenzitás-eloszlását mutatja ábra az 5. ábra.

Az intenzitások maximumait a negatív fény tartományában figyeltük meg. Az emittált vonalak ismertett mechanizmusa alapján, a kisülés többi részéhez képest, a semleges fématomok diffúziós vesztesége a negatív fényben a legkisebb, mivel ez van legközelebb a semleges fématomok keletkezési helyéhez, a katódsötétterhez. A

5. ábra. Az elektrolitban feloldott fémek emittált atomi vonalainak intenzitáseloszlása az anódtól mért távolság függvényében (spektrális szélesség = 0,2 nm, pH = 1,55, oldat áramlási sebessége = 160 ml/h).



4. ábra. A Cu-I 510,5 nm és Cu-I 515,3 nm vonalak mért intenzitásarányából számolt T_e az anódtól mért távolság függvényében.

kisülés egyéb részeihez viszonyítva a semleges fématomok sűrűsége itt a legnagyobb. Továbbá, a mérések szerint a negatív fényben T_e értéke elég magas. Ezért az elektronütközéssel gerjesztett fématomok sűrűsége ebben a tartományban a legnagyobb, tehát itt mutatnak az emittált intenzitások maximumot. A negatív fényben ugyanakkor a háttérvonalak és -sávok (H_β , OH, N_2 stb.) intenzitásai a kisülés más részeihez képest a legkisebbek. Ezért a legjobb jel/zaj viszonyt akkor érjük el, ha a negatív fényt képezzük le a monokromátor belépő részére.

Kapilláris ELCAD

Az ELCAD érzékenységeinek növelése érdekében egy kapilláris elrendezésű ELCAD-ot készítettünk. Egy 5 mm külső és 1 mm belső átmérőjű üvegapillárisban áramoltatjuk az elektrolitoldatot. A kapilláris lecsapott végén kialakuló folyadékfelszín felett jön létre a kisülés. A katódfelet a rendelkezésre álló teljes folyadékfelületet, katódfelet befedi, ezért ez egy úgynevezett abnormális ködfénykisülés. (A korábbi ELCAD-ok esetében az elektrolitkatód felülete jóval nagyobb volt, mint a katódfelet, ezért ezek úgynevezett normál kisülések voltak.) Ennek megfelelően a kapilláris ELCAD-ban az áramsűrűség körülbelül hatszorosára, a katódesés másfélszeresére növekedett annak, mint amit egy normál ELCAD-plazmában mértünk. Az emittált atomi fémvonalak intenzitása pedig egy nagyságrenddel nőtt a korábbi, normál kisülésben észleltekhöz képest.

A kisülés stabilitását nagymértékben javítottuk azáltal, hogy a folyadék áramoltatását egy dugattyús (syringe) pumpával végeztük. Továbbá, hogy elkerüljük az elektrolitkatódban a kisülés során fellépő hidrogénképződés nem kívánt, instabilitásokat okozó káros hatásait, a kapillárisbeli elektrolitoldatot egy ionos vezető közbeiktatásával kapcsoltuk a tápegység negatív pólusához. Így egy nagyon stabil folyadékfelszín alakult ki a kapilláris végén, ami jelentősen csökkentette az intenzitás zajokat. Ez az igen stabil kisülés lehetővé tette, hogy a kapilláris ELCAD-cellát egy áramló oldatos, mintabeinjektáló, analízis rendszerbe (Flow Injection Analysis System) építsük. Egy mintaváltó szelep segítségével 30 μ l-nyi, meghatározott koncentrációjú mintaoldatot injektálunk be az áram-

ló alapelektrolitba. A kívánt atomi fémvonalak intenzitásának időbeli változását mértük egy a számítógépbe helyezett, MTA SZFKI gyártmányú adatgyűjtő kártya segítségével. A mért intenzitásokat az oldat áramoltatási sebességének függvényében optimalizáltuk. Így, elemektől függően, 0,5–1,2 nanogramm abszolút kimutatási határokat értük el. Sajnos, a króm itt is kivétel.

Az ELCAD gyakorlati alkalmazása

Az ELCAD-elven működő monitor első prototípusát a 90-es években, a Fővárosi Csatornázási Művek észak-pesti szennyvíztelepén helyeztük üzembe. Ez a készülék a csatornahálózatból a szennyvíztelepre beáramló szennyvíz nehézfém-koncentrációját mérte folyamatosan. Így sikerült kimutatni azt, hogy a gyárak az összegyűjtött, nehézfém-tartalmú szennyvizeket valóban hétvégeken és éjjel engedik le a közüzemi csatornába, amikor ellenőrzés nincs. Egy készülék a W.R. Grace Co. Washington Research Center, Columbia MD, USA laboratóriumában, egy pedig a YUIL Environmental Center, Szóul, Koreában működik.

Az ELCAD-monitort természetesen hazai és nemzetközi szabadalmak védik.

További feladatok

A környezetvédelmi előírások szigorodása egyre kisebb nehézfém-koncentráció kimutatását igényli. E cél eléréséhez az ELCAD érzékenységet növelni kell. Olyan megol-

dásokat kell keresni, amelyek révén az emittált atomi fémvonalak intenzitása nő úgy, hogy közben a háttér vonalainak és sávjainak intenzitása nem emelkedik, hanem lehetőleg csökken (a jel/zaj viszony javul). Így az ELCAD észlelési határa is jelentősen csökkenthető.

A kapilláris elrendezésű ELCAD, a króm emittált intenzitását kivéve, sok tekintetben megfelel ezeknek a feltételeknek. Mivel a króm az egyik legveszélyesebb nehézfém, döntő fontosságú, hogy az ELCAD képes legyen az egyre kisebb krómkoncentrációk kimutatására. Ezért kutatásokat kell végezni annak megértésére, hogy, habár a króm jelen van az ELCAD-plazmában, az emittált atomi vonalainak intenzitása miért olyan gyenge. Ezek alapján keresni kell a módokat, miként tudjuk az emittált króm-vonal intenzitását növelni.

Biológiai szempontból fontos bizonyos nyomelemek (B, Ba, As, Se) koncentrációjának közvetlen mérése vizes oldatokban. Eddigi megfigyeléseink szerint ezen elemek emittált vonalait nem észleltük az ELCAD-plazmában. Kisülésfizikai és kémiai szempontból is igen érdekes feladat kideríteni ennek az okát, és a probléma valamilyen megoldását megtalálni.



Az itt ismertetett kutatásokat az OTKA T-042493, 029112, 4227 pályázatok támogatásával végeztük.

Irodalom

1. T. CSERFALVI, P. MEZEI, P. APAI – J. Phys. D.: Appl. Phys. 26 (1993) 2184–2188
2. T. CSERFALVI, P. MEZEI – J. Anal. At. Spectrom. 9 (2004) 345–349
3. P. MEZEI, T. CSERFALVI, M. JÁNOSSY – J. Phys. D.: Appl. Phys. 31 (1998) L41–L42
4. E.J. HART, M. ANBAR: *The hydrated electron* – John Wiley, New York, 1970, 63

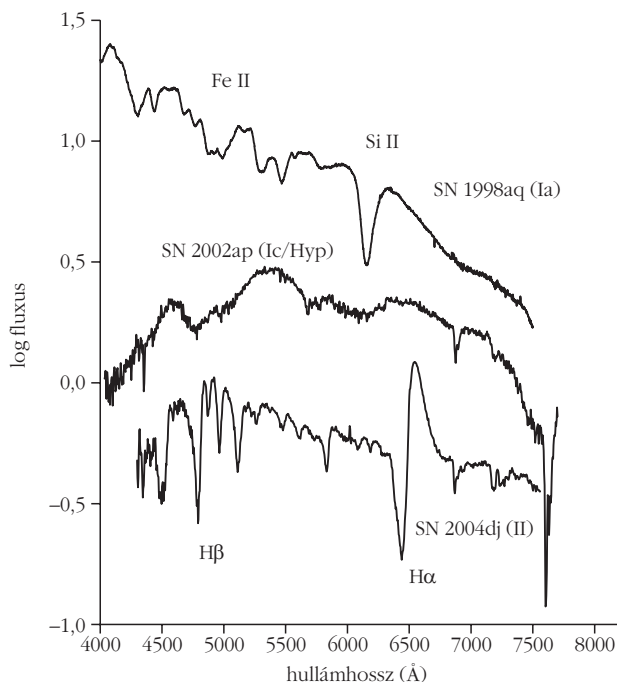
TÁVOLSÁGMÉRÉS SZUPERNOVÁKKAL: TÉNYEK ÉS TALÁNYOK

Vinkó József
SZTE Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék

Az elmúlt évtized egyik legnagyobb hatású tudományos felfedezése volt annak felismerése, hogy az Univerzum egyre gyorsulva tágul [1, 2]. Az Ősrobbanásmodell széles körű elfogadása óta, körülbelül a 60-as évek közepétől kezdve a kozmológiai tankönyvek egyetértettek abban, hogy az egyetlen kozmológiai skálán ható erő, a gravitáció mindenképpen lassítja a tágulást. A kérdés csak az volt, hogy milyen mértékben – elegendő-e a lassulás ahhoz, hogy véges idő alatt a tágulás összehúzódná forduljon, vagy a tágulás minden határon túl folytatódik, igaz, egyre csökkenő ütemben. A gyorsuló tágulás felfedezése ennél fogva roppant érdekes kérdéseket vetett fel: mi az az erő, vagy kölcsönhatás, amely a gravitáció ellenében képes gyorsítani a tágulást, milyen hatással volt ez az Univerzum korábbi korszakaira stb. Számos kozmológiai elmélet látott napvilágot ezek magyarázatára. A gyorsulást okozó titokzatos kölcsönhatást *sötét energiának* (dark energy) nevezték el, ez

nem tévesztendő össze a galaxisok sötét gravitáló anyagával (dark matter). A sötét energia mibenlétének kutatása napjaink egyik „forró” témája a fizikai kozmológiai szakirodalomban.

A gyorsuló tágulás kimutatására a csillagászok nagyon távoli szupernóva-robbanások fotometriai jellemzőit használták. A felfedezés ellenőrzése és az esetleges szisztematikus hibák kiküszöbölése érdekében nagyon fontos lenne más, független módszerrel is igazolni a gyorsuló tágulást, jelenleg azonban egyedül a szupernóvák alkalmasak erre. Ezért az összes ezzel kapcsolatos tudásunk azon alapul, hogy mennyire ismerjük a szupernóvák fizikáját, illetve mennyire pontosak a velük végzett távolságmérési eljárások. Ebben a cikkben röviden áttekintjük a szupernóvák típusait, a róluk szóló alapvető fizikai ismereteket, a távolságmérésben betöltött szerepüket, illetve azokat a pontokat, melyek még tisztázásra szorulnak.

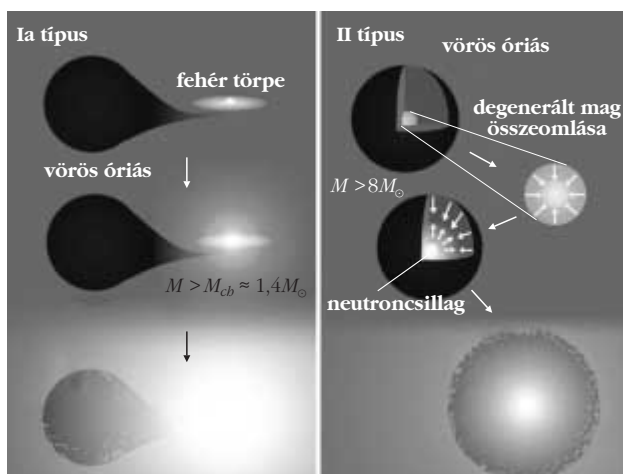


1. ábra. A különböző típusú szupernóvák spektrumai a maximális fényesség idején.

A szupernóvák típusai

A szupernóvák (SN-k) felrobbanó csillagok. A robbanás során nagyságrendileg 10^{46} J energia szabadul fel, amelynek több mint 99%-a neutrínók formájában jön létre. A neutrínók gyakorlatilag további kölcsönhatás nélkül, szabadon kisugárzódnak, ezzel elviszik a keletkező energia túlnyomó többségét. A fennmaradó, mintegy 10^{43} J energia nagy része a csillag külső burkának ledobódására fordítódik. Ennek eredményeként egy eleinte sűrű és forró táguló gázfelhő jön létre. A tágulás miatt a gázfelhő egyre ritkul és hűl. A SN-k jellegzetes fényváltozást mutatnak az optikai tartományban: gyors felfényesedés, majd egyre lassuló elhalványodás jellemzi őket. Bizonyos esetekben megfigyelhető egy konstans szakasz (plató), illetve egy másodlagos púp is a fénygörbén a maximum után. A leszálló ágon a fénygörbe meredeksége egy idő után lecsökken, és konstans, $\sim 0,01$ magnitúdó/nap körüli értékre áll be. Érdekes, hogy a fényváltozást nem a robbanásnál keletkező tűzgolyó hozza létre. A felhő ugyanis a gyors tágulás miatt körülbelül 1 nap alatt adiabatikusan kihűlné, ha nem tartalmazna a robbanásban keletkező radioaktív nikkelt. A $^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$ radioaktív bomlás viszont még évekig képes belülről fűteni a felhőt, ezért lényegében ennek a folyamatnak köszönhetjük, hogy a SN-kat hosszú ideig tanulmányozhatjuk. A fénygörbe leszálló ágának konstans meredeksége pontosan a $^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$ bomlás időállandójának felel meg.

A fénygörbék hasonlósága ellenére a SN-k spektruma igen különböző lehet. Az I-es típusú SN-k spektrumában nincs hidrogénre utaló vonal, ezzel szemben a II-es típusú SN-k színeképében a hidrogén vonalai dominálnak (1. ábra). Az I-es típus további altípusokra oszlik. Az Ia típus jellegzetessége az egyszerűen ionizált szilícium (Si

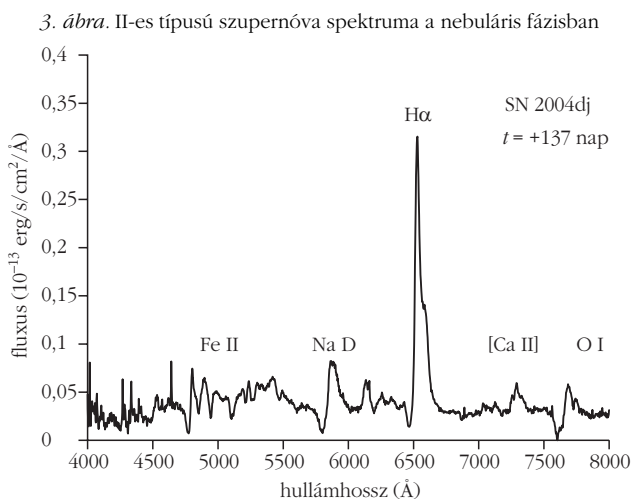


2. ábra. A szupernóvák kialakulásának modellje

II) vonalainak megjelenése. Az Ib típusú SN spektrumában a He vonalai erősek, míg az Ic típusba tartozók spektrumában sem Si, sem He nincs, ezeknél főként ionizált vas (Fe II és Fe III) figyelhető meg.

A spektrumok időbeli fejlődése hasonló a különböző típusoknál. A maximális fényesség környékén kék kontinuum figyelhető meg, ami a ledobódott gázfelhő magas hőmérsékletére utal. A kontinuumra úgynevezett P Cygni-profilú erős vonalak rakódnak rá, melyek egy széles emissziós komponensből és egy ehhez képest kékeltolódott abszorpciós komponensből állnak (mint például az SN 2004dj $\text{H}\alpha$ vonala az 1. ábrán). Ilyen vonalprofilok nagy sebességgel táguló atmoszférában jönnek létre. A vonalprofilok leszámítva a színekép hasonlít a normális csillagok színeképére, ezért ezt a szakaszt *fotoszferikus fázisnak* nevezzük. A későbbiekben a kontinuum gyengül, ellaposodik, majd szinte teljesen eltűnik. Az emissziós vonalak megerősödnek, és megjelennek tiltott átmenetek vonalai is (2. ábra). Ekkor a színekép már egy átlátszó gázköd spektrumára emlékeztet, ez a *nebuláris fázis*.

A legtöbb SN nagy tömegű csillagok összeomlásából jön létre (3. ábra, jobb oldal). Amikor egy 8 naptömegnél ($M_{\odot}$) nagyobb tömegű csillag magjában a fúziós energiatermelés végén inaktív vasmag jön létre, a mag lassan elkezd összehúzódní, amit még az elfajult elektrongáz



nyomása sem képes megállítani. Egy kritikus sűrűség elérésekor beindul a

$$p + e^- \rightarrow n + \nu_e$$

inverz béta-bomlás, melynek során a nyomáshoz eddig leginkább hozzájáruló elektronok hirtelen eltűnnek a magból. Ekkor a vasmag, csaknem szabadeséssel, gravitációs kollapszusba kezd. A kollapszust a neutrongáz elfajulása állítja meg, körülbelül 10^{13} g/cm^3 sűrűség elérésekor. Az elfajult neutrongömb hihetetlenül kemény, csaknem összenyomhatatlan, ezért a fentről ráhulló csillaganyag a szó szoros értelmében visszapatann róla. A visszapatannó és a még befelé eső rétegek ütközésénél egy kifelé terjedő lökéshullám alakul ki. A lökéshullám felfűti a belső rétegeket és nukleáris fúziót indít be. A fúziós front azonban lassabban terjed kifelé, mint a lökésfront, ezért a csillag külső, hidrogénben gazdag rétegei még azelőtt ledobódnak, mielőtt a robbanási hullám elérné őket. Ez a modell sikeresen megmagyarázza a hidrogén jelenlétét a II-es típusú SN-kban.

Az Ib/Ic típusok hasonló módon, a csillagmag összeomlásából jönnek létre. Ezeknél azonban a csillagok a legkülső, hidrogént tartalmazó rétegüket még a robbanás előtt elvesztették valamilyen intenzív tömegvesztési folyamat (csillagszél) során. Az elképzelés szerint az Ib típusnál megmaradt a He-réteg, ezért látunk He-vonalakat a spektrumban. Az Ic típusnál viszont már ez is eltávozott korábban, így csak a nehezebb elemek vonalai figyelhetők meg.

Néhány éve fedezték fel az Ic típusúhoz hasonló úgynevezett *hipernóvák*at, melyek spektruma a kontinuum mellett nagyon erősen kiszélesedett, egymásra rakódó vonalakat tartalmaz (1. ábra középső spektruma). A vonalkiszélesedés alapján a kiáramlási sebesség 30–40 ezer km/s! Az elképzelés szerint ezekben az objektumokban a robbanás nem gömbszimmetrikusan, hanem bipoláris kilövelléseként jön létre, emiatt látunk lényegesen erősebb vonalkiszélesedést. A megfigyelések szerint ilyen SN-k gyakran produkálnak *gamma-villanást* (gamma-ray burst, GRB), amit szintén a jetmodellel magyaráznak.

A fentiekől teljesen eltérő mechanizmus vezet Ia típusú SN-robbanáshoz. A megfigyelhető jellemzőit tekintve ez a robbanás sokkal homogénebb, mint az összes többi. A jelenleg elfogadott modell szerint a robbanó objektum egy szén–oxigén fehér törpecsillag, amely egy kettős rendszer tagja (2. ábra, bal oldal). A rendszer másik csillagától a fehér törpe anyagot kap a belső Langrange-ponton keresztül, emiatt tömege túllépi a Chandrasekhar-féle határt (kb. $1,4 M_\odot$). Ekkor a fehér törpe összeroppan, belsejében beindul a szén és az oxigén fúziója. Mivel az elfajult állapotú anyag nyomása nem függ a hőmérséklettől, a fúziós energiatermelés teljes egészében a fúziós ráta növelésére fordítódik, ezért a reakció a fehér törpe teljes nukleáris felrobbanásához vezet. Ezért az Ia típusú SN-kat szokás *termonukleáris SN*-knak is nevezni. Mivel a robbanó objektum mindig nagyjából ugyanolyan tömegű és összetételű, a robbanás megfigyelt jellemzői is hasonlóak lesznek. A többi SN-robbanásban a felrobbanó csillag tömege széles határok között változhat, ezért azok sokkal heterogénebb képet mutatnak.

Ia típusú SN-k mindenféle galaxisban előfordulnak, ezzel szemben a többi SN kizárólag spirálgalaxisokban, azokon belül is főleg spirálkarokban, csillagképző területeken figyelhető meg. Ez teljesen összhangban van a keletkezésükről fentebb vázolt modellekkel, hiszen a nagy tömegű csillagok főként a spirálkarokban születnek. Nagy átlagban egy galaxisban 50–100 évente tűnik fel egy SN, de vannak ennél négyszer-ötször nagyobb SN-gyakoriságot mutató galaxisok is. A Tejútrendszerben utoljára 1604-ben, *Kepler* korában figyelhettek meg SN-t. Természetesen az eltelt 400 évben több SN is felrobbanhatott a Tejútrendszerben, de azokat a galaxisunk nagy részét a földi észlelők elől elfedő csillagközi por miatt nem vettük észre.

Távolságmérés Ia típusú szupernóvákkal

Az Ia típusú SN-k fentebb taglalt homogenitását leginkább a távolságmérésnél lehet kihasználni. Húsz éve még úgy vélték, hogy az Ia típusú SN-k maximumban mind egyforma fényesek, mivel a fehér törpe mindig a Chandrasekhar-tömeg elérésekor robban fel. Az ilyen objektumokat a csillagászok *standard gyertyáknak* nevezik, hiszen ezek segítségével a fotometriai adatokból a távolságtörvény értelmében kiszámítható az objektum távolsága. A távolságtörvény magnitúdóban kifejezett alakja

$$m_\lambda - M_\lambda = 25 + 5 \log_{10} d_L + A_\lambda + K(\lambda), \quad (1)$$

ahol m_λ a mért, M_λ az abszolút magnitúdó, d_L az úgynevezett *luminositási távolság* (megaparsekben), A_λ a csillagközi por miatti fényességcsökkenés (magnitúdóban), K_λ pedig az úgynevezett *K-korrekciónak*. Az utolsó tag azért lép fel, mert a távoli SN-k az Univerzum tágulása miatt vöröseltolódást szenvednek, megváltozik a megfigyelt spektrális eloszlásuk, ezáltal egy adott szűrővel mért fényességük különbözni fog attól, mint amit nulla vöröseltolódásnál mérnénk.

(1) értelmében a luminositási távolság kiszámításához az összes többi tényezőt ismernünk kell. m_λ a SN fotometriájából elvileg meghatározható, erre jól bevált eljárások léteznek a csillagászatban. A_λ szintén mérhető, bár jóval bizonytalanabban. Erre főként a SN kék (B) és zöld (V) szűrővel mért magnitúdójának különbségét, a $B-V$ színindexet használják. A megfigyelések szerint az Ia SN-k $B-V$ görbéje a maximum után 1–3 hónappal nagyon hasonló lefutású (a SN-k spektrumának homogenitása miatt). Az ettől való eltérést a csillagközi por vörösítő hatása okozza, amelyből a *standard vörösödési törvény* segítségével A_λ kiszámítható a vizsgált hullámhossztartományon. K_λ becsléséhez lokális (tehát gyakorlatilag 0 vöröseltolódású) SN-k spektrumait használják, melyeket az adott vöröseltolódáshoz transzformálnak, ebből azután kiszámítható a korrekció mértéke. Ehhez szintén azt használják ki, hogy a különböző Ia SN-k spektruma nagyon hasonló egymáshoz mind a fotoszferikus, mind a nebuláris fázisban. Ebben a feltevésben implicite az is benne van, hogy a nagy vöröseltolódású (tehát nemcsak térben, hanem időben is távoli) Ia SN-k ugyanolyan fizi-

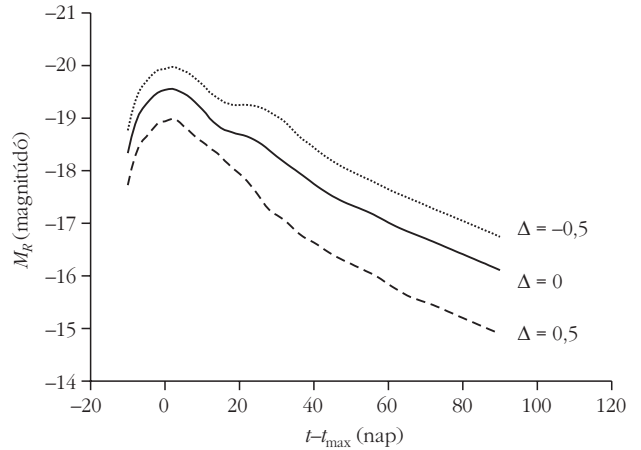
kai tulajdonságúak, mint lokális megfelelőik, vagyis ezeknek az objektumoknak nincs „kozmológiai” evolúciója.

A „standard gyertya” hipotézis értelmében M_k elvileg minden Ia SN-ra ugyanaz, és ez az érték kalibrálható. A 90-es évek közepére azonban nyilvánvalóvá vált, hogy az erre irányuló törekvések kudarcá miatt van, mert a „standard gyertya” hipotézis nem igaz. Az évtized elején indult szisztematikus SN-kereső programok első eredményeiből kiderült, hogy az Ia SN-k maximális abszolút fényessége legalább 1–1,5 magnitúdós szórást mutat, ami nem a mérési hibából származik. Szerencsére az is bebizonyosodott, hogy a maximális fényesség korrelál a SN-k egyéb mérhető paramétereivel. Az egyik ilyen paraméter a B -szűrős fénygörbe időbeli lefutása. Erre kétféle kalibrációs eljárást is kidolgoztak. Az egyik a *nyújtási módszer*, amely szerint az időtengely skálázásával ($\Delta t' = s\Delta t$) a B -fénygörbék egymásra illeszthetők. Az s nyújtási paraméter egyenesen arányos a maximális abszolút fényességgel [1]. A $\Delta m_{15}(B)$ -módszer lényegében ugyanezt a korrelációt alkalmazza, de itt a használt paraméter a B -fénygörbe csökkenési üteme: $\Delta m_{15}(B)$ a B -fényesség maximumhoz képesti csökkenése magnitúdóban, a legnagyobb fényesség után 15 nappal [3]. Az Ia SN-k abszolút fénygörbéinek szórása mindkét módszerrel jelentősen csökkenthető. E két módszer hátránya, hogy csak a B -fénygörbére használható, amelynek mérése CCD-kamerákkal problematikus, mivel a CCD-chipek inkább vörösérzékenyek. Ezt küszöböli ki részben a *többszínbeli fénygörbealak* (Multi-Color Light Curve Shape, MLCS) módszer, amely a standard Johnson-féle B -, V -, R -, I -szűrőkön át mért fénygörbék alakját használja fel a maximális fényesség becsléséhez. Az előbbiektől eltérően ez sokparaméteres kalibrációt igényel. Itt az illesztendő paraméter $\Delta = M_V^{\max} - M_V^{\max}(0)$, ahol $M_V^{\max}(0)$ egy „normál” Ia SN V -szűrős abszolút fényessége maximumban. Kiderült, hogy a különböző színbeli fénygörbék alakja és $M_V^{\max}$ között többféle korreláció is fennáll:

1. a nagyobb luminozitású SN-k a maximum után kekebbek;
2. a nagyobb luminozitású SN-k lassabban halványodnak;
3. a nagyobb luminozitású SN-k R és I görbéin a másodlagos púp később jelentkezik.

A 4. ábra a 3. pontot szemlélteti $\Delta = +0,5$, $0,0$ és $-0,5$ esetén.

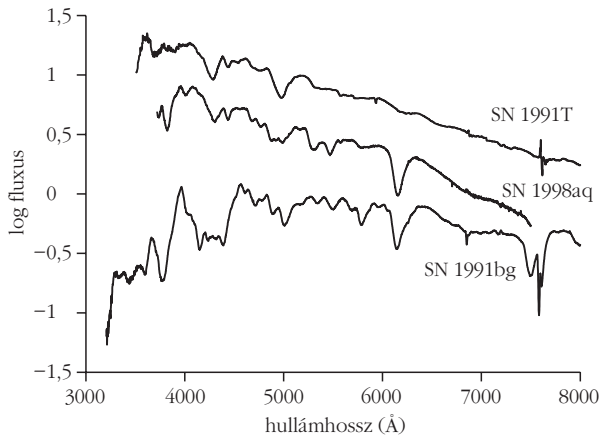
A fenti korrelációk jelenleg teljesen empirikus alapon állnak, bár történtek erőfeszítések ezek elméleti megalapozására. Attól egyelőre nagyon távol vagyunk, hogy a „normál” Ia SN-k maximális fényességét elméleti modellekből kalibráljuk. Ezért az összes módszer empirikus kalibrációt igényel: ismert távolságú (és vörösödésű) SN-k halmazából kell megállapítani $M_V^{\max}$ -ot, illetve kalibrálni ennek korrelációját a többi paraméterrel (ez különösen az MLCS-módszernél nehéz, hiszen ott teljes fénygörbét kell minden időpontra összeilleszteni). Az első próbálkozások azon az elképzelésen alapultak, hogy a kalibráló objektumok közeli, fényes SN-k legyenek, melyek távolsága valamilyen független (pl. cefeidákon, vagy Tully–Fisher-reláció alapján) információ révén ismert. Kiderült azonban, hogy csak nagyon kevés ilyen SN jöhet



4. ábra. Ia típusú szupernóvák R -szűrős fénygörbéi a Δ paraméter függvényében. Látható, hogy a nagyobb luminozitású szupernóvák lassabban halványodnak.

szóba. Az MLCS első kalibrációja például 9 objektumon alapult [4], amelyek egyedi távolsága is csak pontatlanul volt ismert. Ezért később áttértek a távoli, nagyobb vöröseltolódású SN-k használatára, melyek relatív távolságát a Hubble-törvény alapján sokkal pontosabban meg lehet állapítani. Azonban ennek a megközelítésnek is vannak hátrányai: egyrészt a távoli SN-k sokkal halványabbak, emiatt fotometriájuk jóval pontatlanabb, másrészt a nagyobb vöröseltolódásoknál a K -korrekció értéke is jelentősebb, emiatt bizonytalanabb. Például egy $z = 0,25$ vöröseltolódású SN-nál a maximális fényesség idején a K -korrekció V -szűrőben körülbelül $-0,4$ magnitúdó, ami már összemérhető az egyedi SN-k fényességszórásával. Az ennél is nagyobb vöröseltolódásoknál a méréshez alkalmazott szűrő már a SN teljesen más spektrális tartományát mintavételezi, mint a lokális objektumok esetén. Például $z = 0,4$ körül az R -szűrő a SN nyugalmi rendszerében körülbelül a B -szűrő spektráltartományára eső fluxust méri, $z > 1$ esetén pedig az optikai tartományban gyakorlatilag csak a SN ultraibolya fluxusa látszik. Ez további problémákat okoz, mivel a SN-k U -szűrős fénygörbéiről jóval kevesebb és pontatlanabb adattal rendelkezünk, mint a többi hullámhossztartományról, ezért nehéz bármivel is összevetni a mért fényességeket.

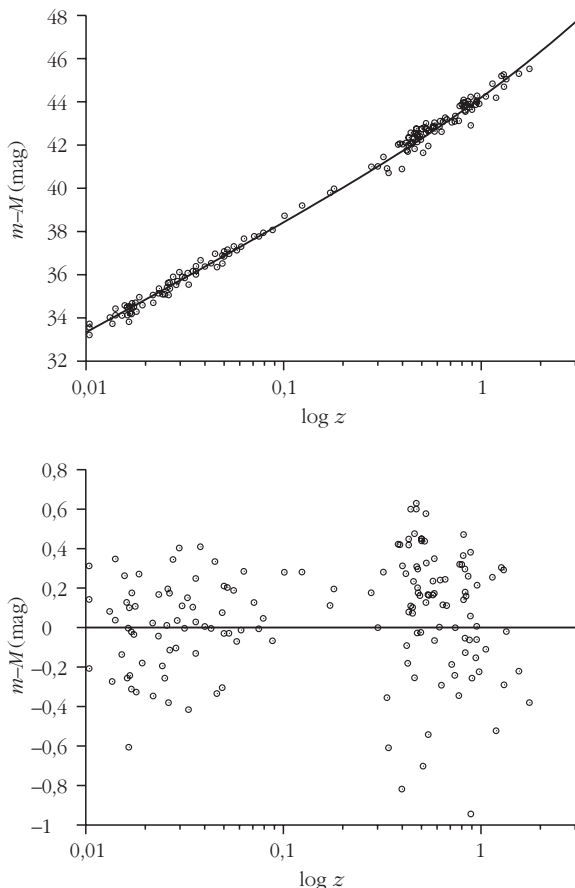
Sajnos mind a kalibrációt, mind a konkrét objektumok távolságmérését számos egyéb körülmény nehezíti, melyek oka részben mérés technikai, részben az Ia SN-k még nem kellően ismert fizikájában keresendő. Az első ilyen probléma maga a fotometria. Az egyedi távcsövekkel, szűrőkkel, detektorokkal végzett méréseket az úgynevezett standard rendszerbe kell transzformálni annak érdekében, hogy az alkalmazott műszerek átviteli függvényét figyelembe vehessük a fotometria során. A standard transzformációt csillagokra dolgozták ki, az összehasonlítható objektumok ismert spektrális tulajdonságú csillagok. A SN-k spektruma viszont eltér a csillagokétól, különösen a nebuláris fázisban. Az ilyen objektumok standard transzformációja pontatlan lesz, a különböző műszerekkel ugyanarról az objektumról készült mérések minimum $0,1$ magnitúdó szórást mutatnak (problematisabb esetekben ez akár $0,2$ – $0,3$ magnitúdóra is nőhet). Ez a hiba azután továbbterjed a távolságmérésre is. A másik technikai



5. ábra. Ia típusú szupernóvák spektruma a fényességmaximum idején. Az SN 1998aq a „normális”, míg az SN 1991T és az SN 1991bg a „pekuliáris” (különleges) SN-k jellegzetességeit mutatja.

nehézség a SN galaxisának jelenléte miatt lép fel. A SN képe a galaxis képére rakódik rá, ami erős, inhomogén háttérfényességet jelent a CCD-felvételen. Egy ilyen háttér korrekciója igen nehéz. A legjobb módszer elvileg az, hogy készítenek egy referenciaképet a galaxisról akkor, amikor a SN nem látszik, és ezt a referenciaképet digitálisan levonják a SN+galaxis képből. Ezzel az a probléma, hogy ilyen kép a SN felfedezése előtt ritkán készül, tehát meg kell várni, míg a SN teljesen elhalványul, és csak 1–2

6. ábra. Ia típusú szupernóvák távolságmodulusának függése a vöröseltolódástól. A folytonos vonal a nulla anyagsűrűségű (üres) Univerzumban mérhető luminozitási távolságot szemlélteti. Az alsó ábra a mért adatok görbétől való eltéréseit mutatja.



évvel utána lehet a referenciaképet felvenni. Ezt igyekeznek kiküszöbölni az SZTE és az MTA Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézet munkatársai által végzett mérési program, amelynek célja ilyen referenciaképek készítése a közeli galaxisokról [5].

Problémát jelent az Ia SN-kon belül a különleges (*pekuliáris*) objektumok jelenléte is, melyek Ia típusúak, de a „normálistól” eltérő spektrális jellemzőik vannak (5. ábra). Ezek aránya a statisztikai becslések szerint akár 30–40% is lehet egy adott térfogati mintában. Az ilyen SN-k két nagyobb csoportra oszthatók. Az SN 1991T-csoportba tartozók a maximum környékén jóval kékebbek, kevés spektrumvonalat mutatnak, és nagyobb luminozitásúak, mint a „normál” SN-k. Az SN 1991bg-csoport tagjai viszont 1–1,5 magnitúddal halványabbak, több erős spektrumvonalat mutatnak, és jóval gyorsabb a halványodási ütemük is. Az eltérő spektrális jellemzők miatt ezen objektumok nehezebben illeszthetők be a kalibrációs sorozatba. Ismerünk olyan Ia-nak klasszifikált SN-t is (SN 2002cx), amelynek teljesen egyedi jellemzői voltak, egyetlen másik Ia SN-hoz sem hasonlítható fénygörbét és spektrumot produkált. Ezen pekuliáris Ia SN-k fizikája jelenleg nem kellően ismert, nem tudjuk, mi dönti azt el, hogy egy fehér törpéből „normális”, vagy pekuliáris SN jön létre. Természetesen az ilyen objektumok távolságmérése is jóval bizonytalanabb.

Mindenfajta fotometriai információra alapuló távolságmérésnél problémát jelent a csillagközi por okozta extinkció és vörösödés. Habár az Ia SN-k vörösödésének meghatározására létezik egy empirikus eljárás (lásd fentebb), ennek eredményei legalább $\Delta E(B-V) = \pm 0,1$ magnitúdó bizonytalanságúak (kb. ennyi az ismert, vörösödésmentes SN-k $B-V$ görbéjének szórása). A galaktikus vörösödési törvény értelmében a V -szűrő fényességcsökkenés $A_V = 3,1 E(B-V)$, amiből $\Delta A_V \sim 0,3$ magnitúdó bizonytalanság adódik. Ez szintén beépül a távolságmérés hibájába. Ezért sokan próbálkoznak különböző alternatív eljárásokkal, melyekkel igyekeznek a vörösödés meghatározásának hibáját csökkenteni. Sajnos mindmáig nincs teljes egyetértés abban, hogy mi lenne az igazán megbízható eljárás.

Mindezen nehézségek ellenére 2004-ben Adam Riess (STScI, USA) és munkatársai közzétették az általuk legmegbízhatóbbnak értékelt Ia SN-k listáját, az úgynevezett „arany mintát” (gold sample) [6]. Ezeket az MLCS-módszer legújabb változatával analízálták, így egy homogén módon meghatározott távolságskálát kaptak (igaz, itt is csak a relatív távolságok tekinthetők kellően pontosnak, a távolságskála zéruspontja változatlanul kérdéses). A 6. ábrán látható ezen SN-k távolságmodulusa (1. képlet) a vöröseltolódás függvényében. Folytonos vonallal az üres Univerzumban érvényes luminozitási távolság van feltüntetve:

$$d_L = \frac{c}{H_0} z \left(1 + \frac{z}{2} \right), \quad (2)$$

ahol c a fénysebesség, z a vöröseltolódás, H_0 a Hubble-állandó értéke $z = 0$ -nál. Jól látható, hogy a szórást figyelembe véve a mért adatok eltérése a folytonos vonaltól nem számottevő. A 6. ábra alsó részén a mért adatok (2)-

től való eltérése van ábrázolva. Látható, hogy a szórás körülbelül $\pm 0,5$ magnitúdó. A nagyobb vöröseltolódásoknál kicsit több SN szerepel a görbétől fölfelé, mint lefelé, viszont a negatív irányba szóródó pontok eltérése nagyobb. Erre a kicsiny aszimmetriára alapul jelenleg a gyorsuló tágulás és a $\lambda > 0$ kozmológiai állandó kimutatása [6]. A jelen tanulmánynak nem célja az ezzel kapcsolatos eredmények minősítése, az azonban megfontolandó, hogy a sokat idézett tudományfilozófiai kritérium, miszerint *an extraordinary claim requires extraordinary evidence*, a jelen kérdésben biztosan nem teljesül. Maguk az idézett szerzők is korrektül elismerik, hogy a jelenlegi ismereteinket tükröző SN-mintában még mindig sok a bizonytalansági tényező, ezért a kozmológiai következtetéseknél fennáll a túlínterpretálás veszélye.

Összegzőként ugyanakkor elmondható, hogy a szupernóvák kapcsolatos ismereteink az elmúlt 10 évben nagyságrendekkel bővültek, ennél fogva bizonyos, hogy

a további kutatások számos, jelenleg még ismeretlen, illetve csak elnagyoltan ismert részletre derítenek majd fényt. Erre a legnagyobb esélyt a tervezett SNAP űrtávcső (SuperNova Acceleration Probe) jelentheti [7], melynek felbocsátása 2010 körül várható.

Irodalom

1. S. PERLMUTTER et al. – ApJ 517(1999) 565
2. A.G. RIESS et al. – AJ 116(1998) 1009
3. M.M. PHILLIPS – ApJ 413(1993) L105
4. A.G. RIESS, W.H. PRESS, R.P. KIRSHNER – ApJ 473(1996) 88
5. Referenciaképek közeli galaxisokról: <http://astro.u-szeged.hu/~sn/GX/index.html>
6. A.G. RIESS et al. – ApJ 607(2004) 665
7. SNAP űrtávcső honlapja: <http://snap.lbl.gov>
8. Szupernóva Kozmológia Projekt honlapja: <http://www-supernova.lbl.gov>
9. Fényes szupernóvák honlapja: <http://www.rochesterastronomy.org/snimages/>
10. Magyar szupernóva-észlelések: <http://titan.physx.u-szeged.hu/~sn/>

SZÉN NANOCÖVEKEN ALAPULÓ SZELEKTÍV GÁZÉRZÉKELŐK

Koós Antal Adolf

MTA MFA, Nanoszerkezetek Osztály

A technikai fejlődés következtében egyre több automata, és ezzel együtt egyre több érzékelő vesz körül minket. Régóta használunk a szemünkönél vagy a fülünkönél jóval érzékenyebb fény-, illetve hangérzékelőket, segítségével a fény vagy a hang könnyen és egyértelműen jellemezhető. Ezzel szemben a gázérzékelők nehezen tudnak versenyre kelni az orrunkkal. A szagok azonosítására képes legkisebb és leggyorsabb „érzékelő” még mindig a kutya. Léteznek ugyan bizonyos gázokra érzékeny eszközök, de több gáz együttes jelenléte esetén kevés eszköz képes felismerni az összetevőket. Ezért az MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet (MTA MFA) több munkatársával célul tűztük ki egy könnyen használható, kisméretű, olcsó, gyors és szelektív gázérzékelő elkészítését. A gázérzékelést egy ígéretes anyag, szén nanocsövek segítségével valósítottuk meg [1–3].

Az egyfalú szén nanocsőhengerré tekert és tökéletesen illesztett, egyetlen atom vastagságú grafitos szerkezetű szénréteggént (grafén síkként) képzelhető el. A feltekerés egy lehetséges módját az 1. ábra szemlélteti.

A grafit síkot az 1. ábrán jelölt párhuzamos egyenesek (OB , AB') mentén elvágjuk, majd az O és A pontot egymásra illesztjük. Az így keletkező nanocső jellemezhető az O és A pontot összekötő $\mathbf{C}_b = n\mathbf{a}_1 + m\mathbf{a}_2$ úgynevezett feltekerési vektor segítségével, ahol $\mathbf{a}_1$ és $\mathbf{a}_2$ elemi rácsvektorok, n és m egész számok [4]. A kísérleti adatok szerint az egyfalú szén nanocsövek jellemző átmérője az 1–2 nm tartományban van, hozzávetőlegesen tízszer nagyobb, mint a legközelebbi szomszéd szénatomok távolsága grafit esetén. A többfalú szén nanocsövek koncentrikusan egymásba épülő egyfalú csövekből állnak, a falak közötti távolság 0,339 nm. A többfalú szén nanocsövek jellemző átmérője néhányszor 10 nanométer.

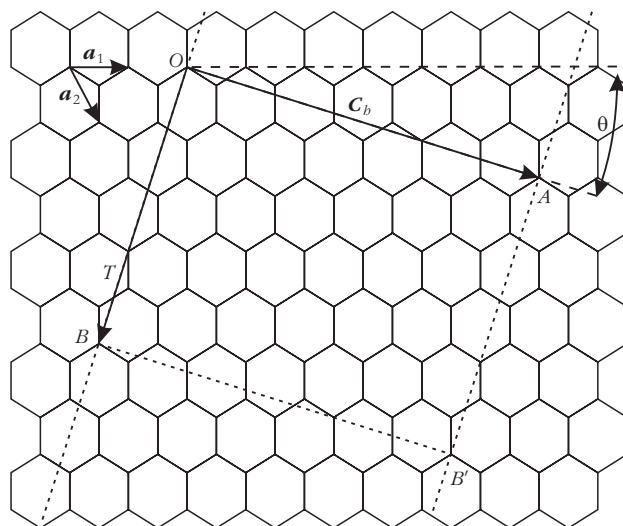
A grafén sík feltekerésének módjától függően különböző tulajdonságú nanocsövek keletkezhetnek [5]. Az elektronállapotok eloszlása szerint két esetet különböztetünk meg:

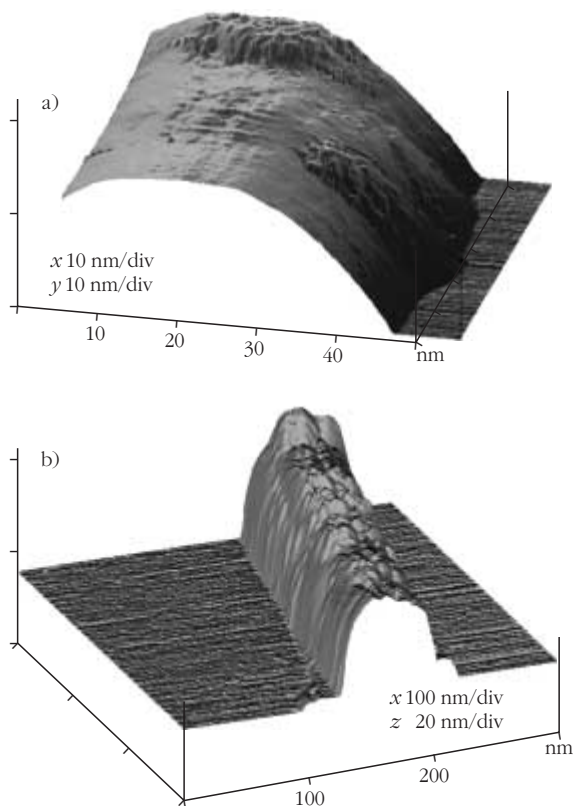
a) *fémesszén nanocsőről* beszélünk, ha a Fermi-energia környezetében minden energián a nanocső állapotsűrűsége különbözik nullától, vagy

b) *félvezetőszen nanocsőről* beszélünk akkor, ha a Fermi-energia környezetében található egy tiltott sáv, amelyben a nanocső állapotsűrűsége nulla.

A véletlenszerűen előállított nanocsövek egyharmada fémesszén, kétharmada félvezetős tulajdonságú. A félvezetős nanocsövek tiltott sávjának szélessége fordítottan arányos a

1. ábra. Egy kétdimenziós grafén sík a nanocsövek jellemzésére használt vektorokkal.





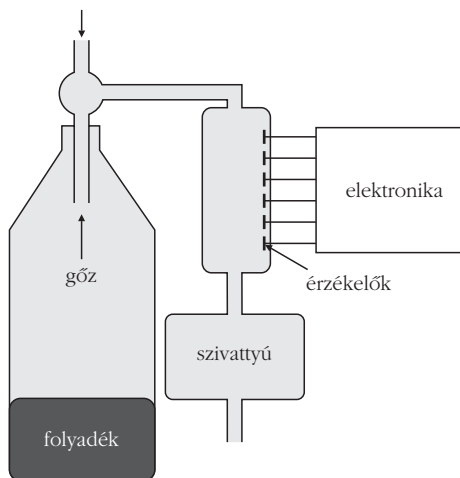
2. ábra. Funkcionalizált szén nanocsövek. a) golyósmalomban funkcionizált szén nanocsőről készült STM felvétel, jól megfigyelhető a funkciós csoportok „szigetszerű” elhelyezkedése; b) folytonosan funkcionizált szén nanocsőről készült STM felvétel.

nanocső átmérőjével. Ezeknek a tulajdonságoknak köszönhető, hogy kizárólag nanocsövek felhasználásával is lehetséges nanoelektronikai eszközöket (például fém–félvezető átmeneteket, azaz Schottky-diódát) készíteni [6]. A szén nanocső képes $100\ \mu\text{A}$ erősségű áramot vezetni, ami a cső geometriáját figyelembe véve rendkívül nagy, $10^7\ \text{A cm}^{-2}$ áramsűrűségnek felel meg [7]. Mai ismereteink szerint az egyfalú szén nanocső a legnagyobb szilárdságú anyag, Young-modulusa 1 TPa nagyságrendű. Ráadásul kémiaiilag stabil, agresszív kémiai kezeléseknél is ellenáll.

A szén nanocsövek egyedülálló geometriájuk, fizikai és kémiai tulajdonságaik miatt nagyon ígéretes objektumok gázok/gőzök érzékelése szempontjából is. A nanométeres tartományba eső átmérő, valamint az ebből adódó kvázi-egydimenziós elektronszerkezet folytán a falba épülő hibák, idegen atomok, kapcsolódó funkciós csoportok jelentősen módosíthatják az elektronszerkezetet és így a vezetési tulajdonságokat. Az egyfalú, félvezető szén nanocsövek vezetőképességét megváltoztathatják egyes, a környező légtérből fizisorbeált, vagy kemisorbeált molekulák, mint például NO_2 , vagy NH_3 [8], de számos más molekulára is vannak kísérleti adatok. Nemrégiben elméleti számítások is [9] alátámasztották, hogy szerves molekulák, mint például a benzol adszorpciója jelentősen megváltoztathatja az egyfalú szén nanocsövek vezetőképességét. Nanocsövek segítségével akár ppm (1 molekula az 1 millióból) gázkoncentráció is érzékelhető [10, 11]. Ugyanakkor meg kell jegyezni, hogy ezeket a kísérleteket ultrahagy vákuumban vagy ellenőrzött légkörben végezték,

azaz a mindennapi életben, ahol szobalevegőben kell valamilyen gázt/gőzt érzékelni, más érzékenységi határok várhatóak. Mivel a nanocső felületével érintkező légtérből fizisorbeált molekulák jelentősen befolyásolni tudják a szén nanocső tulajdonságait, lehetőség van a szén nanocsövek gázszenzorokként való alkalmazására szobalevegőben is. Az előállítás, illetve módosítás – például szándékosan létrehozott szerkezeti hibák, vagy specifikus érzékelő molekulák „lehorgonyzása” a cső külső felületén – különbözősége más és más molekulákra érzékeny nanocsöveket eredményezhet, így több, jól megválasztott nanocsőminta felhasználásával lehetőség nyílik a környezetben található gázok/gőzök felismerésére. Azaz, egy ilyen érzékelő képes „ujjlenyomatot venni” valamely detektálni kívánt gázzal/gőzzel, majd a továbbiakban azonosítani annak jelenlétét a környezetben.

Csoportunk a kísérletezést a hazai és nemzetközi együttműködésekkel, valamint a saját előállítású szén nanocsövek vizsgálatával kezdte. Számos, különböző módszerrel készített és eltérő kémiai kezelésnek alávetett minta ellenállás-változását vizsgáltuk különféle gőzök, gázok jelenlétében. Célunk az volt, hogy megtaláljuk azokat az előállítási módszereket és kémiai kezeléseket, melyek segítségével az előre kiválasztott gőzökre szelektíven érzékeny nanocsövek állíthatók elő. A különböző gázok/gőzök szelektív érzékelése akkor valósítható meg, ha a felhasznált nanocsövek tulajdonságai (geometriájuk, elektromos tulajdonságaik, szerkezetbe épült hibák száma, a felülethez kapcsolt molekulák típusa és száma) különböznek. A vizsgált minták között volt egy- és többfalú szén nanocső, elektromos ívkisüléssel és szénhidrogének katalitikus bontásával előállított nanocső, kémiaiilag módosított és módosított nanocső is. Az egy- és többfalú szén nanocsövek a geometriai eltérések mellett elektromos szempontból is eltérően viselkednek. Mivel a vezetést többfalú szén nanocsövek esetén az egymásba épülő csövek közül elsősorban a külső, legnagyobb átmérőjű cső a felelős, és a félvezető csövek tiltott sávjának szélessége fordítottan arányos a nanocső átmérőjével, az általunk használt többfalú nanocsövek szobahőmérsékleten fémesen vezetnek. Ezzel szemben az egyfalú nanocsövek kétharmada félvezetőként viselkedik. Az elektromos ívkisüléssel előállított nanocsövek közel ideális szerkezetével szemben a szénhidrogének katalitikus bontásával előállított nanocsövek sok szerkezeti hibát tartalmaznak. A hibák jelenléte előnyös lehet, mert kapcsolódási pontot jelentenek a nanocsövek környezetében található gázok/gőzök számára. Kémiai kezelésekkal a nanocsövek felületéhez kovalens kötással kapcsolt molekulák – funkciós csoportok – jelentősen módosíthatják a nanocsövek elektromos tulajdonságait [12]. Ez lehetőséget ad az adott alkalmazásnak legjobban megfelelő elektromos tulajdonságú szén nanocsövek előállítására, és várhatóan rendkívüli módon kiterjeszti azoknak az anyagoknak a körét, amelyek kimutathatóak szén nanocső alapú gázérzékelőkkel. Két funkcionizált nanocsőcsaládot vizsgáltunk. Az első mintacsalád golyósmalomban, reaktív gázban végzett őrléssel készült. Ebben az esetben a malom által létrehozott szabad kötésekhez kapcsolódtak a gázatomok [13]. Az őrlés során csökken a nanocsövek átlagos hosszúsága és a



3. ábra. A mérőberendezés elvi vázlata

hibahelyekhez „szigetesen” kapcsolódnak funkciós csoportok. Egy golyósmalomban funkcionális szén nanocső pásztázó alagútmikroszkópos (STM) képe a 2.a ábrán látható. A második mintacsalád esetén egy savas kezelés szakította fel a C–C kötések egy részét, és biztosított kapcsolódási pontot a funkciós csoportok számára a következő kezelések során [12]. Ezzel a módszerrel több kapcsolódási pontot lehet létrehozni a nanocsövek felületén, mint őrléssel. Jól megválasztott kezelés esetén a „szigetek” összeérnek és a nanocső felületét folytonos funkciós csoport réteg borítja [14]. Egy folytonosan funkcionális szén nanocsőről készült STM kép látható a 2.b ábrán. A funkcionális nanocsöveket Kiricsi Imre professzor csoportja készítette a Szegedi Tudományegyetem Alkalmazott és Környezeti Kémiai Tanszékén.

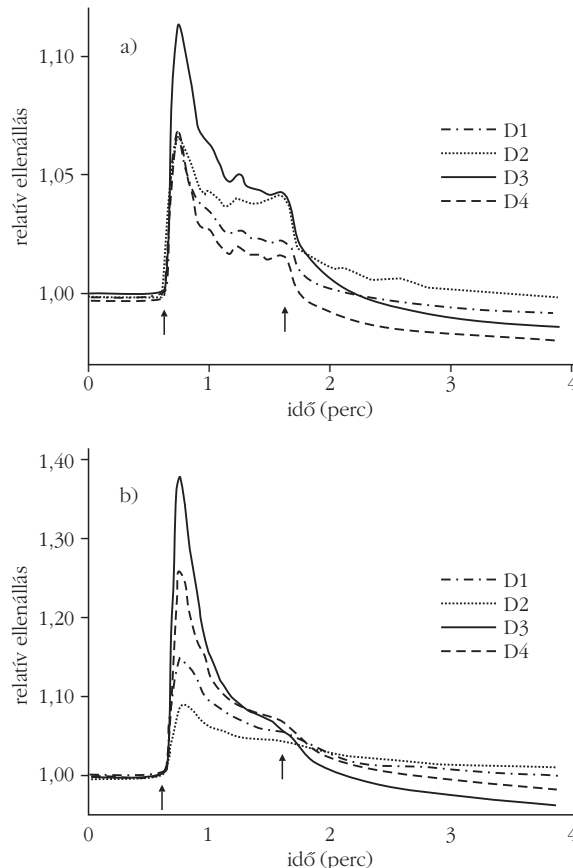
Makroszkopikusan a szén nanocsövek fekete, vattaszerű anyagként jelennek meg, kivételt képeznek azok az esetek, amikor a fizikai, kémiai hatások (tisztítás, funkcionálás stb.) hatására a nanocsövek „göröngyökké” állnak össze. A nanocsövek elhelyezése a kívánt helyre fontos és gyakran nehéz feladat. A leggyakrabban alkalmazott és egyben legegyszerűbb módszer az, ha valamilyen illékony szerves oldószerben (alkohol, toluol, aceton stb.) ultrahangos rázással megfelelő koncentrációjú szuszpenziót hozunk létre a szén nanocsövekből. A gázérzékelőket etanolos nanocső-szuszpenzió ellenőrzött ülepítésével állítottuk elő.

Igyekeztünk olyan tesztfeltételeket alkalmazni, amelyek a lehetőségek szerint minél inkább közelítik a valós munkakörülményeket. Tekintettel arra, hogy a kifejlesztett érzékelők legvalószínűbb munkaközege a levegő, a méréseket szobalevegőn végeztük. A gázérzékelést nanocsőhálózatok elektromos ellenállásának folyamatos mérésével valósítottuk meg. A nanocsövek felületére, illetve az ezen a felületen lehorgonyzott funkciós csoportokra fizissorbeált molekulák hatására megjelenő ellenállás-változást követtük figyelemmel. A detektorokat mérőkamrában helyeztük el, és membránszivattyú segítségével áramoltattuk át a szoba levegőjét, illetve a mérendő gázt/gőzt is tartalmazó szobalevegőt (3. ábra). A detektorok ellenállását egy erre a célra tervezett és megépített elektronika és LabView felületre írt saját szoftver értékelte ki. Lehetőség van arra, hogy párhuzamosan több

csatornán mérjünk, és így azonos körülmények között vizsgáljuk különböző nanocsőhálózatok viselkedését. A detektorokat áramgenerátorral hajtottuk meg és mértük a feszültségesést, így kiszámítható a detektor ellenállása. Mivel a mérendő nanocsőrétegek ellenállása a különböző előállítási módszerek és kémiai kezelések miatt több nagyságrenddel is eltérhet, az elektronikát úgy kellett kialakítani, hogy többféle, 1, 10 vagy 100 μA értékű áramot kapcsolhassunk minden vizsgált detektorra. A jeleket egy 12 bites analóg/digitális mintavevő kártya segítségével számítógépen dolgozzuk fel. A méréshez kifejlesztett szoftver képes valós időben feldolgozni és grafikus felületen megjeleníteni a mért adatokat.

Tapasztalataink szerint szinte minden nanocsőminta reagált szinte minden gőzre, de nagyon eltérő mértékben. Egy előzetes felmérés után kiválasztottunk 25 különböző mintát, melyek egymástól eltérő módon reagáltak a kiválasztott gőzökre, majd ezek stabilitását és ellenállás-változását részletesen vizsgáltuk etanol, aceton, toluol, víz, pentán, benzin, xilol, triklór-etilén, butilacetát, ecetsavoldat, ammónia és kloroformgőz jelenlétében. A mérés folyamán állandó sebességgel áramoltattunk levegőt vagy levegő–gőz keveréket az érzékelő fölé. A mérés kezdetekor szobalevegőt áramoltattunk és elektronikusan normáltuk az ellenállások értékét. A normálás segítségével kiküszöböltük a levegő hőmérséklet- és páratartalom-változása miatt megjelenő lassú ellenállás-változást. Egy perc után kicseréltük a levegőt a mérendő gőz és levegő keveréké-

4. ábra. Kiválasztott detektorok ellenállás-változása a) etanol és b) aceton esetén.



re, majd újabb egy perc elteltével ismét visszakapcsoltuk a szoba levegőjét. Négy kiválasztott detektor ellenállás-változása etanol és acetone esetén a 4. ábrán látható. D1 és D4 SHCH_3 , illetve Cl_2 légkörben tört, katalitikus bontással előállított többfalú szén nanocsövet; D2 elektromos ívkisüléssel előállított egyfalú nanocsövet; D3 pedig elektromos ívkisüléssel víz alatt előállított többfalú nanocsövet jelöl. A görbék alakját a vizsgált gőz abszorpciója és deszorpciója határozza meg, de a korábban vizsgált gőz deszorpciója miatt megjelenő lassú ellenállás-csökkenés is látható. A mérések előtt szobahőmérsékleten, 1 liter térfogatú edényben állítottuk elő a vizsgált folyadék telített gőzét, majd ezt a gőzt szívtuk a detektorra. A szívás eredményeként levegő áramlik a gőz helyére, ezért a mérés alatt csökken a vizsgált gőz koncentrációja, ami a detektor ellenállásának csökkenéséhez vezet.

Jól megválasztott, párhuzamosan működő detektor-sorozat esetén a különböző gázokra különböző relatív ellenállás-változás kombinációt kapunk. Ha a mérésvezérlő elektronikát ismert gőzök felhasználásával „betanítjuk” (kalibráljuk, azaz „ujjlenyomatot” veszünk), akkor az elektronika képes lesz arra, hogy a detektor-sorozat ellenállásainak változásából azonosítsa az ismeretlen gőzt. A tipikus felismerési idő a 20–30 másodperc tartományban van, ami igen jelentős előnye a szén nanocső alapú detektoroknak a klasszikus detektorok jóval hosszabb válaszidejével szemben.

Összefoglalás

Megvizsgáltuk több, eltérő tulajdonságú szén nanocső-hálózat elektromos ellenállását különböző gőz/levegő keverék jelenléte esetén és kiválasztottuk azokat a nanocsöveket melyek egymástól eltérő módon reagáltak a vizsgált gőzökre. Több nanocsődetektor egyidejű vizsgálatával azonosítható a készülékbe vezetett gőz, azaz sikerült szén nanocső-érzékelővel működő „mesterséges orr” prototípusát létrehozni.

A tárgyalt témákkal kapcsolatos további anyagok találhatók az MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet Nanoszerkezetek Osztály honlapján: <http://www.mfa.kfki.hu/int/nano/> és <http://www.nanotechnology.hu>

Irodalom

1. KÓNYA Z., BIRÓ L.P., HERNÁDI K., NAGY J.B., KIRICSI I.: *Szén nanocsövek előállítása, tulajdonságai és alkalmazási lehetőségei* – A Kémia Újabb Eredményei, 90. kötet, Akadémiai Kiadó, Budapest, 2001.
2. M.S. DRESSSELHAUS, G. DRESSSELHAUS, PH. AVOURIS: *Carbon nanotubes, synthesis, structure, properties, and applications* – Springer-Verlag Berlin–Heidelberg, 2001.
3. KÜRTI J.: *A varázslatos szénatom* – Fizikai Szemle 47/7 (1997) 276
4. M.S. DRESSSELHAUS, G. DRESSSELHAUS, R. SAITO: *Physics of carbon nanotubes* – Carbon 33 (1995) 883–891
5. BIRÓ L. P.: *Nanovilág: A szén nanocsőtől a kék lepkeszárnyig* – Fizikai Szemle 53/11 (2003) 385
6. S. HEINZE, J. TERSOFF, R. MARTEL, V. DERYCKE, J. APPENZELLER, PH. AVOURIS: *Carbon nanotubes as Schottky barrier transistors* – Phys. Rev. Lett. 89 (2002) 106801
7. Y. ANDO, X. ZHAO, H. SHIMOYAMA, G. SAKAI, K. KANETO: *Physical properties of multiwalled carbon nanotubes* – Int. J. Inorg. Mat. 1 (1999) 77–82
8. J. KONG, N.R. FRANKLIN, C. ZHOU, M.G. CHAPLINE, S. PENG, K. CHO, H. DAI: *Nanotube molecular wires as chemical sensors* – Science 287 (2000) 622–625
9. A. PECCHIA, M. GHEORGHE, A. DI CARLO, P. LUGLI: *Modulation of the electronic transport properties of carbon nanotubes with adsorbed molecules* – Synth. Metals 138 (2003) 89–93
10. C. CANTALINI, L. VALENTINI, I. ARMENTANO, L. LOZZI, J.M. KENNY, S. SANTUCCI: *Sensitivity to NO_2 and cross-sensitivity analysis to NH_3 , ethanol and humidity of carbon nanotubes thin film prepared by PECVD* – Sensors and Actuators B 95 (2003) 195–202
11. F. PICAUD, R. LANGLET, M. ARAB, M. DEVEL, C. GIRARDET, S. NATARAJAN, S. CHOPRA, A.M. RAO: *Gas-induced variation in the dielectric properties of carbon nanotube bundles for selective sensing* – J. Appl. Phys. 97 (2005) 114316
12. I. KIRICSI, Z. KÓNYA, K. NIESZ, A.A. KOÓS, L.P. BIRÓ: *Synthesis procedures for production of carbon nanotube junctions* – Proceeding of SPIE 5118 (2003) 280–287
13. Z. KÓNYA, I. VESSELENYI, K. NIESZ, A. KUKOVECZ, A. DEMORTIER, A. FONSECA, J. DELHALLE, Z. MEKHALIF, J. B. NAGY, A.A. KOÓS, Z. OSVÁTH, A. KOCSONYA, L.P. BIRÓ, I. KIRICSI: *Large scale production of short functionalized carbon nanotubes* – Chemical Physics Letters 360 (2002) 429–435
14. A.A. KOÓS, Z.E. HORVÁTH, Z. OSVÁTH, L. TAPASZTÓ, K. NIESZ, Z. KÓNYA, I. KIRICSI, N. GROBERT, M. RÜHLE, L.P. BIRÓ: *STM investigation of carbon nanotubes connected by functional groups* – Materials Science and Engineering C 23 (2003) 1007–1011

BESZÉLGETÉS TELEGDI BÁLINTTAL

(1922. január 11., Budapest – 2006. április 8., Pasadena, Kalifornia)

Hargittai Magdolna

MTA–ELTE, Szerkezeti Kémiai Kutatócsoport

Telegdi Bálint fizikus a Magyar Tudományos Akadémia tiszteleti tagja (1990). A Chicagói Egyetemen volt „Enrico Fermi professzor”, a Zürichi Műegyetemen (ETH) emeritus professzor, élete utolsó éveit részben a genfi CERN-ben, részben a Kaliforniai Műegyetemen (Caltech) töltötte. A fizikai Wolf-díjat 1991-ben kapta meg *Maurice Goldhaber*-rel megosztva. Tagja volt többek között az USA Nemzeti Tudományos Akadémiájának, a londoni Royal Society-nak, az Academia Europaea-nak, a Királyi Svéd Tudományos Akadémiának és az Orosz Tudományos Akadémiának.

Elsősorban kísérleti fizikus volt, de írt elméleti fizikai cikkeket is. Legfőbb eredményei között említeni kell a következőket. A müonbomlásban az elsők között bizonyította kollégájával, *Jerome Friedmann*-nal, a paritásértést. Egy másik kísérlete a „g-2” kísérlet, amit a CERN-ben végzett, *Richard Garwin*-nal együtt. Ezzel a kísérlettel meghatározták a müon mágneses tulajdonságait és bebizonyították, hogy a müon nem más, mint egy nehéz elektron. A müon más tulajdonságainak meghatározásában is alapvető eredményeket ért el. Fontos eredményé-

nek tartotta a neutronbomlással kapcsolatos munkáját, a müonneutrínó helicitásával kapcsolatosat (az utóbbi munkát *Grenács László*val közösen végezte), valamint a müonbefogás spinfüggését. Végül egy tisztán elméleti cikkére is büszke volt, amely a spin mozgásáról szólt elektromágneses térben; ennek alapján nevezték el a Bargmann–Michel–Telegdi-egyenletet.

Telegdi Bálinttal pár évvel ezelőtt felvettem egy beszélgetést híres fizikusokkal foglalkozó könyvünkhöz [1]. Az alábbiakban ebből az interjúból közlök részleteket.

– *Kérem, mondjon valamit családi hátteréről.*

– Budapesten születtem 1922-ben. Szüleim mindketten magyarok voltak, apám Pécsről, anyám pedig Békéscsabáról származott. Apámat nagyon vonzotta a *Nyugat* mozgalom, így, amint elvégezte tanulmányait, 1914-ben Párizsba ment. Néhány hónappal később, mint ellenséges idegen állampolgárt más magyarokkal együtt internálták, erről könyvet is írtak, *Fekete Kolostor* címmel [2]. Öt évig volt ott, 1919-ben jött vissza. Elég zavaros idők voltak akkor Magyarországon, és egy ideig mint fordító dolgozott. Különleges tehetsége volt a nyelvekhez. Egy idő múlva úgy döntött, hogy elhagyja az országot. De addigra Európában bevezették az útlevelet és a vízumot, amit majdnem lehetetlen volt beszerezni. Egyetlen olyan ország volt, amely annyira elmaradt volt, hogy talán még nem is hallott a vízum létezéséről, Bulgária. Így apám oda ment, és egy szállítási vállalatnál helyezkedett el. 1921-ben visszajött Magyarországra, megházasodott, majd rövid idő után visszatért Bulgáriába. Így életem első éveit Bulgáriában töltöttem. Ezután Romániába költöztünk, ahol apám a Duna-deltában egy hajózási vállalatnál dolgozott. Nagyjából egy évvel később visszaköltöztünk Budapestre, akkor kezdtem elemi iskolába járni. Két évet töltöttünk Budapesten – ez volt az egyetlen folyamatos időszak az életemben, amit szülőházamban töltöttem. Ezután apám Bécsben kapott állást, így odaköltöztünk. Néhány évvel később a szüleim Milánóba költöztek, de engem Bécsben hagytak, hogy ott folytassam az iskolát. Nagyon szerettem azt az iskolát, sok szép emlék fűz hozzá.

1938-ban Németország elfoglalta Ausztriát, ezért a húsvéti szünetre a szüleimhez mentem Milánóba, és utána már nem tértem vissza Bécsbe. Megtanultam olaszul, de egy évvel később apám Belgiumba küldött, hogy ott folytassam tanulmányaimat.

– *Miért éppen Belgiumba?*

– Eredetileg Angliába akart küldeni és szerzett is különböző bentlakásos iskoláktól katalógusokat. Azokban igen furcsa dolgokat olvasott (ne feledjük el, hogy az 1938–39-es évekről beszélünk), például ilyesmit: „Elsőéveseknek nem engedélyezzük, hogy saját autójuk legyen.” Apámnak persze soha nem volt autója, így nem igazán izgatta az, hogy nekem lehet-e vagy sem. Viszont azt a következtetést vonta le, hogy ezek az iskolák nem lennének jók nekem. Útban hazafelé találkozott egy belga üzletemberrel, aki azt tanácsolta neki, küldjön Belgiumba, ott eleve olcsóbbak az iskolák, mint Angliában. Apám úgy döntött, hogy megpróbálja. Elmentünk a milánói belga konzulhoz, aki azt mondta: az egyik előfeltétele annak, hogy nálunk járhasson a fia iskolába az, hogy

egyik nemzeti nyelvünket beszélje. Az ön fia egyiket sem beszél. Erre apám a maga csodálatos franciatudásával a következőt válaszolta: „Monsieur le Consul, ha a fiam beszélne franciául, miért küldeném Belgiumba?” Így kerültem oda. Az elején nagyon nehéz volt, de három hónap alatt megtanultam a nyelvet.

Belgiumban vegyészmérnöknek tanultam. Ott-tartózkodásom idején másodszor történt meg velem, hogy a németek elfoglalták azt az országot, ahol éltem. 18 éves voltam és úgy gondoltam, hogy biztonságosabb lesz, ha elmegyek Olaszországba. Ez 1940 júniusában volt, amikor Olaszország még nem volt benne a háborúban, így egy csoport olasszal sikerült kijutnom Belgiumból. Az olaszok nem törődtek olyan apró részlettel, hogy olasz állampolgár voltam-e vagy sem. Így érkeztem magyar útlevéllal Olaszországba 1940. június 10-én, azon a napon, amikor Olaszország belépett a háborúba. Egy nappal később ezt már nem tehettem volna meg. Egy idő után apám Svájcba ment, én meg anyámmal Milánóban maradtam, ahol fordításokból éltem. Három évig dolgoztam egy szabadalmi ügyvédnek – ezek életem fontos éveit voltak. Végül a németek Olaszországot is elfoglalták, és újra menekülnöm kellett. Sikerült illegális úton Svájcba mennünk, ahol más menekültekkel együtt először internáltak, de úgy három hónap múlva elengedtek minket apámhoz, aki akkor Lausanne-ban élt. 1944-ben elkezdtem az ottani Műegyetemre járni, ott kaptam diplomát 1946-ban.

Úgy gondoltam, hogy matematikából és fizikából többet kellene tanulnom, ezért a zürichi ETH-ra szerettem volna menni, ahova először nem vettek fel, de aztán mégis sikerült, 1946 októberében az ETH fizika tanszékére kerültem. Eleinte az volt a feladatom, hogy kémiai kísérleteket végezzenek fizikusoknak: radioaktív anyagokat kellett elválasztanom. Hozzá kell tennem, hogy az ETH fizikusai a vegyszereket az emberiség alacsonyabb rendű teremtményeinek tekintették. Egy idő után észrevették, hogy olyasmit is csináltam, amit eddig még nem láttak kémikusoktól: megoldottam a különböző fizikafeladatokat, amelyeket a diákoknak készítettek. Ez után lehetővé tették, hogy a fizika oktatásában segítsek. Egyben komolyan elkezdtem dolgozni a Ph.D. témámon is, amit 1950-ben fejeztem be.

– *Hogy jutott Amerikába?*

– Ez egy híres amerikai professzor, *Victor Weisskopf* segítségével történt. Ott volt látogatóban, és én megkérdeztem tőle, hogy nem tudna-e állást találni nekem az MIT-n. Weisskopf megígérte, hogy utánanéz, majd néhány hónappal később a következőt írta: sajnos, nincs hely az MIT-n, de ehelyett beajánlottam *Ferminek* a Chicagói Egyetemen. Így kerültem a Chicagói Egyetemre, ami abban az időben, röviddel a háború után, valószínűleg a legkiválóbb hely volt a világon fizikában. Ott volt *Fermi*, *Teller*, *Szilárd*, *Gell-Mann*, *Feynman* és sokan mások. Mindig is a „fizika Mekkájának” neveztem Chicagót, fantasztikus hely volt.

– *Mivel kezdett ott foglalkozni?*

– Röviddel megérkezésem előtt készült el Chicagóban a második ciklotron, ez valójában „Fermié volt”. Abban az időben ez volt az avantgárd dolog. Volt nekik egy másik,



régebbi gyorsítójuk is, a Betatron, amit az új megérkezése után már senki nem használt. Ezért úgy döntöttem, hogy én használok azt, és a többiek még örültek is, hogy legalább valaki használja az öreg gyorsítót. Ezen azt a munkát folytattam, amelyet korábban Zürichben csináltam. Ez ment egy évig, de azután én is a másikra álltam át.

Eredetileg Ferminék és kollégáinak az új ciklotronnal az volt a fő céljuk, hogy a pionokat vizsgálják. A pionok képződése közben, mintegy melléktermékként, müonok (tulajdonképpen nehéz elektronok) is képződtek a gyorsítóban, de ezek senkit sem érdekeltek. Ezért úgy döntöttem, hogy ezekkel a feleslegesnek tekintett részecskékkal fogok foglalkozni, és valóban ez is történt a következő 15 év folyamán. A nevem azóta is kötődik a müonokhoz; egy időben az amerikai kollégáim egyszerűen csak „Mr. Müonnak” neveztek.

– *Kezdünk közel kerülni a paritássértés felfedezéséhez. Lee és Yang jöttek elő azzal a gondolattal, hogy míg a paritásmegmaradás érvényes az elektromágneses és az erős kölcsönhatásban, valamint a gravitációban, elképzelhető, hogy a gyenge kölcsönhatásban ez nem így van. Kísérleteket is javasoltak, például azt, amit Madame Wu csinált a bétabomlással...*

– Semmi sem dühít fel jobban, mint amikor valaki úgy hivatkozik erre a kísérletre, mint „Madame Wu kísérlete”!! El tudnám mondani magának, hogy valójában hogy is történt ez.

– *Épp erre akartam kérni!*

– OK, szóval tényleg ezt akarja hallani? Persze, órákig tartana mindent elmesélni, de egy rövid verziót azért elmondok. Először is, a mi kísérletünk triviális volt. Majdnem zavarbaejtően egyszerű és bárki megcsinálhatta volna. Ami nem volt egyszerű az az volt, hogy eldöntsük, érdemes-e megcsinálni vagy sem. A legtöbb elméleti ember azt mondta, hogy az egész tiszta időpocsékolás lenne. Még Lee és Yang sem volt biztos abban, hogy egyáltalán igaz-e az egész feltevés, a paritássértés csak egy volt több lehetőség közül, amit vizsgáltak. Amit ők tettek, az csodálatos volt: felvetették, hogy mind azt hisszük, a tü-

körszimmetria érvényes a paritásban is, pedig valójában ezt még soha senki nem ellenőrizte kísérletekkel. Az általuk javasolt egyik kísérlet a sorba állított, polarizált magok által kibocsátott elektronok szimmetriájára vonatkozott. Ez az a kísérlet, amelyre maga és az emberiség többi része úgy hivatkozik, mint a „Wu-kísérlet”. Ez nagyon romantikus, de sajnos nem igaz.

Ahhoz, hogy ezt a kísérletet el lehessen végezni, sorba kell állítani a magokat, ami 1956-ban igazi művészet volt és a világon csak néhány ember volt képes ezt megtenni. Egyikük volt *Amber*, akit, kollégáival együtt éppen azért hívott el a National Bureau of Standards Oxfordból, mert ez a monopólium a kezükben volt. Ms. Wunak szüksége volt valakire, aki tudja, hogy állítsa sorba a magokat; az ő specialitása a radioaktivitás volt, ő tudta, hogyan számolja meg azokat a bétarészecskéket, amelyek kijönnek a kísérlet végén, de a magok beállításáról, ami a kísérlet döntő része volt, semmit sem tudott. Ezért aztán az, hogy egyedül neki tulajdonítják a kísérlet sikerét egyszerűen disznóság!

– *Miért javasolta akkor Lee éppen neki, hogy csinálja meg?*

– Lee az egész világnak javasolta, nem csak neki. Ott volt a cikkükben [3]. Persze, mindketten a Columbia Egyetemen voltak, meg aztán Wu a bétabomlás specialista volt. Lee azt is megmondta Wunak, hogy melyik magot vizsgálja, hiszen nem minden mag lett volna egyformán alkalmas. De Wu csak néha ment le Washingtonba, ahol a kísérlet folyt, és olyankor eltöltött ott pár napot – de ezért azt a kísérletet „Wu kísérletnek” nevezni enyhén szólva túlzás. Legalább azt tennék, hogy a csoport minden tagjának egyformán tulajdonítanak az eredményt. Az sem ártott volna, ha névsor szerint szerepeltek volna a szerzők a cikkben [4].

– *De hiszen mindnyájan szerepeltek a cikkben!*

– Az igaz, de Wu a maga nevét tette előre, holott az W-vel kezdődött. A többiek, angol úriemberek lévén, nem tiltakoztak. Az is igaz, hogy végül Amber karriert csinált magának ebből a dologból, hiszen ő lett később a National Bureau of Standards igazgatója.

Egyébként Lee és Yang egy másik kísérletet is javasoltak. Amikor egy pion bomlik müonra, a müon polarizálódik, vagyis a repülés irányában forogva jelenik meg. Az volt az ötlet, hogy ha ezt tudnánk igazolni, ezzel is be tudnánk bizonyítani a paritássértést. Ez az a kísérlet, amit Jerry Friedman és én csináltunk. Nukleáris emulziókkal dolgoztunk, amelyekben jól látszik a részecskék útja, úgy, mint a lábnyomok a homokban. Először a pionok kerülnek az emulzióba, ott leállnak, aztán elbomlanak müonokká, amelyek újabb nyomot hagynak az emulzióban, mintegy fél milliméter hosszút. Ezután a müonok tovább bomlanak elektronokká. Ennek a bomlásnak a szimmetriáját vizsgáltuk és megállapítottuk, hogy az elektronok aszimmetrikus módon jelennek meg, ami azt mutatja, hogy a müonok valóban polarizálódtak. Sajnos, időt veszítettünk, mert éppen akkor halt meg apám, ezért Európába kellett jönnöm és Friedmant magára kellett hagynom. Közben *Garwin* és *Lederman* egy hasonló kísérletet csinált a Columbia Egyetemen [5]. Az én utazásom miatt sajnos a mi cikkünk pár nappal később jutott

el a folyóirathoz, mint az övék [6]. Ezért vetődött fel a prioritás kérdése. Az igazán izgalmas kérdés persze az volt, hogy legtöbbször úgy gondolták, a paritásértés teljesen örült ötlet, ez sohasem következhet be, vagy, ha be is következne, az effektus olyan kicsi lenne, hogy azt nem lehetne kísérletileg kimutatni. Az én eredeti meggyőződése az volt, hogy ha a paritásértés valóban létezik, ahogy Lee és Yang feltételezi, akkor ez igenis nagy effektus lenne, ezért igenis érdemes a kísérletet elvégezni, hogy megbizonyosodjunk róla. Ezért, amikor az emberek azt mondták, hogy csak pocskolom az időmet, azt válaszoltam, rendben van, megengedhetem magamnak, hogy elpocskoljak erre pár hónapot az életemből. A fontos döntés az volt, hogy meg kell csinálni a kísérletet és nem az, hogy hogyan.

– *Lederman azt mondja, hogy ők a kísérletüket egy hétvége alatt csinálták meg.*

– Így van.

– *Alapvetően ugyanaz volt, mint az Önöké?*

– Igen. Az egyetlen különbség az volt, hogy ők elektronikusan mértek. Úgy alakult, hogy ott volt egy készülék, amit Lederman egyik diákja épített valami más célra, de a lényeg, hogy ott volt és egyből használni lehetett. Csak egy tekercset kellett csinálniuk. De annak a kísérletnek minden briliáns ötlete Richard Garwintól származik, aki mellesleg szintén magyar származású.

– *Ők jóval később csinálták ezt a kísérletet, mint Önök a magukét.*

– Sokkal később.

– *Hallottak közben az Önök kísérletéről?*

– Fogalmam sincs. Csak azt tudom, hogy Lee már egy ideje próbálta rábeszélni Ledermant, hogy csinálja meg, de ő nem tudta, hogyan. Aztán egy ebéd közben Dick Garwin meghallotta ezt, és egyből elmondta nekik, hogy kellene csinálni és meg is csinálták egy éjszaka alatt. De a lényeg az, és erről nem igazán lehet az irodalomban olvasni, hogy amikor Garwin és Lederman ezt a kísérletet csinálta, már tudták a washingtoni kobalt-60 kísérlet előzetes eredményeit. Addigra ők már tudták, hogy a paritásértés megvalósul. Állítólag meg is próbálták még Ms. Wu előtt publikálni az eredményeiket, de ezt nem hagyták.

– *Kik?*

– A kollégáik. Az már tényleg túlzás lett volna. Lederman nem túl etikus ember. Például megpróbált bennünket is diszkreditálni azzal, hogy azt mondta, csaltunk, hogy az eredményeink nem is valódiak!

– *Miért tett volna ilyet?*

– Hogy ne tudjuk publikálni őket.

– *Honnan tudott a kísérletükről?*

– Én hívtam fel Garwint telefonon és elmondtam neki. Mondtam, hogy hallottam, hogy ők megcsinálták ezt a munkát, mi is megcsináltuk, szóval mi az eredményetek? Garwin azt mondta: Mi a tiétek, előbb te mondd meg! Úgyhogy én megmondtam, és ő azt válaszolta, rendben van.

– *Látom, van bizonyos feszültség Ön és Lederman között.*

– Természetesen.

– *Valaha is beszéltek erről?*

– Nem hiszem. Viszont írt egy rémes könyvet, *God Particle* címmel [7], amelynek olvasása után nagyon dühös levelet írtam neki. Ebben többek között azt írtam: „Ez a könyv annyi félremagyarázást tartalmaz, amit még egy iraki diplomatától sem várnánk.” Soha nem válaszolt.

– *Melyik munkájára emlékszik legszívesebben?*

– Ez olyan, mintha azt kérdezné, hogy ki a legszebb nő, akit valaha láttam. Határozottan nem a paritásértés kísérlet. Általában azokat a kísérleteket szeretem, amelyekben van valami ügyesség, leleményesség, amelyekről nem nyilvánvaló, hogyan kell elvégezni. Az a kísérlet nyilvánvaló volt, ha mi nem csináltuk volna meg, más megcsinálta volna. Ilyen szempontból a Garwin–Lederman-kísérlet érdekesebb volt, kimondottan ügyes ötlet.

Azt hiszem, hogy négy cikkemet említhetem meg. A legnagyobb hatása a neutronbomlással kapcsolatos munkáknak volt. Egy másik a müon-neutrínó helicitásával foglalkozott; ez ugyanaz a kísérlet, amit Goldhaber és kollégái csináltak az elektronnal, csak mi a müon-neutrínóval csináltuk meg. Végül egy tisztán elméleti cikket kell említenem, amely a spin elektromágneses térben történő mozgásáról szól és amelynek komoly visszhangja és hatása volt [8].

– *Mi a véleménye a kísérleti és elméleti részecskefizikusok kapcsolatáról?*

– Nem lehet erre abszolút választ adni, függ a helytől és időtől. Vannak olyan helyek, ahol jó a kapcsolat kísérlet és elmélet között. Ez például az Egyesült Államok jelentős részében így van, de persze nem mindenütt. Vannak olyan elméleti emberek, akik semmi hasznos munkát nem tudnak végezni, ha nincs valami megdöbbentő kísérleti eredmény, vannak emberek, akiknek a gondolkodását ösztönzik a kísérletek által felvetett kérdések. Persze, olyanok is vannak, akik éppen fordítva, maguk találhatnak ki kérdéseket, és ezzel a kísérleteket ösztönzik, mint például a korábban említett Lee és Yang. Az európai fizikusok sokkal inkább matematikailag orientáltak, mint az angolszászok, az utóbbiak sokkal inkább pragmatikusak. Érdekes szociológiai kérdés, hogy miért Amerikában fedezték fel a paritásértést és nem Európában. Európában is megtörténhetett volna, gondoljunk csak azokra az angolokra, akik Oxfordból a Bureau of Standardhoz mentek. Két olyan laboratórium van Európában, ahol a magok rendezésének nagyapjai éltek, az egyik Leiden Hollandiában, a másik Oxford Angliában. Mégsem ezeken a helyeken fedezték fel a paritásértést. Nem igazán tudom, hogy miért. Oxfordban, azt hiszem, az volt a baj, hogy az ottani elméleti kutatók nem hittek a paritásértésben, úgy gondolták, túl furcsa ötlet és nem valószínű. Ezt tudom, hogy így volt. Hollandiában más problémák voltak. Ott is volt egy nagyon erős laboratórium, de azt hiszem, azok sem tettek túl sokat azért, hogy ezt a kérdést megoldják.

– *Milyen a kapcsolata az elméleti fizikusokkal?*

– Nagyon jó, legalábbis egy csoportjukkal. De itt is van egy probléma. Nagyon kevés olyan elméleti fizikus van, aki megért egy kísérletet. Néhány igazán nagynevű elméleti ember értette, más ugyancsak híres fizikusok viszont nem. Mondok két példát. Feynman tökéletesen

megértette a kísérleteket. Csak ránézett egy kísérleti cikkre és egyből észrevett olyan hibaforrásokat, amelyeket a kísérletet végzők nem vettek figyelembe. Ugyanakkor *Pauli* egy percet sem szánt volna arra, hogy kísérleti cikket olvasson, nem értette őket. Sok elméleti ember egyszerűen úgy gondolja, hogy nem is próbálja meg. Persze, ugyanez érvényes a kísérleti emberekre, akik közül sokan nem hajlandók bizonyos mennyiségű matematikát megtanulni, mert feleslegesnek érzik azt. Én magam nagyon szeretem az elméletet és több elméleti cikket is írtam. Ugyan a matematikai tudásom nem túl jó, de tudok bizonyos elméleti fizikai kérdésekről gondolkodni, ezért aztán az elméleti cikkeimet általában valaki mással együtt írtam. Általában az ötlet az enyém volt, de a technikai megoldáshoz már nem volt elég jó a matematikai tudásom.

– *Amikor a részecskefizika jövőjéről beszélünk, mit lát: egyre nagyobb és nagyobb gyorsítókat, vagy több föld alatti detektort?*

– Szerintem mindkettőre szükség van. Épp a legutóbbi Nobel-díj nyertesei, egy japán és egy amerikai foglalkoznak rendkívül izgalmas föld alatti kísérletekkel.¹ Ezekkel a kísérletekkel az a baj, hogy a források felett nincs semmi kontrollunk. Ha, mondjuk, másodpercenként száz neutrínó érkezik, akkor nem lehet mást tenni, mint nagyobb detektorokat építeni, mivel a bejövő fluxus adott. Viszont az is igaz, hogy az elmúlt húsz évben sokkal többet tudtunk meg a Világegyetemről, mint a részecskékről. Ma már láthatjuk az eget röntgensugarakkal, ami teljesen új dolog. Szerintem az asztrofizika állapota ma olyan, mint a részecskefizikáé volt az 1960-as években; óriási a fejlődés. De ezek a kutatások is hatalmas vállalkozásokban folynak, így azoknak, akik kísérleteket akarnak végezni, néha három-négy évet is várniuk kell, mielőtt a készülékeiket eljuttathatják az űrbe.

Valójában gondom van azzal, ahogy a kísérleti fizikát manapság űzik: a stílusa sokak számára nem feltétlenül vonzó. Ha ma lennék fiatal, valószínűleg nem lennék részecskefizikus, nem szeretnék 500–1000 embert magukba foglaló csoportokban dolgozni. Magam inkább olyan kézműves típus vagyok, szeretem a függetlenséget; ha lehetőségem lenne két kísérlet közül választani, azt választanám, amelyik nagyobb függetlenséget biztosít és nem azt, amelyik „fontosabb”. Szerencsés voltam egész életemben, soha nem volt főnököm, mindig azt csinálhattam, amit akartam.

– *Hogy látja a fizika jövőjét?*

– Úgy gondolom, hogy a következő tíz év további fantasztikus eredményeket fog produkálni a fizika és asztrológia határán. Több új eredményt látni, mint amennyi az elmúlt 100 évben született. Teljesen új technológiák fejlődnek ki, olyanok, amelyek igazi forradalommal érnek fel.

– *Lehetséges, hogy az új kozmológiai ismeretek következtében egy teljesen új fizika alakul ki?*

¹ A 2002. évi fizikai Nobel-díjat megosztva (a felét) kapták *Raymond Davis Jr.* és *Masatoshi Koshiba* az asztrofizikában elért kiemelkedő eredményeikért, különösen a kozmikus neutrínók detektálásáért, míg a másik felét *Riccardo Giacconi* kapta azokért a kiemelkedő asztrofizikai eredményeiért, amelyek a kozmikus röntgensugár forrásainak felfedezéséhez vezettek.

– Lehet, de nem feltétlenül. Az is lehetséges, hogy csak tökéletesíteni kell a már ismert fizikát anélkül, hogy annak alapjait megváltoztatnánk. Az általános relativitás elmélet, például, ma már nem tisztán akadémiai téma többé, sokkal inkább gyakorlati mérnöki kérdés. Ismeri a GPS-rendszert? Ez a General Positioning System, azok a térképek, amelyeket az autókba tehetünk, hogy menet közben segítsen a tájékozódásban. Ez a készülék a műholdakról kapja a hullámokat. Ha nem vennék az általános relativitást figyelembe, egyáltalán nem működne, vagyis a relativitáselmélet mára gyakorlati tudománnyá vált.

– *Mivel foglalkozik mostanában?*

– Hobbijaim soha nem voltak. A fizika volt a foglalkozásom és a hobbim is. Néha zenét hallgatok. Tíz évvel ezelőtt nyugdíjba mentem, de még ma is minden nap bemegyek a CERN-be; részt veszek a szemináriumokon, olvasom a folyóiratokat. Egy dolog hiányzik nagyon: a tanítás. Mindig is szerettem tanítani, és szerintem jól is csináltam. A tanítás sokkal jobban hiányzik, mint a kutatás. Amit még szeretek, az a fizika története, ezzel is foglalkozom.

– *Olvassa vagy ír róla?*

– Írtam cikkeket a fizika történetével kapcsolatban. Persze, ez egy tipikus öregkori elfoglaltság egy fizikus számára, de számomra jó mentség az, hogy már fiatal koromban is írtam erről. Szeretem a családfákat, például ki volt *Wigner* tanára, a tanár tanára stb. Kimondottan érdekelnek ezek az intellektuális kapcsolatok, látni, hogy ki honnan jön, és hasonlók. Néha konferenciákon az ember annyi badarságot hall, csupa olyan dolgot, ami nem igaz, és ez mindig mélységesen felháborít. Amíg valaki fizikusként dolgozik, általában komolyan csinálja és megpróbál önkritikus lenni. Sokszor, ha ezek a fizikusok a fizika történetéről írnak, elvesztik ezt a készségüket – és ez baj.

Visszagonoldva az életemre, mindig úgy tartottam, hogy egy kísérleti fizikusnak az a feladata, hogy a legpontosabb eredményeket érje el a legegyszerűbb és legolcsóbb módon. Nem szeretek ágyúval lőni verébre, még ha sokan ezt elegánsnak tartják is. Amikor 40 éves voltam, azt mondtam a feleségemnek: Az életem fő célja az volt, hogy tiszteljenek azok, akiket én is tiszteltek. Ezt a célt elértem és boldog vagyok. Sokan érzik azt, hogy nem kaptak elég elismerést a világtól, ezért keserűek. Én úgy érzem, hogy a világ több elismerést adott nekem, mint amennyit megérdemeltem, bennem nincs semmi keserűség. Elégedett vagyok az életemmel.

Irodalom

1. M. HARGITTAI, I. HARGITTAI: *Valentine Telegdi in Candid Science IV: Conversations with Famous Physicists* – Imperial College Press, London (2004) 160–191
2. KUNCZ ALADÁR: *Fekete Kolostor: Feljegyzések a francia internáltságból* – (Magyar elbeszélők) Szépirodalmi Könyvkiadó, Budapest, 1975.
3. T.D. LEE, C.N. YANG – *Phys. Rev.* 104 (1956) 254
4. C.S. WU, E. AMBLER, R.W. HAYWARD, D.D. HOPPES, R.P. HUDSON – *Phys. Rev.* 105 (1957) 1413
5. R.L. GARWIN, L. LEDERMAN, M. WEINRICH – *Phys. Rev.* 105 (1957) 1415
6. J.I. FRIEDMAN, V.L. TELEGGI – *Phys. Rev.* 105 (1957) 1681
7. L. LEDERMAN (with *Dick Teresi*): *The God Particle: If the Universe is the Answer what is the Question?* – Delta, New York, 1993.
8. V. BARGMANN, L. MICHEL, V.L. TELEGGI – *Phys. Rev. Lett.* 2 (1959) 435

HANS A. BETHE, A MAGFIZIKA ÉS A NUKLEÁRIS ASZTROFIZIKA EGYIK SZÜLŐATYJA

– Szubjektív megemlékezés

Németh Judit

ELTE TTK, Elméleti Fizikai Tanszék

Száz évvel ezelőtt született Németországban és tavaly halt meg Amerikában *H.A. Bethe* egy nagy fizikusnemzedék talán utolsó tagjaként. Édesapja élettanprofesszor volt, édesanyja zenész. Matematikai és természettudományos tehetsége korán jelentkezett, ötéves korában már törtszámokat tudott összeadni, olvasni négyéves korában kezdett el. Fizikusként tanult Frankfurtban, majd Münchenben. Itt *Sommerfeld* tanítványa volt, aki egyik legjobb diákjának tartotta. 1928-ban nála doktorált röntgensugarak szóródásából kristályon, *summa cum laude*.

A következő években Münchenben dolgozott, ahol akkoriban a világ egyik legjobb fizikai intézete működött. Mivel édesanyja zsidó volt, 1933-ban elvesztette ezt az állását. Két év angliai tartózkodás után az amerikai Cornell Egyetem (*Gibbs* volt ott a tanszékvezető) ajánlott fel neki állást, ahol először adjunktus, majd 1937-ben professzor lett. Élete végéig a Cornellen maradt, ahol hatására kiváló fizikai intézet alakult ki. Olyan fizikusok voltak a doktoranduszai, mint *Feynman*, *Dyson*, *Salpeter*. Hiába hívta *Sommerfeld* 1947-ben utódjának a müncheni katedrára, nem fogadta el azt, noha levelében elismerte, hogy szakmailag az ott töltött évek voltak számára a leghasznosabbak.

A fizikus Bethe

Bethe a fizika sok területén dolgozott és végzett értékes munkát. Az egyetem elvégzése után *Sommerfeld* mellett Münchenben kapott állást. 1930-ban ösztöndíjjal fél évet *Fermi* mellett töltött, aki nagy hatással volt rá. Nála tanulta meg, hogy a fizika könnyű és élvezetes, a problémák megoldásának a lényegét egy papíron, logarléccel is el lehet végezni. Ez élete végéig nagy erőssége volt.

Ekkoriban írt két híres cikket a *Handbuch der Physik*-be: az egyiket *Sommerfeld*-del a fémek elektronelméletéről, a másikat egyedül az egy- és kételektronos atomokról.

Leghíresebb és legsokrétűbb munkásságát a magfizika terén fejtette ki. Eleinte a magreakciók elméletével foglalkozott. 1936–37-ben három nagy cikket írt a *Reviews of Modern Physics*-be a magreakciók elméletéről. Ezeket nevezték el „Bethe Bibliának”, és évtizedekig a tudományterület legkitűnőbb összefoglalói voltak.

A magreakciók elméletének alapos ismerete segítette őt talán leghíresebb munkájához. 1938-ban egy hallgatóval kiszámolták a $p+p$ fúziós láncban felszabaduló energiát, de mivel a csillagok hőmérsékletéről nem volt jó az elképzelésük, a felszabaduló energiára rossz értéket kaptak. Amikor néhány hónap múlva egy konferencián Bethe pontosabb ismereteket szerzett a hőmérsékletekről, minden lehetséges energiatermelő reakciót végigszá-

molt, nemcsak a $p-p$, hanem a CNO-ciklusban is. Sikertült azt is meghatározni, hogy milyen gyakorisággal lesznek jelen a C, N és O elemek a csillagban (két hét alatt!). Azt is megállapította, hogy a kisebb csillagok a $p-p$, a nagyobbak a CNO-ciklus révén nyerik az energiájukat (ezt az utóbbit mintegy 20%-kal túlbecsülte a magasabb centrális hőmérséklet feltételezése miatt). Ezzel nagy vonalakban megmutatta, miért ragyog a Nap. Ezért a munkájáért már publikálása előtt megkapta a New York-i Tudományos Akadémia díját. Amikor 1967-ben odaítélték neki a Nobel-díjat, gondolkodtak rajta, melyik munkájáért adják: végül a csillagok energiatermelését magyarázó eredményeiért kapta.

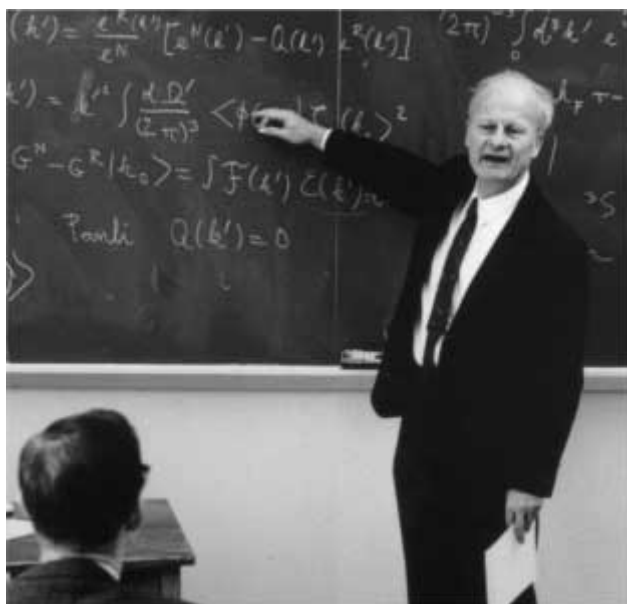
A magfizikához élete további részében sem maradt hűtlen. Az 1960-as években munkatársaival együtt a magfizikai soktestproblémán dolgozott, és ezen a területen is nagy sikereket ért el.

Jelentős munkája volt Bethének a hidrogénatom energiaszintjeinek pontos meghatározása. *Lamb* és munkatársainak mérésében a Dirac-elméleten alapuló értékektől eltérés adódott (*Lamb*-féle eltolódás). Az eltolódás jóval nagyobb volt a lehetséges mérési hibánál. Egy konferencián, ahol ez a kérdés felmerült, *Kramers*, egy holland fizikus egy egyszerű modellt vázolt fel, hogyan kellene a jó értéket renormalizáció segítségével kiszámítani, azonban senki nem tudta, hogyan kellene a számításokat elvégezni. Bethe viszont kiválóan tudott számolni. A konferenciáról hazamenet a vonaton elvégezte a számolást, és jó eredményt kapott. A számítások után egyre erősebb lett a meggyőződés, hogy a kvantum-elektrodinamika fizikailag jó, csak a számításoknál néhány matematikai trükköt kell alkalmazni. Bethe sikere részben annak volt köszönhető, hogy a kvantum-elektrodinamikában korábbi munkái révén nagyon jártas volt, részben 1934-beli *Heitler*-rel közösen végzett munkája révén.

Idős korában az asztrofizika, így a szupernóva-robbanás és a fekete lyukak iránt érdeklődött. A szupernóva-robbanásról 88 éves korában írt cikke a témának alapvető, minden területre kiterjedő összefoglalása, amelyben részletesen leírja saját eredményeit, és amelyet ma is kiindulásként használnak a témával foglalkozó kutatók.

Bethe és az atombomba

Bethe és *Teller* 1940-ben, miután *Kármán*-nal tanácskoztak, írtak a lökéshullámokról egy cikket. Ez volt az első cikke, amely már a háborús felkészülés felé mutatott. Pearl Harbor után csatlakozott az MIT-ben folyó radar-programhoz, de még hónapokig nem volt hajlandó a születő atombombaprogramhoz csatlakozni. *Fermi* kísérletei változtatták meg a nézetét. 1943-ban, a Los Alamos-i



laboratórium megalakulása után *Oppenheimer*, a laboratórium vezetője meghívta az Elméleti Osztály vezetőjének. Itt mind a magfizikai, mint az asztrofizikai ismeretei nagy előnyére szolgáltak.

A háború után a hidrogénbomba-készítés tervének hosszú ideig ellenállt. Amikor azonban nem sikerült a tervet megakadályozni, amennyire tudott, részt vett az elkészítésében. Ezután azonban elszánt harcosa lett a nukleáris fegyverkezés megszüntetésének egyrészt mint tudós, másrészt mint a Fehér Ház tudományos tanácsadója. Segített rábeszélni a Fehér Házat, hogy tiltsa be az atmoszférabeli nukleáris tesztek (1963) és az antibalisztikus rakétarendszereket (1972). Elszántan ellenezte a „csillagháború” gondolatát. Hiroshima ötvenedik évfordulója (1995) alkalmából levelet írt a világ tudományos közösségéhez. Ebben őszinte megkönnyebbulését fejezte ki, hogy a háború után nem használtak többet atomfegyvereket, és felszólított minden tudóst, hogy soha többé ne készítsenek további nukleáris fegyvereket, se olyan eszközöket, amelyek embertömegek elpusztítására alkalmazhatók.

Bethe, az ember

Bethe elismerten a legegyszerűbb, legfelölöségteljebb, legbecsületesebb emberek egyike volt a fizikus társadalomban. Hihetetlen munkabírása, rendkívüli tudása és érdeklődése volt. Kilencven éves korában még rendszeresen bejárt az intézetbe és dolgozott. Általános műveltsége, más területeken való jártassága is nagyon nagy volt. Magyarországról például nem csak azt tudta, hogy ki volt Szent István, de azt is, ki volt Hunyadi János, Mátyás király, és miért volt 1848–49-ben forradalom és szabadságharc.

Rendkívül rendszeres és rendezett ember volt. A hatvanadik születésnapján tartott beszédében Feynman mesélte róla, hogy Los Alamos-ban egy szobában dolgozott Bethével. Karórája akkor még nem volt, de nem is volt rá

szüksége. Amikor Bethe híres fehér lapjaiból négyet teleírt, ideje volt kávézni menni; amikor nyolc kész volt, ebéldidő volt, amikor 14, haza lehetett menni. (Ezekről a fehér lapokról nekem is van emlékem: a magfizikáról írt jegyzeteiből egyszer kölcsön kaptam a 2472 és 2496 közötti oldalakat. Nekem a számozásban 50 fölé menni sohasem sikerült.)

Amellett, hogy barátságos és közvetlen ember volt, jó humora is volt, szeretett társaságba járni, és vidám beszélgetésekben részt venni. Önmagán is tudott gúnyolódni. A nyolcvanadik születésnapján rendezett szimpóziumon valaki idézte azt a történetet, hogy 1934-ben a kitűnő fizikus *Weisskopf*, aki hasonló munkát akart elvégezni, mint Bethe a megelőző évben, megkérdezte tőle, mennyi ideig fog tartani a számolás elvégzése. A válasz ez volt: „nekem három nap kellett hozzá, neked körülbelül három hét kell majd”. A hallgatóságban ülő Bethe megjegyezte: „Akkoriban nagyon beképzelt voltam. Ma is az vagyok, de ma már jobban leplezem.”

Élete vége felé sokszor idézte egy kollégája híres mondatát: ő, ha még egyszer 80 lehetnék! És tényleg: 80 éves korában még fizikailag is, szellemileg is teljes értékű volt, nyaranta Európa és Amerika különböző intézeteibe utazott nyári munkára, és az intenzív munka mellett naponta több órás kirándulásokat tett.

Kitűnő tanár és előadó volt: a legbonyolultabb témákról is egyszerűen és érthetően beszélt. A tanítványaival és közvetlen munkatársaival rendkívül kedves és barátságos, de szakmailag nagyon nagyigényű volt. Erről a Cornell Egyetemen már az első napon meggyőződhettem.

Én úgy kerültem hozzá munkatársnak, hogy addig soha nem találkoztam vele. Budapestről mintegy 20 óra repülőút után, halálos fáradtan érkeztem meg. Képzeltető a meglepetésem, amikor a repülőtéren odajött hozzám valaki, és bemutatkozott, hogy ő Hans Bethe, és értem jött ki a repülőhöz. Aztán beültetett a kocsiába – és bevitt az intézetbe egy szemináriumra. Fel sem merült, hogy talán le szeretnék feküdni. Egy fizikus, ha jó szeminárium van, azt hallgatja meg, még akkor is, ha elalszik közben.

Másnap délelőtt körbevitt az intézetben és bemutatott mindenkinek. Utána leültetett, és három órán át végigbeszélte velem, hogy mit kellene ottlétem alatt csinálnom. Két hét múlva aztán megkérdezte, mennyit végeztem el a megbeszélétekből.

A munka elsődlegessége mindennél fontosabb volt a számára. Egy évvel az odaérkezésem után meghívtak nyáron Seattle-be, ahol körülbelül 50, javarészt kiváló fizikussal egy egy hónapos nyári programot szerveztek. Az én telefonomat nem tudták, ezért Bethét hívták fel, hogy adja át a meghívást. Bethe ezt a következőképpen adta át: „Egy hónapra meghívták, fizetik az itteni fizetését, az útiköltségét és a szállodáját. Én megmondtam, hogy valószínűleg nem tud menni, mert munka van itt, de Magán múlik.” (Azért nem haragudott, amikor mégis elmentem.)

A munkatársai sorsát az együtt töltött idő után is figyelemmel kísérte. Feleségével együtt kétszer is eljött Magyarországra. Gondosan vigyázott, hogy az itt tartott előadásaiiban kiemelje az én munkámat. Azt hiszem, ez a nagydoktori címem megszerzésénél hasznomra volt.

A KOPERNIKUSZI FORDULAT

A tudomány működésének szemléltetése a csillagászat történetén keresztül

Radnóti Katalin

ELTE TTK Fizikai Intézet

Az alábbi írás a holland De Driestar Keresztény Főiskola (Gouda), a Károli Református Egyetem Tanítóképző Főiskolai Kara (Nagykőrös) és az ELTE Tanárképző Főiskolai Kara¹ (Budapest) együttműködésével 2001–2005-ben folyó Innováció a pedagógusképzésben című közös fejlesztési program egyik terméke.

A holland oktatási minisztérium finanszírozásával zajló projekt három fő téma körül koncentrált:

- Reflektív tanulás és tanári kompetencia.
- A tantervi koherencia javítása, témák köré csoportosítás (A tanítás művészete).
- Az elmélet és a gyakorlat közti kapcsolat fejlesztése egy Oktatásfejlesztési Központ létrehozásának segítségével.

A jelen cikkben bemutatott példánk a *tanításművészetnek* nevezett didaktikai módszerhez kapcsolódik, melynek fő elemei röviden a következőképp foglalhatók össze:

- Valamilyen nagy horderejű, az emberiséget érintő téma legyen a feldolgozás középpontjában: esetünkben a heliocentrikus világkép kialakulása.
- Genetikus megközelítés. Történeti: ahogyan az emberek, majd később a tudósok megismerték az adott dolgot, esetünkben a heliocentrikus rendszert.
- A mindennapi dolgokra csodálkozzanak rá a gyerekek.
- Nyitott kérdések feltétele, melyet szókratészi kérdéses módszernek is neveznek. A gyerekek egymással is beszélgetnek a témáról. Ehhez jó, ha úgy ülnek, hogy lássák egymást, például félkörben. Először a saját szavakkal írják le az éppen tárgyalni kívánt jelenséget, csak utána következik a szaknyelv. Érzelmi oldalról is megközelítik a témát. Természetesen a beszélgetés közben hibázni is lehet!
- Dramaturgiai elemeket is tartalmaz, a feldolgozás jelenetekre oszlik.

Ajánlott témánk feldolgozása 6–8 tanítási órát vehet igénybe a 8–9. évfolyamon. De erdei iskola keretében is feldolgozható néhány eleme a 6–7. évfolyamon úgy, hogy a gyerekek megfigyeléseket végeznek, illetve eljátszák az egyes tevékenységekben ajánlottakat.

A téma feldolgozása széleskörű lehetőséget nyújthat a dramaturgiai megközelítésekhez is, így a drámapedagógiát tanító kollegákkal való együttműködésre is lehetősé-

get ad. További kapcsolatteremtés lehetséges még a következő tantárgyakkal: földrajz, történelem, rajz és művészettörténet, technika, irodalom.

A jelen cikk szerzője által kifejlesztett tanításművészeti példa témája a *mai világképünk kialakulásához vezető* hosszú és rögös út néhány jellemző, érdekes részletének feldolgozása. Írásunkban a csillagászati vonatkozásokra koncentrálnak, mégpedig azért, mert az e tárgykörben felhalmozódott ismeretanyag tette végül is lehetővé a természet törvényeinek kvantitatív, kauzális kapcsolatokon alapuló megragadását.

A tudományos elméleteknek minden korban, így napjainkban is, be kell ágyazódniuk az adott korszak fő gondolkodási áramlataiba, amely sajátos ideológiai környezetet jelent. Az elmúlt évszázadokra visszatekintve mi már inkább csak azokat az elméleti rendszereket ismerjük meg, amelyek sikeresek voltak az adott korszakban, és továbbfejleszthetőnek bizonyultak a későbbiekben is. Az iskolai oktatásban szinte kizárólagosan csak ezekről esik szó. *Kopernikusz* elméletével is ez a helyzet. A jelen írásunkban ajánlott feldolgozás során a gyerekek megismerhetnek olyan elméleti rendszereket is, amelyek ugyan uralkodónak számítottak egy adott korban, ma viszont már nem fogadjuk el azokat. Ez egyben rávilágít a tudomány, a tudományos rendszerek változására is, s napjaink történéseinek elemzéséhez is segítséget jelenthet.

A javasolt feldolgozás fő lépései

Feladat

Figyeljék meg a gyerekek az eget egy szép, derűs éjszakán! Keressék meg a különböző ismert csillagcsoportokat, figyeljék meg a Holdat! Írják is le megfigyeléseiket! Ha lehetséges, akkor több napon keresztül végezzék a megfigyeléseket körülbelül azonos időben! (Például erdei iskola.)

Alternatív lehetőségek

Rajzolják le, hogy miként képzelik el a Világegyetemet, benne Földünket!

Rajzolják le a Napot, a Holdat, a csillagokat különböző napszakokban!

Egymás rajzait megnézik, majd beszélgetés következik azokról. (Szókratészi beszélgetés)

A megfigyelések eredményei körülbelül a következők lehetnek: Hosszabb megfigyelés alapján az látszik, hogy az egyes csillagcsoportok és a magányos csillagok is változtatják helyüket az égbolton az éjszaka folyamán, mint-

¹ Az ELTE szerkezeti átalakulása után a Tanárképző Főiskolai Kartól az ELTE Pedagógiai és Pszichológiai Kar vette át a program szakmai irányítását.

1. táblázat				
A Hold–Föld–Nap rendszerbeli t távolságok és D átmérők arányainak ma elfogadott és az ókorban becsült értéke				
	D_H/D_F	D_N/D_F	t_{HF}/D_F	t_{NF}/D_F
Mai	0,27	108,9	30,2	11726
Arisztarkhosz (~270)	0,36	6,75	9,5	180
Hipparkhosz (~150)	0,33	12,33	33,66	1245
Poszeidóniosz (~90)	0,157	39,25	26,2	6500
Ptolemaiosz (150)	0,29	5,5	29,12	605

ha elfordulna az éggömb. Van azonban néhány csillag-szerű, halvány objektum és a Hold, amelyek mozgása más, mint a csillagoké. Naponta változik helyzetük az égbolton.

Megfigyelésünk eredményei alapján azt a következtetést vonhatjuk le, hogy a csillagok, a Nap, a Hold és a bolygók mintha a Föld körül körben mozognának. Ez volt a megállapítása az évszázadokkal ezelőtt élt megfigyelőknek is. (Genetikus elem)

Máris megfogalmazhatjuk a természettudományos megismerési módszer fő elemeit: megfigyeléseket végzünk, következtetéseket vonunk le, illetve elméleteket állítunk fel.

Amennyiben nem áll módunkban megfigyeléseket végezni, akkor az alternatív kérdésre adott válaszokat, rajzokat lehet elemezni. Idősebb gyerekek esetében nagy valószínűséggel a heliocentrikus elképzelés jelenik meg. Ekkor úgy folytatjuk a feldolgozást, hogy a későbbiek során ennek az elképzelésnek a kialakulását tekintjük át.

Az ókori csillagászat fejlődésének tetőpontját *Görögországban* érte el.

Probléma

Észrevették, hogy a Mars pályának iránya időnként megváltozik és keletről nyugati irányba mozog a csillagokhoz képest. Ezt a mozgást retrográd mozgásnak nevezték el.

Az egyik ókori görög filozófus, a számoszi *Arisztarkhosz* a Kr. előtti 3. században érdekes elképzeléssel állt elő. Nem a Föld, hanem a Nap van nyugalomban, a Világmindenség középpontjában. A Föld és az akkor ismert öt többi bolygó kering kör alakú pályán a Nap körül, miközben a Föld forog a saját tengelye körül. Akkor ez az elképzelés abszurdnak tűnt, így elvetették.

Arisztarkhosz meghatározta a Hold–Föld–Nap viszonylagos nagyságait és távolságait. Kimutatta, hogy a Hold nem sokkal kisebb a Földnél, a Nap ellenben jóval nagyobb. Továbbá, hogy a Nap jóval távolabb van a Földtől, mint a Hold. Így arra a következtetésre jutott, hogy a Földnek kell a Nap körül keringenie.

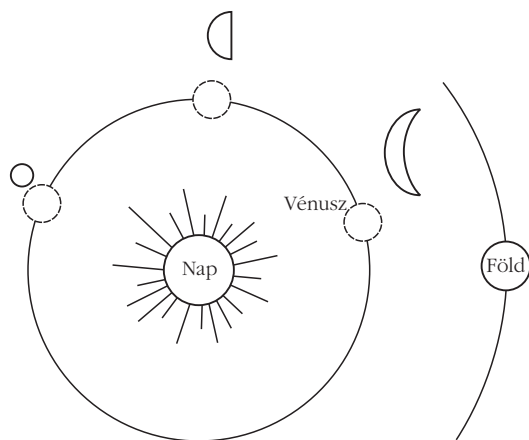
Az 1. táblázatban összefoglaljuk a ma elfogadott, továbbá Arisztarkhosz és későbbi csillagászok által kapott értékeket, melyek rendkívül tanulságosak. Látható, hogy a mérések egyre finomodtak. Azt gondolhatnánk, hogy egyenes út vezetett a mai értelemben is elfogadható világmép kialakulásához, de nem ez történt.

A mai értelemben is tudományosnak mondható megközelítésmóddal párhuzamosan az ógörög filozófiában született egy olyan elképzelés, amely élesen szembeállította egymással az égi és a földi világot. *Platón* tanítása szerint az összes égitest a kristályszférákhoz van rögzítve, melyek mozgása egyenletes és tökéletes. Ezen az egyenletes körmozgást értette, melynek még nagy szerepe volt a későbbi évszázadok során. Tanítása szerint minden égi dolog örök és változatlan. Ezt az elképzelést tette magáévá *Arisztotelész*, a világhódító *Nagy Sándor* nevelője is.

Ptolemaiosz geocentrikus világmépét a Kr. előtti 2. században alkotta meg. Ebben magyarázatot próbált adni a Naprendszer akkor ismert bolygóinak, a Vénusznak, a Marsnak, a Jupiternek és a Szaturnusznak az égbolton megfigyelt mozgására. Elképzelése Platón és Arisztotelész nyomdokain halad. Szerinte a Világegyetem középpontjában a mozdulatlan Föld áll, amely körül az összes többi égitest mozog. Minden bolygóhoz, a Naphoz és a Holdhoz egy földközéppontú átlátszó kristálygömb (szféra) tartozik. A csillagok a legkülső szférán helyezkednek el. Elképzelése szerint az összes bolygó kisebb-nagyobb sugarú körpályákon mozog a Föld körül. A kisebb, külső kört a bolygó epiciklusának nevezik, míg a belső, nagyobb sugarú és földközéppontú körnek deferens a neve. Ez az elképzelés jó egyezésben volt az abban az időben rendelkezésre álló mérési adatokkal, és még a retrográd mozgások magyarázatára is alkalmas volt az epiciklusok segítségével. A Hold és a Nap pályájához nem tartozott epiciklus. A modell elég jól előre tudta jelezni a bolygók helyét az égbolton. Ez valójában a Földről mérhető látószögeket jelentett csupán, hiszen ebben a modellben a távolságoknak nem volt szerepe.

Kopernikusz ismerte Arisztarkhosz elképzeléseit, mivel abban a korban kezdték ismét felfedezni az ókori görög gondolatokat, a ptolemaioszi „körkörös” modell is túl bonyolultnak tűnt már sokak szemében, ezért Kopernikusz elméletében ismét a Nap lett a Világmindenség központja, míg a Föld csupán a bolygók egyike, amely a Nap körül kering és forog a tengelye körül. Híres könyve 1543-ban jelent meg, amely dátumot gyakran a modern természettudomány születési évének is nevezik. Elméletében ő is körök, epiciklusok és deferensek segítségével írja le a bolygók mozgását. Célja saját bevallása szerint is csupán annyi volt, hogy alkalmasan újrarendezze a köröket. Kopernikusz idejében is csak a körmozgás volt az elfogadott lehetőség az égi mozgások leírásához, egyedül a körmozgást tekintették természetes mozgásnak. Napközéppontú modellje végül is egyáltalán nem volt egyszerűbb, mint a ptolemaioszi, de azt csak kevesen ismerték. Amit ismertek, és napjainkban is erre hivatkoznak, az az egyszerűsített modell, melynek középpontjában a Nap található, és igazából ez az, amelyik hatott a későbbi korok tudósaira.

Az elmélet több jelenséget megmagyarázott, például a retrográd mozgást is. Többen is tudták, Kopernikusz is, hogy az új elmélet nem ad pontosabb előrejelzéseket, mint Ptolemaioszé. Kopernikusz idejében még nem ismerték a távcsövet, ezért abban a korban, a 16. században, *mindkét elmélet megfelelő volt a megfigyelések magyarázatára.*



1. ábra. A Vénusz fázisai

Ellenben az új elmélettel kapcsolatban több kérdés is felmerült:

- Hogyan mozog a Föld?
- Mi tartja mozgásban a Földet?
- Hogy lehet az, hogy nem esnek le a tárgyak a forgó Föld felszínéről?

Ezekre a kérdésekre a választ, csak évszázadokkal később, a newtoni fizika adta meg. De a kopernikuszi rendszer kidolgozása fontos állomás volt ahhoz, hogy kibontakozhasson a modern természettudomány, ezért szokták kopernikuszi forradalomként is emlegetni.

Dramaturgiai jelenet

Gondolatban visszautazva az időben, a reneszánsz idejébe képzeljük magunkat. A tanár beöltözik Kopernikusznak. Behoz két papirost az osztályba. Az egyikre a ptolemaioszi modellt, míg a másikra az arisztarkoszi modell van felrajzolva, melyet nemrég találtak meg. Megmutatja ezeket a gyerekeknek, és kéri, hogy ők is gondolkozzanak el a következő kérdésen: *Melyik modell írhatja le jobban Világunkat?* Sorakoztassanak fel mindkét elképzeléssel kapcsolatban érveket, és ellenérveket! Mit magyaráz meg az egyik és mit a másik modell? Milyen kérdések jelennek meg stb. (Szókratészi beszélgetés)

Feladat

Magyarázzák meg a gyerekek, hogy mit jelent az a ki-fejezés, hogy felkel a Nap

- a) a kopernikuszi modell szerint,
- b) a ptolemaioszi modell szerint.

Hetven évvel Kopernikusz halála után *Galilei* kezdte el használni a távcsövet az égi jelenségek tanulmányozásához. A maga szerkesztette távcsövön keresztül tisztán látta a *Hold hegyeit*, észrevette a *Nap foltjait*, felfedezett négy, a *Jupiter körül keringő holdat*, észrevette, hogy a Tejútrendszer csillagokból áll. Ezek a megfigyelések akkor óriási szenzációt keltettek, és nem csak a művelt világ, de az utca embere is erről beszélt. Mindezek azt bizonyították, hogy *az égi és a földi jelenségek nem különböznek egymástól*, mint azt Arisztotelész hitte, és ahogy az ebben a korban a hivatalos ideológia alapját képezte. A fizikának, a tudományoknak tehát társadalmi hatása volt már abban az időben

is. Ugyanakkor érdekes tény, hogy *Galilei* még mindig az egyenletes körmozgást tekintette alapmozgásnak.

Galilei gondolkodásmódját jellemzi, ahogy a sok-sok jelenségben kereste, és nem egy esetben sikeresen megtalálta és kiválasztotta azt a tényezőt, amelyet fel tudott használni az általa megfogalmazott elmélet igazolására.

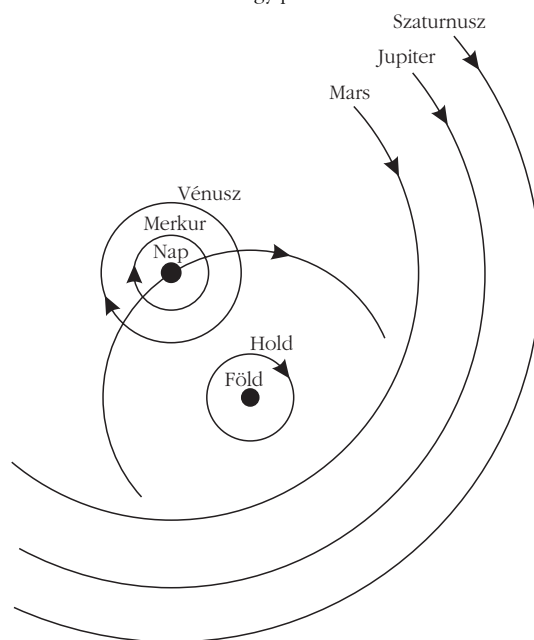
A Vénusz fázisai

Galilei többek között a Vénuszt is megfigyelte és észrevette, hogy hasonlóan a Holdhoz, különböző fázisai figyelhetők meg (1. ábra). Ez egyben azt is jelentette, hogy nincs saját fénye, hanem a Nap világítja meg, és amit mi látunk, az a bolygóról visszaverődött napfény. A Vénusz fázisai azonban a ptolemaioszi elmélettel is magyarázhatóak voltak, kivéve egyet közülük, a teljes fázist. Ezt csak a kopernikuszi elmélet tudta előre jelezni *Galilei* szerint, és ő megfigyelte ezt! (Ezt is el lehet játszani, egy lámpával és egy gömbölyű testtel modellezni.)

A tele-Vénusz azonban valójában csak annak bizonyítéka, hogy a Vénusz a Nap körül kering. Arról semmit sem mond, hogy mi van az egész rendszer középpontjában. A megfigyelt jelenségek nemcsak a kopernikuszi modellel magyarázhatóak, hanem a *Tycho Brahe* által használttal is, mely a geocentrikus és a napközéppontú modellek „keverékének” tekinthető. A középpontban a Föld áll és a Nap kering körülötte, az összes többi bolygó pedig a Nap körül kering. *Galilei* korában inkább ezt a modellt fogadták el. Egyiptomi rendszernek is nevezik, melyet a görög *Herakleitosz* konstruált meg az ókorban (2. ábra).

Tehát a Vénusz fázisváltozásai nem jelentenek döntő érvet a kopernikuszi rendszer mellett. A Jupiter holdjai periódusának meghatározásában elkövetett hibák okának feltárása viszont már igen. *Galilei* a megfigyeléseket a Földről végezte, azt tekintette – megszokásból – a Jupiter-pálya középpontjának. Ha a Napra helyezte a pálya középpontját, akkor megfigyelésével azonos eredményeket kapott! Ez az, ami meggyőző bizonyíték lehetett volna már akkor is.

2. ábra. Az egyiptomi rendszer



Az arisztotelészi tanok buzgó hívei közül nem egy azonban egyszerűen nem is akart olyan tapasztalatokat szerezni, amelyek ellentmondhattak azoknak. Akadt, aki még belepillantani sem tartotta érdemesnek Galilei távcsövébe, hiszen amit az égen látni lehet, az úgyis olvasható Arisztotelésznél. Amiről viszont ő nem írt, az nem is létezik. De így voltak ezzel mások is. Ha beleillett az új felfedezés a világmindenségről alkotott elképzeléseikbe, akkor elfogadták, ha nem, akkor többnyire nem is látták azt.

Mind a ptolemaioszi, mind a kopernikuszi rendszer valójában matematikai konstrukció. Az egyház problémája Galileivel kapcsolatban éppen az volt, hogy Kopernikusz elméletét teljes igazságként állította be, és nem csak mint egy lehetséges hipotézist tárgyalta. Abban az időben a csillagászok már nem hittek ténylegesen a kristályszférákban, mégis nyugodtan dolgoztak velük, mivel kielégítően írta le az égitestek megfigyelhető helyzetét.

A Galilei által teljes igazságnak beállított kopernikuszi modell igazolásához abban az időben hiányoztak a döntő jelentőségűnek tartott tapasztalatok. Amennyiben a Föld kering a Nap körül, akkor a csillagok helyzetének periodikusan változni kell. Ez, persze, így van, de abban a korban még nem voltak olyan érzékenyek a szögmérések, hogy ezt meg lehetett volna figyelni. A Föld tengelyforgását igazoló, úgynevezett Foucault-féle inga csak a 19. század közepén készült el. (Mint az közismert, az inga megtartja a lengési síkját. Ellenben, ha az ingát egy forgó testre helyezzük, a forgó koordináta-rendszerben ez nem így látszik. Ezt a jelenséget 1851-ben a párizsi Pantheonban egy 67 m hosszú és 28 kg tömegű ingával mutatták be.)

Vagyis Galilei nem tudott ellenfelei számára meggyőző, minden kritikus szemlélő számára megfelelő kísérleti bizonyítékot szolgáltatni elmélete alátámasztásához. Ezért utasította arra az inkvizíció, hogy elméletét csak mint egy lehetséges hipotézist emlegetheti.

Feladat

Beszélgetés a Galilei perről, annak lehetséges okairól. Esetleg *Németh László Galilei* című drámájának megtekintése, egyes részeinek eljátszása.

Menjünk egy kicsit visszafelé az időben!

3 évvel Kopernikusz halála után született Tycho Brahe dán csillagász, aki húsz éven keresztül szisztematikusan megfigyelte a bolygók, a Hold és a Nap elhelyezkedését az égbolton. Ugyan távcső nélkül, de korának legpontosabb megfigyelési adatait rögzítette. Azt gondolta, hogy ezen a módon el lehet majd dönteni, hogy melyik elmélet írja le pontosabban a megfigyelhető égi világot. Az eredmény megdöbbentő volt. *Egyik akkor használatos elmélet sem bizonyult helyesnek!*

Brahe adatai szolgáltatták a kulcsot Kepler számára a Világegyetem titkainak megfejtéséhez. A két tudós másfél évet dolgozott együtt, amikor is Brahe meghalt. Kepler ez után jutott hozzá a mérési adatokhoz. Különösen a Marsról felvett adatok okoztak komoly nehézségeket. Kepler, miután a napközéppontú világegyetemben, a kopernikuszi modellben hitt, átszámolta a földi megfi-

gyelés adatait úgy, mintha a Napról figyelnénk meg azokat. Hogyan is látnánk a bolygót a Napról? Négy évet töltött el ezzel a számolással. Majd következett a megfelelő pályagörbe megtalálása.

Feladat

E téma megbeszélése közben sor kerülhet *Madách Imre Az ember tragédiája*, Prágai szín megjelenítésére.

Jellemző volt Kepler egész gondolkodásmódjára, hogy a pálya meghatározását nem egyszerű geometriai problémaként kezelte, ahogy addig mindenki, hanem fizikai erőkkal kapcsolatos magyarázatot keresett. A Nap központi helyre való állításában is kifejeződött ez, mert Kepler már a tömegvonzásra is gondolt. *Új fogalmi rendszerbe illesztette a problémát, másképp látta, mint azt elődei tették.* Brahe példájából látható, hogy hiába végez valaki rendkívül pontos megfigyeléseket, csupán a mérési adatokból nem tud törvényszerűségeket kiolvasni. Koestler igen szellemesen a következőt írja: „Tudni kell használni az észleleteket; a nehézséget az okozza, hogy mikor vegyük figyelembe az egyiket, s mikor a másikat.”

Nem arról van tehát szó, hogy a tapasztalásnak, a megfigyelésnek, az észlelésnek, a mérésnek ne lenne nagyon fontos szerepe a megismerésben. Mindössze azt mondjuk: ahhoz, hogy valamire rátaláljunk, kell, hogy legyen róla valamilyen előzetes elképzelésünk. Olyan adatokat kell keresni, figyelembe venni, amelyek a vizsgált hipotézist alátámaszthatják vagy cáfolhatják, amelyek így lehetővé teszik az előzetes elképzelések ellenőrzését.

Kepler a Mars pályájával kapcsolatos kérdését már eleve egy modell keretei között fogalmazta meg, nevezetesen a kopernikuszi modellt választotta. A Föld és a többi bolygó keringési idejének is csak ebben a modellben van értelme. A pályák alakjára vonatkozóan különböző hipotézisei voltak. Ilyen volt az addigi modellekben kizárólagosan szereplő kör. Megpróbálkozott tehát a kiválasztott észlelési adatok alapján kapott pontoknak körre való illesztésével. És ez a hipotézis nem vált be. Újat kellett keresni. Végül rátalált az ellipszisre.

Térjünk ismét vissza a Galilei perhez, és nézzünk meg néhány évszámot!

1616. Galilei első megintése,

1633. a per, majd házi őrizete élete végéig,

1609. Kepler I. és II. törvénye megjelenik (Astronomia nova),

1619. Kepler III. törvénye megjelenik (Harmonices mundi).

Kepler és Galilei ismerték egymást, bár személyesen sosem találkoztak. Néhány levelet váltottak, kölcsönösen tisztelték egymást. Általában a prágai toszkán nagyköveten keresztül üzentek egymásnak, küldték el egymásnak munkáikat. Elvileg tehát Galilei ismerhette volna Kepler első és második törvényét már azokban az években is, amikor oly vehemensen kiállt és abszolút igaznak tekintette a kopernikuszi elméletet. De a Kepler-törvényekkel Galilei nem is foglalkozott. Szerinte a kopernikuszi modell volt az egyetlen igaz valóság, melyben körök szerepeltek. A Kepler által kínált ellip-

szis valószínűleg elképzelhetetlen volt az ő számára, így nem is vette tudomásul ezt a lehetőséget.

Ez a tény nagyon érdekes az oktatás számára is. Világosan mutatja, hogy ha valaki egy adott világképet, elképzelérendszeret birtokol, akkor abból rendkívül nehezen tud kilépni. Hiába találkozik esetleg annak ellentmondó tényekkel, azokat egyszerűen figyelmen kívül hagyja, nem foglalkozik vele. Ezért is annyira fontos, hogy világosan lássuk, hogyan is gondolkodnak a gyerekek egy adott témáról a feldolgozás kezdetén. Ahhoz, hogy a tanár meg tudja tervezni az ismeretszerzés menetét, látnia kell, hogy mit kell lebontani, majd újra, másképp felépíteni, illetve mi az, ami valószínűleg problémamentesen tud integrálódni az előzetes elképzelések közé. Továbbá a gyerekeknek is világosan kell látniuk saját elképzeléseik és az új, megtanulandó gondolatrendszer közti különbségeket, illetve esetleges hasonlóságokat. Melyek azok a pontok, ahol másképp gondolkodnak, mely esetekben mond mást a tudomány, mint ahogyan ők eddig gondolkodtak az adott dologról. Ezért nagyon fontosak a beszélgetések, a szókratészi módszer, ahol éppen az előzetes elképzelések felszínre hozása történik meg. Ezt nem szabad elvesztegetett időnek tekinteni, a tanulási folyamat fontos részét képezi!

Visszatérve a Kepler-törvényekre, azok valójában sokkal többet jelentenek, mint az ismert adatok egyszerű leírása. Az elméletet felhasználva újszerű megfigyelésekre is lehetőség nyílt, melyek nem voltak ismertek Kepler számára. Például új bolygók felfedezésére adott lehetősé-

get, amikor eltérések mutatkoztak a Kepler-törvényektől (Uránusz, Neptunusz, Plútó).

Kepler törvényei további fejlődési lehetőséget jelentettek a tudomány számára. *Newton* nem tudta volna megalkotni dinamikáját Kepler törvényei nélkül. *Newton* egyécsitette a földi és az égi fizikát, melyekről addig azt gondolták, hogy különböző törvényszerűségeknek engedelmeskednek. *Newton* eredményei nélkül pedig lehetetlen lett volna a fizika további fejlődése. Az elektromosságtan, a hőtan, a sokrészecske rendszerek leírásához elengedhetetlen a dinamika ismerete. A modern fizika pedig végképp nem alakulhatott volna ki, mely pedig mindennapi életünk alapjait jelenti.

Irodalom

- J.D. BARROW: *A fizika világképe* – Akadémiai Kiadó, Budapest, 1994.
J.D. BERNAL: *A fizika fejlődése Einsteinig* – Gondolat Kiadó, Budapest, 1977.
H.C. BERG, T. SCHULZE: *2 Lehrkunst, Lebrbuch Didaktik* – Berlin, 1995.
Die Himmelsuhr
A. HOBSON: *Physics. Concepts and Connections* – Prentice Hall, Upper Saddle River, 1999.
A. KOESTLER: *Alvajárók* – Európa Könyvkiadó, Budapest, 1956/1996.
MIKONYA GY.: *A tanítás művészete* – Oktatás-módszertani kiskönyvtár, Gondolat Kiadó, Budapest, 2003.
Nemzeti alaptanterv 2003.
RADNÓTI K.: *Az induktív módszer zavarai az oktatásban* – Iskolakultúra 10 (2000. október) 34–44
SIMONYI K.: *A fizika kultúrtörténete* – Gondolat Kiadó, Budapest, 1986.
VEKERDI L.: *Így él Galilei* – Typotex Kiadó, Budapest, 1997.
NÉMETH L.: *Galilei*
MADÁCH I.: *Az ember tragédiája*

GLOBE AT NIGHT

– Mi is részt vettünk a felmérésben

Napjainkban számos újságcikk, rádió- és tévéműsor foglalkozik a környezetvédelemmel. Főleg ezeknek köszönhető, hogy egyre több figyelmet szentelünk a szabadba kerülő vegyi anyagoknak, veszélyes hulladékoknak, és egyre több olyan élelmiszert fogyasztunk, amelyek előállításakor kerültek a szintetikus növényvédő- és tartósítószeresek használatát.

Még a környezetünkre tudatosan odafigyelő emberek némelyike számára is ismeretlen fogalom a *fényszennyezés*. Mi is ez tulajdonképpen, és miért kell küzdenünk ellene?

A fényszennyezés (1. ábra) nem más, mint az esti égbolt mesterséges fényforrásokkal történő *felesleges* megvilágítása. Idetartoznak az egymást túlharsogó, az eget pásztázó reklámfények, a helytelenül megtervezett vagy kivitelezett közvilágítás, vagy az idegenforgalmi nevezetességek átgondolatlanul megvalósított díszkivilágítása.

A fölfelé irányított fény szóródik a felhőkön, a légköri párán és a lebegő porszemcséken. Ezzel nő az égbolt háttérfényessége, csökken a látható égitestek száma, illetve romlik a látvány minősége. Azt hihetnénk, hogy ez csupán a csillagászattal foglalkozók problémája, valójá-

ban azonban sokkal többről van szó. A túlzott kivilágítás megzavarja az éjszakai állatok tájékozódását, életritmusát, megváltozik a vándormadarak vonulási útvonala, madarak ezrei, rovarok milliói *esnek áldozatul* az égre irányított reflektoroknak.

1. ábra. Esti kivilágítás, tipikus fényszennyezés.

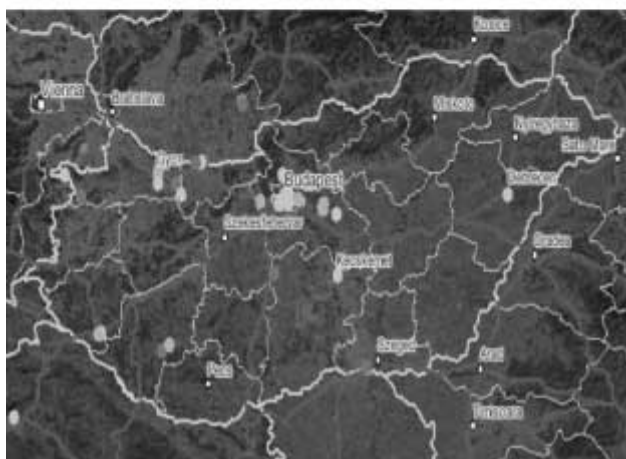




2. ábra. Felhívás a fényszennyezés mérésére a GLOBE (Global Learning and Observations to Benefit the Environment) honlapján...

Idén március végén egy világméretű kampány keretében iskolai csoportok és családok bevonásával vizsgálták a fényszennyezés hatásait bolygónk különböző tájain. A

4. ábra. Beérkezett mérések Európában és Magyarországon.



3. ábra. És a magyar felhívás a mérésre.

felhívást (2. ábra) a GLOBE (Global Learning and Observations to Benefit the Environment) tette közzé internetes oldalán, innen lehetett a részletes észlelési útmutatót is letölteni, végül ezen keresztül kellett a beszámolót is eljuttatni a gyűjtőközpontba.

A Magyar Csillagászati Egyesület eddig is jelentős erőfeszítéseket tett a fényszennyezés csökkentése érdekében, a témával kapcsolatos honlapunk van, egy debreceni konferencián pedig világítástechnikai szakemberek bevonásával jártuk körül a témát másfél évvel ezelőtt. Örömmel fogadtuk hát a kezdeményezést, és nagy lelkesedéssel fogtunk hozzá az akció dokumentumainak magyarra fordításához. A munkával éppen időben készültünk el, így néhány nappal az akció kezdete előtt itthon is meghirdethettük azt (3. ábra).

Összesen 4591 mérési adat érkezett be az adatgyűjtő központba, köztük több hazánkból is (4. ábra).

Az akció jelentőségét mégsem az összegyűlt adattömegben látjuk. A sajtó híradásai kapcsán rengeteg olvasó, néző, hallgató értesülhetett az eseményről, ezen túlmenően pedig magáról a problémáról. A Google kereső (5. ábra) szerint például 31 000 oldalon találkozhatunk a GLOBE at Night kifejezéssel a világhálón, ebből több, mint 600 magyarul íródott. Egy másik jellemző adat: az MCSE fényszennyezés portálján átlagosan 2–300 lapot tekintenek meg a látogatók hetente. A mérés hetében ez megközelítette a 4700-at. Számos diákcsoport, osztály foglalkozott a kérdéssel, és tapasztalta meg személyesen a fényszennyezés hatását.

5. ábra. A Google 31 000 találatot jelez a GLOBE at Night kifejezésre.



A RADIOAKTIVITÁS MEGISMERÉSÉNEK EGY JÓ LEHETŐSÉGE

Raics Katalin

Pécsi Tudományegyetem
IV. fizika–környezettan szakos hallgató

A *Fizikai Szemlé*ben megjelent *A radioaktivitás tanítása, társadalmi hatások* című cikk [1] olvasása során vetődtek fel bennem az alábbi gondolatok.

A *Radioaktivitás: a természet része* című vándorkiállítás az atommagfizikai ismeretek szerzésének és átadásának egy nagyon fontos, rendkívül látványos és emberközelí lehetsége. A kiállítás anyaga az utcáról bejövő laikus számára is közérthető nyelven fogalmazza meg a radioaktivitás lényegét és jelentőségét: „A radioaktivitás nyers természeti erő. A radioaktivitás a háborítatlan természet része. A radioaktivitás ablak az atommagok világára. A radioaktivitás a természet egyik gyógyító erőforrása. Titokzatos, mert érzékelhetetlen. Félelmetes, mert az emberek egymásra tudják szabadítani. Félelmetes, mert az ember önmagára tudja szabadítani.” [2]

„De a radioaktivitás megzabolázható.” [2] A bemutató talán legfontosabb gondolata ez, amit az emberek nagy része nem ismer. Pontosan nekik lenne nagyon hasznos a kiállítás beható és részletes tanulmányozása. Ehhez az kellene, hogy a kiállítás eljusson a lakóhelyükre, hogy ott megfelelő és hangos hírverés hatására látogatók sokasága ismerkedhessen meg a radioaktivitás fogalmával, titokzatos világával.

A kiállítás Debrecen (DE) és Budapest (ELTE – Műegyetem) városokon kívül járt még Baján, Hevesen, Pakson és Pécsen is. Az ötlet, hogy e tárlat Pécsre is eljusson, tőlem, fizika–környezettan szakos egyetemistától származott. A kiállítás szervezésében is főkolompos voltam. Tapasztalataim alapján szeretnék „receptet” adni azon lelkes fizikával foglalkozóknak (leginkább fizikatanároknak), akik érzik a téma ismeretlenségét és jelentőségét a társadalomban, továbbá képesek misszionáriusként hirdetni, terjeszteni az atomfizika igéit.

A kiállítás eredeti anyaga 10 tablóra épült és Nyugat-Európából származik. Ehhez lelkes debreceni fizikusok hozzátették mindazt, amit még városukban és az országban találtak. Ráadásként két új tablót készítettek, és még kísérleti eszközök sora is csalogatta a közönséget (odátogatókat, éppen arra járókat). Az egyik tabló a debreceni fizikaoktatást és kutatást mutatja be, a másik a tájékoztatlanok világában oly hírhedtté vált Paksi Atomerőműhöz kapcsolódik. Így hát 12-re bővült a „létszám”, melyek közül 11 tábla kétoldalas. A színpompás tablók impozáns méretűek: 260 cm magasak, 310 cm szélesek, emiatt szállításuk okozhatja a legnagyobb (anyagi) nehézséget. Ám ha több, egymáshoz közeli település összefog, akkor a Debrecenből történő szállítás költsége jelentősen csökkenthető (pl. Dombóvár, Kaposvár, Bonyhád vagy Győr, Sopron, Szombathely).

Mint említettem, a debreceniek hozzátették kísérleti eszközeiket is a kiállításához. Ezek közül a diffúziós ködkamra az, ami varázslatosan szemlélteti a mindenhol közünk, bennünk repledő részecskéket. A tablókkal együtt ez a nagyszerű (és nagyon drága) eszköz is kölcsönözhető

a DE Kísérleti Fizikai Tanszékétől. Hazánkban jelenleg három ilyen eszköz található. A legelső Pakson a Tájékoztató és Látogató Központ vásárolta meg. A harmadik nagyon fontos helyre került: a budapesti Csodák Palotájába (bár az ottani elrendezés pillanatnyilag nem szerencsés).

A tárlat apropóján minden kiállításra kerülhet, ami csak a témához és a fizikához kapcsolódik, esetleg helyi jelentősége is van. Pécsen jó lett volna, ha az uránbányászatról tudunk némi anyagot keríteni. Jó reklám lett volna a fizikának is. A *Fizika Évének* apropóján gondoltuk a kiállítást Pécsen megszervezni, de, ráadásul, a megnyitó ünnepség 2005. április 11-én volt, ami a költészet szempontjából sem közömbös dátum. Így a nyitó beszédben József Attila *Nézem a lámpát* című versének sorait is hallották az egybegyűltek, akik között az elvélve jelenlövő, éppen arra kószáló bölcsészek szeme hirtelen felcsillant: végre van valami, amit értenek.

Ha már kiállítást rendezünk, nagyon fontos szétkürtölni, hogy milyen fantasztikus látnivalóban lehet része az érdeklődőknek. Érdemes az összes fellelhető oktatási intézménynek és az ott tanító fizikatanároknak külön tájékoztatót küldeni, a helyi sajtót aktivizálni, esetleg elérni, hogy személyesen a polgármester nyissa meg a kiállítást.

Innentől kezdve pedig a fantáziára van bízva, hogy a különböző korosztályú és műveltségű látogatóknak milyen egyéb segítséget nyújthatunk a könnyebb megértéshez. Lényeges, hogy mindig legyenek fizikatanárok vagy lelkes diákok, akik akár kérdés nélkül is szívesen magyaráznak és tartanak tárlatvezetést, majd kísérleti bemutatót.

Érdemes úgy elhelyezni a kiállítást, hogy sokan láthassák, hogy óhatatlanul is feltűnjék a hatalmas, színes tablók serege. És a varázsdoboz, a ködkamra, melyben folyamatosan kondenzcsíkként jelenik meg a háttérsugárzás. Az egyetemi aula például éppen ilyen helynek bizonyult Pécsen. Ugyanis csak ezen áthaladva juthat el oktató, hallgató a könyvtárba, vagy az élet szempontjából még fontosabb helyre, az ebédlőbe is. Így a kiállításba való belebotlás garantált volt.



A bemutatót akár 2 hétig is érdemes „üzemeltetni” azok kedvéért, akikhez később jut el a híre, vagy akikben később fogalmazódnak meg kérdések és visszatérnének még nézelődni, kérdezni.

A kiállításához kapcsolódóan rendezhetünk középiskolásoknak vetélkedőt, készíthetünk kérdés- és feladatsort, amelyek helyes megválaszolóit jutalomban részesülnének. Ők a kérdések alapján „kénytelenek lennének” irányítottan végigolvasni, feldolgozni a tablókra írottakat. Általános iskolásokkal, ha van elég hely, eljátszhatjuk a felezési időt vagy a sugárzások intenzitásának csökkenését, áthaladási képességét.

A harcias, a média jóvoltából téves híreken nevelkedett felnőtt közönséghez pedig sok türelem kell. Ne feledjük: a felnőttnevelés is rendkívül fontos dolog!

Végül pedig, hogy legyen visszajelzés a fáradozásainkról, javasolom vendégkönyv nyitását, amelynek végigolvasása rendkívül tanulságos, és akár feldolgozni is érdemes (nemcsak szociológiai és helyesírási szempontból).

Ezekkel a gondolatokkal szeretnék lelkesíteni, bátorítani mindenkit a kiállítás megrendezésére, amellyel kapcsolatban a DE Kísérleti Fizikai Tanszékéhez, illetve az MTA Atommagkutató Intézetéhez kell fordulni. Kifejezetten a kiállításra (és kölcsönzésére) vonatkozó információk a <http://kisfiz.phys.klte.hu/Radioaktivitas2002> honlapon találhatók meg.

Irodalom

1. KIS T., PAPP Z. – Fiz. Szemle 55 (2005) 248
2. DEMÉNY A., LOVAS R., RAICS P., SIPOS A., SZEGEDI S., URAY I.: *Radioaktivitás: A természet része* (magyar változat)

DOKUMENTUM

2006. április 7-én a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem a közvetkező Közleményt adta ki a Magyar Távirati Irodának a médiában nagy nyilvánosságot kapott „vízautóról”:

A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem tájékoztatja a közvéleményt, hogy az egyetemünk két docente által kiadott szakvéleményeket megtévesztő módon használja fel a Vízenergia Alapítvány, amely társadalmi célú hirdetésekben kéri az adófizetőket, hogy adjuk 1%-ával is támogassák működését.

Nyomatékosan felhívjuk a figyelmet arra, hogy az alapítvány által kitűzött célok („... a víz nukleáris energiájának hasznosítása a robbanómotorok, kazánok, sugárhajtóművek, áramtermelő aggregátorok stb. üzemeltetésében.”) megvalósíthatóságát, vagy az ilyen elven készített

berendezés működőképességét igazoló szakvéleményt sem a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, sem munkatársai nem adtak ki. Ezzel szemben a munkatársaink által készített szakvélemények rámutatnak a célkitűzések indoklásának megfogalmazásában a természettudományos képtelenségekre.

Tekintettel arra, hogy az írott és elektronikus sajtóban már több cikk, interjú egyoldalúan, világszenzációnak állította be *Spanyol Zoltán* találmányát, a „vízhajtású autót”, kérjük a médiát, hogy álláspontunkat hozzák nyilvánosságra. További részleteket a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem PR Irodájától kérhetnek, illetve a Műegyetem honlapján találhatnak. (<http://www.bme.hu>)

BME PR Iroda
pr@mail.bme.hu

VÉLEMÉNYEK

AZ ENERGIAVÁLSÁG MELLÉKTERMÉKE

Gróf Spanyol Zoltán Egely típusú, halk szavú idősebb úr, akinek a megjelenése reményt kelt, hogy érdemes ezen a szeles, esős napon az ő előadását választani. Aki már olvasta egy vagy több előadását, nyilatkozatát (egy elég,

A *Fizikai Szemle* szerkesztő bizottsága 1972-ben hirdette meg *Vélemények* rovatát. A szerkesztő bizottság állásfoglalása alapján „a Fizikai Szemle feladatául vállalja, hogy teret nyit a fizika kutatására és oktatására vonatkozó véleményeknek, ha azok értékes gondolatokat tartalmaznak és építő szándékúak, függetlenül attól, hogy egyeznek-e a lap szerkesztőinek nézetével, vagy sem”. Ennek szellemében várjuk továbbra is olvasóink, a magyar fizikusok, fizikatanárok leveleit.

mert mindig ugyanazt mondja), abban már nem tud megjelenésével reményt kelteni, az inkább a közönségre fog figyelni. A mintegy ötven főnyi hallgatóság többsége idős férfi – a rendező Építéstudományi Egyesület tagságának megfelelően feltehetően mérnök vagy technikus. Voltak fiatal emberek is, akik kezdetben vehemensen védték a feltalálót, elutasították a működésre vonatkozóan kérdéseket feltevő akadémikusokat, szakmai irigységgel vádolva őket. A társaság egésze a jó ügyet támogatni gyűlt össze, kivéve az első székeket elfoglaló, grimaszoló, jegyzetelő fizikusokat.

Az előadás szövegét számos kiadványból bárki felolvashatta volna. Történetesen gróf Spanyol Zoltán mondta el, hihetetlenül alacsony színvonalú technikai halandzsát produkálva, amiben valószínűleg ő maga sem hisz, ezért jelszavának az „aki magyar velem tart” szlogent választotta. A szakmai elemet az *Ég a víz* című bemutató helyettesítette, amelynek egyik mozzanatát az ő elloptott találmányának felhasználása, egy titokzatos körülmények között beszerzett orosz hegesztőpisztoly működtetése jelentette, a másikat pedig, hogy a magas hőmérsékletű lánggal bárki kilyukasztotta az erre a célra rendelkezésre bocsátott fémlapot. Öreg ember nem vén ember, szívesen játszik a tűzzel – ezt bizonyította, hogy szinte mindenki igyekezett kézbe venni a 2,5 kW-os eszközt, és elismerő fejcsóválások közepette lyukasztgattak. Spanyol úr szándékai szerint ezzel véget is érhetett volna a bemutató, jöhettek volna a pénzbeli felajánlások. De ott voltak a türelmetlenül ágaskodó fizikusok.

Miután az előadó már az elején figyelmeztette a hallgatóságot, hogy hatályos szabadságot bírálni, megkérdőjelezni bűntény, nem csodálkozhattunk, hogy az ELTE fizikus docensének igen gondosan megfogalmazott tárgy-szerű kérdését a válaszadás megkísérlése nélkül utasította el. Ezt az elutasítást szolgálta a rendező, lebonyolító személyzet vitavezetése is, szerencsére nem kellő eréllyel. Spanyol úrnak csak a megsértődés maradt, de az is csak rutinból, a rendszeres előadások megedzették, minden emóció nélkül kért ki magának minden ellenvetést. Arra a nem közvetlenül szakmai kérdésre, hogy miért használja jogosulatlanul a Műegyetem szakvéleményét, annak támogató jellegét sugallva, tartalmát elhallgatva – nos, erre a kérdésre felkészült. Felolvasta írásban már elküldött válaszát, miszerint hat évvel ezelőtt a Földművelésügyi Minisztérium egyeztető ülésén ellenvetés nélkül álltak a víz-

autó mellé a szakértők, csak később, milliárdos ígérettel tántorították el az igaz állásponttól a műegyetemi fizikust.

Eddigre azonban a sok feltett és megválaszolatlan kérdés hatására a hallgatóság égő vizet ünneplő szándéka legalább is elbizonytalanodott. A filmrendező, akinek számára vagy politikai, vagy emberi érdekességet ígért Spanyol, a meg nem értett hazafi, már csak azt sajnálta, hogy ha ennyire értéktelen a vízautóban rejlő lehetőség, akkor ez nem társadalmi–személyiségi konfliktus, hanem csak egy a sok patológiás eset közül.

A hivatalos zárás után nehezen oszlott a közönség, és érdekes módon több érdeklődő vette körül az előadásra látszólag aránytalan vehemenciával reagáló fizikusokat, mint az előadót. Sajnos az ember hamar felejt, még a mérnök számára is jól jön az alapvető atomfizikai fogalmak átismétlése, a filmrendező pedig csak megérezni képes az aránytalanságot az állítólagos világtalálmány és a valóságos semmi között. Lassanként azt is el lehetett fogadtatni, hogy egy szabadságom önmagában nem szavatolja a szabadalmazott termék működését, ahogy az sem feltétlenül költő, akinek megjelent egy versesköte.

Spanyol úr nem látszik ártatlan feltalálónak, aki egyszerűen eltúlozza találmánya jelentőségét. Jól kiszámított hadjáratot folytat a pénzért és hírért, amely során joggal számíthat az emberek természettudományi, műszaki ismereteinek hézagosságára, bár a fizikai halandzsát üzhethető magasabb színvonalon. A sikeres látszathoz tartozik a meglévő német szabadság és az a valami a kezében, ami csiribí-csiribá, vízből tüzet csíhol. Nem összetartozó elemek, de alkalmasak a figyelemkeltésre, és akinek mindez nem elég, annak számára ott a Szent Korona és a jelszó, hogy „aki magyar velem tart.”

Füstöss László
BME Fizikai Intézet

AZ EMELT SZINTŰ ÉRETTSÉGIRŐL

Tél Tamás
ELTE, Elméleti Fizikai Tanszék

Június elején lehetőségem nyílt arra, hogy az ELTE megfigyelőjeként az egyik vizsgaközpontban részt vehessek az emelt szintű fizikaérettségi szóbeli vizsgáján, melynek része egy kísérlet elvégzése is. A lehetőséget örömmel fogadtam, mert néhány furcsaságot már az első, tavalyi vizsgával kapcsolatban is hallottam, és kíváncsian vártam, változott-e valami.

Előjáróban le szeretném szögezni, hogy az általam látott vizsga előkészítése, lebonyolítása, nyugodt légköre kifogástalan volt, a végighallgatott néhány diák sokat tudott, az eszközöket helyesen használta. Egy ilyen jellegű, kísérlet elvégzését és kiértékelését is igénylő érettségi forma feltétlenül hasznos, de nem a jelen előírások szellemében.

Az emelt szintű vizsga 20 tételének címét és a tételekhez kapcsolódó kísérleti feladatokat az Oktatási Minisztérium megbízásából az Országos Közoktatási Értékelési és Vizsgaközpont határozza meg. A fizikatételeket összeállító csoport személyi összetételét nem ismerem. Mondják, hogy a tételek címe megtalálható a OM honlapján (www.om.hu),

nekem nem sikerült. Elérhető viszont *Jubász András és Görbe László* hasznos kiadványa [1], mellyel a diákokat felkészítő tanárkollégáikat segítik a kísérletek leírásával és egy lehetséges mérés eredményeinek bemutatásával. Az általuk közölt címek megegyeznek az érettségi méréseivel, az alkérdések viszont csak az érettségi napján válnak ismertté (de utána sem nyilvánosak!).

A vizsgán feltűnik, hogy minden tételhez tartozik egy fizikatörténeti alkérdés, *egyetlen* (magyar vagy külföldi) fizikus neve, akinek munkásságát a diáknak röviden be kell mutatnia. Kérem a tisztelt Olvasót, gondolkozzon el azon, hogy kinek a nevét érzi természetesenek a 6. számú tétel, *A termodinamika főtételei* címhez kapcsolódóan. Majd nézze meg, hogy kinek a munkásságát kéri¹ a 2006.

¹ Teller Edét. A helyszínen olvasható útmutató szerint arra való hivatkozással, hogy doktori (vagy szakdolgozatát) a II. főtételnek az emberi intelligenciára való alkalmazásáról írta. De miért (és honnan) kellene erről tudnia egy érettségizőnek?

évi érettségi előírás. Ez nem az egyetlen ilyen eset, emlékszem például, hogy *Galilei* a hőtágulás (és csak annak!) kapcsán kerül elő.

A bizottságnak minden feleletet ugyanazon merev szempontrendszer szerint kell értékelnie, melynek egy vagy két pontja igazodik a tételhez, az összes többi minden esetben *azonos*. Így például a méréshez kapcsolódva mindig megjelenik a *Táblázat készítése* rovat, melyre a maximális pontszám (50) 10%-a adható. (És, aki nem készít táblázatot?) Olyan rovat viszont nincs, hogy hibaforrások, hibabecslés. Szerencsére a jobbak mondják maguktól.

A legsúlyosabb problémát a *Modern fizika* hat tételéhez rendelt kísérletekben, és az általuk sugallt szemléletben látom. A 16., *Az atom szerkezete* tételhez tartozó kísérlet kitalálására nem is kérem az Olvasót, mert biztos vagyok benne, hogy az lehetetlen. Ez ugyanis *A csúszási együtt-batoló mérése vízszintes talajon* címet viseli. Természetesen fel lehet hozni körmönfont gondolatmeneteket, melyek a két dolgot összekapcsolják, de a kísérleti asztal képe meg lehetősen groteszk, sőt abszurd: „Az atom szerkezete” felirat mellett az eszközök: fahasáb, rugós erőmérő, smirgli-papír. Mitől modern ez egy józan 18 éves szemében?

Nem jobb a helyzet a 17., *Magfizika* tétellel sem. A kísérlet címe: *Izzólámpa ellenállásának vizsgálata*. Itt gondolatban elkalandozhatunk a feketetest sugárzás irányába, ami ugyan nem magfizika, de legalább csak(!) 106 éves. Mire gondoljon viszont az érettségiző, aki számára ez nem tananyag?

A többi, kommentár nélkül: A 15., *Az anyag kettős természet* tétel kísérlete: *A hang sebességének mérése állóhullámokkal*. A 19., *Csillagászat* tétel: *Az üveg törésmutatója Hartl-korong segítségével*, és a 20., *A gravitáció* (ne feledjük, a *Modern fizika*, vagy legalábbis a csillagászat tárgykörben vagyunk) tétel: *A nehezégi gyorsulás értékének meghatározása fonálingával*. A 6 „modern” tételből

egyedül a 18., *A fény* esetén találunk a témához természetesen illeszkedő kísérletet, *A fényelhajlás jelensége* címűt.

A tételsor összeállítói szemmel láthatóan annak a *lát-szatát* akarták kelteni, hogy a modern fizika (ami szerintük atomfizika, magfizika, gravitáció, csillagászat) nagy súllyal szerepel a középiskolai oktatásban, azzal a *meg-szorítással* kombinálva, hogy nehogy a vizsgáztató tanárok kimutathassák, hogy a megfelelő műszerek hiányoznak a szertárból. A 20 tételből a 6 „modern” (30%) nem tükrözi a témára szánt valós oktatási idő arányát, mert az jóval kisebb. Másrészt viszont egy-két okosan megválasztott tényleg modern(ebb) témájú fizikai mérést azért a meglevő műszerekkel is meg lehetne valósítani. Ráadásul, ez már két éve megy így. A kísérletek egyharmada 2006-ra módosult, de a modern részben semmilyen változás nem történt (v.ö. [2]).

Ne feledjük, hogy egyes gimnáziumi kémiakönyvek (pl. [3]) az egész kvantummechanikát, a Hund-szabályig(!) bezárólag, elmondják (persze nem sokat lehet abból érteni). De nem magunkat (tudományunkat) járatjuk-e le, ha ezután az emelt szinten érettségiző a modern fizika ürügyén ingával, üvegkoronggal, tolóellenállással stb. kísérletezik?

Javaslom, hogy a *fizikusi-tanári közösség közös véleményét az ügyben sürgősen alakítsa ki, és az oktatási tárcánál érje el, hogy azt figyelembe is vegye*.

A tárgyi szegénység végül is nem szégyen, de a szellemi igénytelenség az.

Irodalom

1. JUHÁSZ A., GÖRBE L.: *A 2006. évi emelt szintű fizika érettségi kísérleti feladatai* – Öveges József Tanáregylet, Budapest, 2005.
2. JUHÁSZ A., GÖRBE L.: *Emelt szintű fizika érettségi kísérleti feladatai 2005* – Öveges József Tanáregylet, Budapest, 2004.
3. NADRÁINÉ HORVÁTH K.: *Kémia II, a reál érdeklődésű diákok számára* – Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1997.

PÁLYÁZATOK

PÁLYÁZAT KÍSÉRLETI FIZIKÁBÓL

A Szegedi Tudományegyetem *Kísérleti Fizikai Tanszéke* a 2006/2007-es tanévre pályázatot hirdet középiskolás diákok (9–12. évfolyam) számára

Kísérletek a bangtan témaköréből címmel.

A pályázat kétfordulós, az első fordulóban a kísérlet lényegét leíró dolgozattal lehet részt venni. A beadott munkában (amely tartalmazhat fotókat, rajzokat, táblázatokat, grafikonokat stb. is) vázolni kell a nem, vagy kevésbé ismert kísérletek elvégzésének menetét, az alkalmazott módszereket. A pályamunkában fel kell tüntetni a felhasznált forrásmunkákat is. A pályázatokat szakmai zsűri értékeli. A legjobb dolgozatot készítőket jutnak a második fordulóba, ahol a kísérleteket „élőben” is be kell mutatni a zsűri előtt. A pályázatok végső sorrendjét a bemutatás után állapítja meg a zsűri.

Pályázni lehet egyénileg, vagy 2 fős „csapattal”.

A pályázat díjai: I. díj: 25 000.- Ft, II. díj: 15 000.- Ft, III. díj: 10 000.- Ft. A helyezettek munkáját oklevéllel is elismerjük. A konzultáló, illetve felkészítő tanár a díjazott diák(ok)éval megegyező értékű jutalomban részesül.

A dolgozatot két példányban kell benyújtani, a *maximális terjedelem 10 oldal* lehet. A pályázat jelíges, ezért a *dolgozaton csak a jelíget szabad feltüntetni*. A pályázó(k) adatait zárt, a dolgozat jelígéjével ellátott borítékban mellékelni kell:

1. a pályázó(k): név, lakcím, telefonszám, e-mailcím,
2. a pályázó(k) iskolája: név, cím, telefonszám, e-mailcím és
3. a felkészítő tanár neve.

A pályázatot – a tartalmi és a formai követelmények betartásával – *Szatmári Sándor* tanszékvezető egyetemi tanár, SZTE Kísérleti Fizikai Tanszék, 6720 Szeged, Dóm tér 9. címére kérjük küldeni „Pályázat kísérleti fizikából” megjelöléssel. *Beküldési határidő*: 2007. január 15.

(A 2. forduló megtartására ezt követően körülbelül másfél hónap múlva kerül sor.)

A pályázattal kapcsolatos további kérdésekre válasz kérhető *Nánai László* egyetemi tanártól (tel.: 62/544-359, 544-731, e-mail: nanai@physx.u-szeged.hu).

ÁLLÁSHIRDETÉS

Elméleti számításokban jártas, *post-doc szintű fizikust keresünk az MFA Vékonyréteg-fizika Osztályára*. A sikeres pályázó feladata lesz az osztályon folyó kísérleti munkához kapcsolódó, az osztályon új, elméleti számítások meghonosítása (projekt elnyerése, vezetése, PhD-hallgatók képzésében részvétel). A pályázó eddigi háttérétől függően több, alternatív tematika jön szóba: 1) réteg-épülés atomi folyamatai, 2) molekulár-dinamikai szerkezet-relaxáció, 3) sávszerkezet-számítás EELS és egyéb fizikai mérések értelmezéséhez, 4) Reverse Monte Carlo és elektrodiffrakció alapú szerkezetmodell optimalizálás.

Közalkalmazotti bérezés a kutatókra vonatkozó tábla szerint. Hat hónap határozott idejű szerződés után határozatlan idejű közalkalmazotti alkalmazás lehetséges. Besorolás eddigi teljesítmény alapján, a kutatókra vonatkozó szabályok szerint. Az első hat hónapban az elvárás, hogy

az osztály többi kutatójával együttműködve egy (kutatási pénzért való pályázásra alkalmas) kutatási projektet dolgozzon ki, illetve (egy feladat sikeres megoldásával) demonstrálja, hogy a szükséges számítási technikát hatékonyan tudja használni. Munkáját egy tucat tapasztalt kísérleti kutatóból, 2–3 számítási munkát végző kutatóból és néhány PhD-hallgatóból álló csapat részeként végzi majd.

Fontos elvárt tulajdonságok: csapatmunkára való készség mellett önálló feladat megfogalmazás, önálló munkavégzés készsége.

Jelentkezés (szakmai önéletrajz, publikációs lista, hivatkozási lista): *Lábár János*, DSc, tudományos osztályvezető, Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet (MFA) Vékonyréteg-fizika Osztály, 1121 Budapest, Konkoly-Thege M. u. 29–33 (KFKI telephely), e-mail: labar@mfa.kfki.hu, tel.: (1) 392-26-92.

HÍREK – ESEMÉNYEK

AZ AKADÉMIAI ÉLET HÍREI

A Magyar Tudomány Ünnepe

A Magyar Tudomány Ünnepe 2006. évi rendezvénysorozata a november 3. és november 30. közötti időszakban országsszerte több száz tudományos és ismeretterjesztő programot ölel fel valamennyi tudományterületen. Központi téma: evolúció – fejlődés – revolúció.

A rendezvénysorozat eseményei az MTA Kommunikációs Titkárságán készülő Programfüzetben és a Magyar Tudomány Ünnepe honlapján jelennek majd meg. A rendezvények adatainak összegyűjtése a fejezetszerkesztők feladata. A rendezvényekkel kapcsolatos információkat a fe-

jezetszerkesztők juttatják el az MTA Kommunikációs Titkárságára. (Ajánlat, MTÜ 2006, a fesztivál honlapja: www.tudomanyunnep.hu.) Amennyiben rendezvényszervezőként csatlakozni kíván a programsorozathoz, vegye föl a kapcsolatot az intézményét képviselő fejezetszerkesztővel.

A programok bejelentésének határideje a füzetbe kerülő programok esetében 2006. július 15., további programok 2006. augusztus 21-ig tölthetők fel, ám a július 15. után bejelentett eseményeknek csak a honlapon való publikálása lehetséges.

MTA–CEA együttműködési megállapodás

Az MTA és a CEA (Fancia Atomenergia Ügynökség, Commissariat à l’Energie Atomique) közti tudományos együttműködési keretszerződést írt alá 2006. május 16-án *Vizi E. Szilveszter*, az MTA elnöke és *Jean-Pierre Le Roux*, a CEA főigazgató-helyettese. A szerződésben megfogalma-

zott együttműködés fő területei széles spektrumban a nukleáris energetika (reaktorbiztonsági és technológiai problémáktól fúziós és részecskefizikai alap kutatásokig), valamint az információs- és egészségügyi technológiák (nanotechnológiától a biotechnológiáig).

A Max Planck Társaság delegációjának látogatása az MTA-n

Vizi E. Szilveszter, a Magyar Tudományos Akadémia elnöke, *Kroó Norbert* alelnök és *Meskó Attila* főtítkár május 11-én fogadta a tudományos alapkutatókat Németországban koordináló Max Planck Társaság négy főből álló delegációját, melyet *Barbara Bludau* asszony, a Társaság főtítkára vezetett. A résztvevők az intézményközi kapcsolatok erősítésének lehetőségeiről és

egy együttműködési megállapodás előkészítéséről tárgyaltak. Egyetértettek abban, hogy az alapkutatók minden ország számára nélkülözhetetlen a fenntartható gazdasági fejlődéshez. A két tudományos intézmény között már hosszú ideje intenzív kapcsolat van. Együttműködésük tervezett továbbfejlesztésének fő területe a fiatal kutatók támogatása.

Bolyai Nap 2006

Június 28-án rendezték a 2006. évi Bolyai Napot. A köszöntőket követően átadták a Bolyai-plaketteket, az emléklapokat és a Bolyai-Kelly-ösztöndíjat.

A Bolyai-plakett idei kitüntetettjei: BÁRÁNY ATTILA PÁL, BRATEK ZOLTÁN, CINKLER TIBOR, GAJDA TAMÁS PÁL, KAPÁS JUDIT, KISS JÁNOS, KISS TAMÁS ZOLTÁN, KOVÁCS TAMÁS

GYÖRGY, LUKÁCS JÁNOS, MOLNÁR LAJOS GÁBOR, PADÁNYI JÓZSEF, PETŐ ANDREA MARGIT, STIPSICZ ANDRÁS, TÓKÉSI KÁROLY MIKLÓS, TUSNÁDY GÁBOR.

A 2006. évi Bolyai-Kelly-ösztöndíjat BÁTKAI ANDRÁS matematikus, vehette át *Henri Koerhuistól*, a Kelly Services kelet-európai regionális igazgatójától.

A TÁRSULATI ÉLET HÍREI

Nanofizika és nanotechnológia őszi iskola

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat Diffrakciós Szakcsoportja és Anyagtudományi Szakcsoportja ebben az évben közösen rendezi meg Őszi Iskoláját *Nanofizika és nanotechnológia* címmel.

Az Őszi Iskola 2006. szeptember 25-én, hétfőn ebéddel kezdődik és 2006. szeptember 27-én, szerdán délután zárul.

Helye: MÁTRA OÁZIS Oktatási, Üdültetési és Vendéglátó Kkt., 3036 Gyöngyöstarján, Sósret (Borky kastély).

Az iskola célja: Nanofizikával és nanotechnológiával kapcsolatos alapelvek és saját kutatások ismertetése.

Részvételre és előadásokkal 2006. július 23-ig *Szabó István*-nál (iaszabo@tigris.klte.hu) és *Tichy Géza*-nál (tichy@ludens.elte.hu) lehet jelentkezni.

Az ELFT Vákuumfizikai, -technológiai és Alkalmazásai Szakcsoportjának szemináriumai 2006. II. félévben

Az előadások Eötvös Társulatban, Budapest, II. Fő u. 68. II. em. 222. szoba lesznek.

November 7., kedd, 14 óra:

Gergely György (MFA, Budapest): 25 éves a Rugalmas Elektron Szórás Spektrometria (EPES). Kvantitatív EPES

December 12., kedd, 14 óra:

Langer Gábor (DE Szilárdtest Fizikai Tanszék): Diffúzió vizsgálata SNMS-sel

Katona Gábor (ATOMKI, Debrecen): Mélységi profil és elemkoncentráció meghatározása SNMS-sel

Vákuumfizikai szeminárium 2006. május 9-én

Szemináriumainkat évek óta egy-két havi rendszerességgel tartjuk. Helye többnyire az ELFT-nek helyt adó MTESZ székház, de nagy sikere van kihelyezett üléseinknek is, amelyek alkalmával az előadás(ok) tárgyköréhez kapcsolódóan laborlátogatáson tekinthetjük meg a műszeres hátteret. Az elmúlt két félévben így megismerhet-

tük a BME Atomfizikai Tanszék Felületfizikai Laboratóriumát, a MTA KFKI RMKI új molekulásugaras epitaxia-berendezését, a MTA MFA elektronmikroszkópos laboratóriumát és Szegeden a MTA Reakciókinetikai Kutatócsoportjának berendezéseit. Szemináriumaink tematikája nem korlátozódik a vákuum előállítása és mérése tárgy-

körére, hanem átfogja a vákuumot alkalmazó tudományterületeket és technikákat, így például a felülettudományt, vékonyrétegeket, nanoszerkezeteket, plazmafizikát stb. Lehetőséget adunk fiatal kutatók bemutatkozására, nagy elődeinkről szóló emlékülésekre, új eredmények bemutatására vagy éppen témaköröket áttekintő előadásokra is. Májusi, félévzáró szemináriumunkon az MFA két fiatal kutatója, *Szedlacsek Katalin* és *Kovács György* tartott előadást fém-szén nanokompozitok kialakulásáról, szerkezetéről, mechanikai, elektromos és spektroszkópiai tulajdonságairól. Szemináriumainkat alkalmanként eddig is közösen rendeztük társ-szakcsoportokkal, akadémiai bizottságokkal. Az átfedések elkerülése és a hatékonyabb munka érdekében szakcsoportunk és a Vékonyrétegfizikai Szakcsoport megszavazta egyesülését, amelyet az ELFT májusi küldöttközgyűlése jóváhagyott. Ősztől már az új közös szakcsoport munkája kezdődik el. Szeptemberben Prágában kerül sor a társrendezésünkkel két évente tartott Joint Vacuum Conference 11. alkalmára. Ez a környező országok vákuummal kapcsolatos tudományterületeinek nemzetközi konferenciája.

Az alábbiakban két, a Szemináriumon elhangzott előadás rövid összefoglalását közöljük.

Bobátka Sándor
a Vákuumfizikai Szakcsoport elnöke

Fém-szén nanokompozit vékonyrétegek

K. Sedláčková, MTA MFA, Budapest,
Elektrotechn. Int., Bratislava
P. Lobotka, Elektrotechn. Int., Bratislava
T. Újvári, Kémiai Kutatóközpont, Budapest
Zs. Cigány, MTA MFA, Budapest
I. Vávra, Elektrotechn. Int., Bratislava
I. Bertóti, Kémiai Kutatóközpont, Budapest
Gy. Radnóczy, MTA MFA, Budapest

A nanokompozit vékonyrétegek nagyon ígéretes anyagok fizikai, mágneses, strukturális, elektromos és optikai tulajdonságaik miatt, de potenciális felhasználásuk szempontjából is. Az előadásban megismerkedünk az egyes nanokompozit anyagok fizikai és strukturális tulajdonságaival, melyeket dc magnetron porlasztással és párologtatással UHV körülmények között készítettünk. A minták fém nanorészecskékből (Ni_3C és Ni) és szénmátrixból állnak.

A bemutatott nanokompozit vékonyrétegeket transzmissziós elektronmikroszkóppal (TEM) és nagyfeloldású elektronmikroszkóppal (HREM) vizsgáltuk. A C–Ni nanokompozit vékonyrétegek 15 W nikkelt-magnetron teljesítménnyel és 150 W szén-magnetron teljesítménnyel készültek több hordozó hőmérsékleten (25–800 °C). Az EDS összetétel-analízis kimutatta, hogy a rétegek 18 at. % nikkelt és 82 at. % szenet tartalmaznak. A kristályos fázis a rétegekben 400 °C alatt hexagonális oszlopos Ni_3C , 400 °C fölött globuláris fcc Ni. A szén mátrix szerkezete változik a növesztési hőmérséklettel. 25–200 °C 1–2 nm vastag rendezetlen szén, 400–800 °C 2–15 nm vastag rendezett grafit típusú amorf szén [1, 2]. Az oszlopos szerkezetű C–Ni minták elektromos vezetőképesége alagúteffek-

tust mutat, mivel a szénmátrix nagyobb része rendezetlen. Azokban a mintákban (400 °C-tól), ahol a mátrix grafitos az elektromos vezetés fémes jellegű. A mért maximális keménység 11–14 GPa és a legnagyobb rugalmasági modulus 120–130 GPa a 200 °C előállítású oszlopos szerkezetű mintán mérhető, mely a több szerkezeti elem együttes hatásának köszönhető.

A kutatás az EU New Fullerene-like Materials HPRN-CT-2002-00209 számú projektje támogatta. Katarína Sedláčková személyesen is köszöni a fenti projekt támogatását.

Irodalom

1. G. RADNÓCZI, GY. J. KOVÁCS, G. SÁFRÁN, K. SEDLÁČKOVÁ et al., O. N. SENKOV et al. (eds.): *Metallic Materials with High Structural Efficiency* – Kluwer Academic Publisher 2004, 101–112
2. K. SEDLÁČKOVÁ, P. LOBOTKA, I. VÁVRA, G. RADNÓCZI – Carbon 43 (2005) 2192–2198

Szén+nikkel és szén-nitrid+nikkel nanokompozit rétegek szerkezete és spektroszkópiai tulajdonságai

Kovács György János, MTA MFA

Az MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézetében (MTA MFA) szén+nikkel, illetve szén-nitrid+nikkel nanokompozit vékonyrétegek előállításával és vizsgálatával foglalkozom. A nanokompozit rétegek egyenáramú magnetronos porlasztással készülnek, egymástól független teljesítményvezérelt szén- és nikkelforrásokkal. A porlasztás tiszta argon, illetve tiszta nitrogén gázokkal történik. Utóbbi esetben a nitrogén atomos formában beépül a rétegekbe, így keletkeznek a szén-nitrid+nikkel rétegek. A rétegekben a nikkelt a kristályos diszperz fázis (ez a körülményektől függően nikkelt vagy nikkelt-karbid), míg a szén elsősorban a mátrixot építi fel. Amire kíváncsiak voltunk:

- Hogyan növekednek a rétegek, milyen a kialakult szerkezet és morfológia a növekedési hőmérséklet függvényében?

- Milyen mechanikai és elektromos tulajdonságokkal rendelkeznek a rétegek a növekedési hőmérséklet függvényében?

- Tudunk-e kapcsolatot teremteni a szerkezet és a tulajdonságok között, illetve mit tudhatunk meg az atomi szerkezetéről, a kötésekről (elsősorban a mátrixban)?

A kapott rétegeket transzmissziós elektron-mikroszkópiával (TEM), ennek nagyfeloldású változatával (HRTEM), és több más módszerrel (nanoindentáció, STM, STS, EDS, EELS, Raman-spektroszkópia) vizsgáltuk. A nanoindentáció elsősorban a mechanikai tulajdonságok megismerésére irányul, úgymint a keménység, Young-modulus, elasztikus helyreállítás (elastic recovery) és a sűrűlátsági együttható mérésére. A pásztázó alagút-mikroszkópia (STM) a felületi morfológia megismerésére szolgál. Az STM-mel lehetséges a rétegek felületének egyes pontjaiban feszültség-áram karakterisztikák felvétele, ez az úgynevezett pásztázó alagút-spektroszkópia (STS) a lokális elektromos tulajdonságokról, sáv szerkezetéről szolgáltat információkat. A TEM-ben az elektronok által a mintában keltett karakterisztikus

röntgensugárzást felhasználó energiadisziperzív röntgenspektroszkópia (EDS) az atomi összetételről ad számot. Ugyanezt lokálisan, nanométeres felbontással tehetjük meg elektronenergia veszteségi spektroszkópiával (EELS). Az EELS ezen kívül alkalmasnak bizonyult ugyanilyen térfelbontás mellett él-finomszerkezeti analízis végzésére is, amelyből a kötésviszonyok, illetve a sáv szerkezet változásaira lehet következtetni. A Raman-spektroszkópia igen erőteljes eszköznek bizonyult a mátrix tulajdonságainak megismerésére.

A HRTEM és Raman-vizsgálataink kimutatták, hogy a nanokompozit rétegekben a szén/szén-nitrid kétfajta sp^2 -típusú rendeződést mutat. Megfelelő körülmények között a mátrix fullerénszerű héjakba szerveződik a diszperz fázis szemcséi körül. E mellett, magasabb növekedési hőmérsékleteken egy hosszabb távú, az üvegszerű szénre (glassy carbon) jellemző hosszútávú réteges/grafénes jellegű rendeződés is kialakul. A kétfajta rendeződés között lényeges eltérés, hogy a fullerénes rendeződésben szén-ötszögek is nagy számban vannak a héjakban, szemben a grafénes jellegű rendeződéssel, mely többségében hatszögekből álló szerkezetet jelent. A diszperz fázis szemcséi körüli fullerénes rendeződés egyrészt geometriai kényszerre, másrészt a mátrix és a nikkel/nikkel-

karbid közötti határfelületi kölcsönhatásra vezethető vissza. A határfelületi kölcsönhatás meglétét a lokális EELS vizsgálatok és ab initio számolások egyértelműen bizonyítják. A további vizsgálatokkal, elsősorban Raman-spektroszkópiával sikerült tisztázni a nitrogén beépülési mechanizmusát és szerepét a szerkezet és a tulajdonságok kialakításában. Bizonyítást nyert, hogy alacsony növekedési hőmérsékletek mellett a nitrogén főleg sp -kötésben, nitril és izonitril csoportként épül be a rétegbe, míg kisebb mennyiségben sp^2 - és sp^3 -kötésekkel. Magasabb növekedési hőmérsékleteken feltehetőleg megszűnik az sp -beépülés, és azt tisztán sp^2 -beépülés váltja fel.

Kapcsolódó publikációk

- GY.J. KOVÁCS, G. SÁFRÁN, O. GESZTI, T. UJVÁRI, I. BERTÓTI, G. RADNÓCZI: *Structure and mechanical properties of carbon-nickel and CN_x -Ni nanocomposite films* – Surface and Coatings Technology 180–181 (2004) 331–334
- T. UJVÁRI, A. TÓTH, GY.J. KOVÁCS, G. SÁFRÁN, O. GESZTI, G. RADNÓCZI, I. BERTÓTI: *Composition, Structure and Mechanical Property Analysis of DC Sputtered C-Ni and CN_x -Ni Nanocomposite Layers* – Surface and Interface Analysis 36 (2004) 760–764
- GY.J. KOVÁCS, A. KOÓS, G. BERTONI, G. SÁFRÁN, O. GESZTI, V. SERIN, C. COLLIEX, G. RADNÓCZI: *Structure and spectroscopic properties of C-Ni and CN_x -Ni nanocomposite films* – Journal of Applied Physics 98 (2005) 034313

HÍREK A NAGYVILÁGBÓL

Új módszer galliumnitrid-kristályok növesztésére

A Los Alamos Nemzeti Laboratórium egy kutatócsoportja új módszert dolgozott ki kristályos galliumnitrid-rétegek létrehozására az eddig használatos ipari eljárásokénál sokkal alacsonyabb hőmérsékleten. A magas hőmérséklet és az egyéb zavaró kémiai körülmények kiiktatása, amely jelenleg a különféle alapanyagok használatát erősen korlátozza, megnyitja a lehetőségeket a galliumnitrid-rétegek széles körű használata előtt

az optikai-elektronikai műszerekben, mint például kék LED-ek és lézerdiodák, nagy sűrűségű optikai adattárolók, lapos képernyőjű kijelzők és egyéb szilárdtest-fényforrások. Az *Applied Physics Letters*-ben közzétett kutatásokban a Laboratórium ENABLE elnevezésű litográfiás berendezését használták, amely alacsony kinetikus energiájú semleges atomnyalábokkal dolgozik.

(www.lanl.gov)

Ezüstizotóp egzotikus radioaktivitása

Közismert, hogy az 1896-ban *Henri Becquerel* által felfedezett radioaktivitásnál a bomló atommagok hélium-atommagokat (alfa-sugárzás), elektronokat (béta-sugárzás) és fotonokat (gamma-sugárzás) sugároznak ki. 1960-ban jósolták meg először, hogy protonokban gazdag, páros vagy páratlan rendszámú atommagok egy vagy két proton kibocsátásával is elbomolhatnak. Az egyproton-radioaktivitást végül 1981-ben sikerült kimutatni, míg a kétproton-radioaktivitás első kísérleti bizonyítékát 2002-ben sikerült megtalálni a ^{45}Fe atommag bomlásánál.

A darmstadti GSI (Gesellschaft für Schwerionenforschung) intézetben dolgozó nemzetközi kutatócsoport

Ivan Mukha és *Ernst Roeckl* vezetésével az ezüst 94-es izotópjának bomlását tanulmányozva először figyelte meg kísérletileg a mag egy- és kétprotonos radioaktivitását. A ^{94}Ag radioaktív egzotikus atommagot ^{40}Ca és ^{58}Ni atommagok ütköztetésével hozták létre a GSI gyorsítójával. A kutatók a kétproton-radioaktivitást az ezüst-izotóp igen nagy, szivar alakú (prolate) deformációjával magyarázzák, amely megkönnyíti, hogy a „szivar” két végéről protonok váljanak le. A szimultán kétproton-kibocsátást az ^{94}Ag atommag hosszú élettartamú (0,4 s) nagyspinű (21+) gerjesztett állapotából regisztrálták, amely egy proton kibocsátásával is bomlik.

(www.nature.com)

Új és biztonságosabb reaktor-fűtőanyagok

Az Argonne Nemzeti Laboratórium RERTR (Reduced Enrichment for Research and Test Reactors) kutatási programja keretében olyan reaktor-fűtőanyagokat dolgoznak ki, amelyek alacsonyabb dúsításúak (LEU, Low Enrichment Uranium, alacsony urándúsítású), és a fűtőanyag ezért nem használható fel közvetlenül atomfegyverek előállítására. A program alapvető célja olyan technológia kifejlesztése, amely minimalizálja, végül pedig teljesen kiküszöböli magasan dúsított urán (HEU, Highly Enriched Uranium) fűtőanyag használatát polgári célú atomenergetikai alkalmazásokban.

A laboratórium kutatói szoros együttműködésben dolgoznak az Energiaügyi Minisztériummal (Department of Energy, DOE), a Nukleáris Ellenőrző Bizottsággal (Nuclear Regulatory Commission) valamint a Nemzetközi Atom-

energia Ügynökséggel (IAEA). A kifejlesztett fűtőanyag urántartalma négyszerese a hagyományosénak, azonban az urán 238-as izotópját tartalmazza, amely neutronokkal bombázva csak igen kis valószínűséggel hasad, ezért atomfegyver előállítására nem alkalmas.

A világon jelenleg több mint 150 kutatóreaktor használ dúsított fűtőanyagot orvosi terápiás célokra és izotópok előállítására egyetemi és nemzeti kutatóközpontokban az Egyesült Államokban és sok más országban, mint például Kazahsztánban, Kínában, Oroszországban, Ghánában, Líbiában és Hollandiában. A kutatási program kezdete, 1978 óta 23 országban 43 reaktor állt át alacsony dúsítású fűtőanyagra, köztük Líbiában is. A tervek szerint az új fűtőanyag használata csökkenti a nukleáris fegyverek elterjedésének a veszélyét. (www.anl.gov)

Támadás alatt a tudomány

Az American Association for the Advancement of Science (AAAS) éves közgyűlésén a tudósok kifejezték elégedetlenségüket a Bush-adminisztráció tudománypolitikájával szemben. Az Union of Concerned Scientists vitát szervezett azzal kapcsolatban, hogy a kormány politikai vezetői megkísérelték a tudósok szólásszabadságát korlátozni, különös tekintettel *James Hansen* klimatológus esetére, akit a NASA (National Aeronautics and Space Administration, Nemzeti Űrkutatási Hivatal) sajtóirodája megkísérelt elhallgattatni.

David Baltimore, Nobel-díjas molekuláris biológus, a Kalifornia Egyetem elnöke, az AAAS újonnan megválasz-

tott elnöke aggodalmát fejezte ki, hogy a Bush-adminisztráció korlátozni akarja a tudományos kutatás szabadságát és a szabad véleménynyilvánítás jogát. Hangsúlyozta, hogy a tudomány fejlődésének nélkülözhetetlen feltétele a kutatás szabadságának megőrzése, amely szabadságjog a felvilágosodás korának legnagyobb vívmánya volt. E jog védelme nemcsak a tudomány, hanem az egész emberiség érdeke. Az amerikai Kongresszus feladata megvédeni a tudományt a Fehér Ház túlkapásai ellen – fejezte be David Baltimore.

(Nature, Editorial, 439 (2006) 891)

PAMELA útnak indult a világűrbe

2006. június 15-én Bajkonurból, a kazahsztáni űrközpontból indult útjára helyi idő szerint 11.00 órakor a Pamela (Payload for Antimatter Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics) elnevezésű űrszonda, amely a világűrben sötét anyag és antianyag jelenlétét kutatja. A Pamela legalább három évig marad kvázi-poláris, 300–600 kilométer magasságú elliptikus pályán. Az űrszonda elsősorban az Orosz Űrügynökség és az olasz Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN, Nemzeti Magfizikai Intézet) közötti együttműködés eredménye. Az együttműködésben a Svéd és Német Űrügynökség, valamint

több olasz egyetem kutatói is részt vettek. A közel 500 kilogramm súlyú berendezés fedélzeti műszerei a galaktikus, bolygóközi, valamint a Napból eredő kozmikus sugárzás fluxusát, energiáját és egyéb tulajdonságait mérik minden eddiginél nagyobb pontossággal. A korszerű berendezéseknek köszönhetően először nyílik lehetőség hosszabb időtartamú mérésekre. Korábban csak a sztratoszférába juttatott léggömbökön, valamint egy alkalommal a Space Shuttle fedélzetén elhelyezett műszerekkel tudtak rövid ideig tartó, hasonló célú méréseket végezni.

(www.nature.com)

Új röntgen besugárzási módszer segítheti a sugárterápiát

A Brookhaven Nemzeti Laboratórium, a Stony Brook Egyetem, az olaszországi IRCCS NEUROMED Orvostudományi Központ és a Georgetown Egyetem kutatói több évi kísérletezés után a sugárterápiának egy olyan új módszerét fejlesztették ki, amely az alkalmazást hatékonyab-

bá teszi és a kórházakban is alkalmazható lesz. A módszert patkányokon próbálták ki először, és az eredményekről június elején számoltak be a Nemzeti Tudományos Akadémia közleményeiben (*Proceedings of the National Academy of Sciences*). A mikronyaláb sugárterá-

piát (microbeam radiation therapy, MRT) korábban nagy intenzitású röntgensugárforrásoknál használták, mint például a brookhaveni Nemzeti Szinkrotron Sugárforrás (National Synchrotron Light Source, NSLS), amely nagyon keskeny (25–90 mikrométer) párhuzamos síkbeli röntgensugárnyalábokat produkál (gondoljunk az ablakokon lévő nyitott reluxán keresztül áthaladó fényre) ellentétben a hagyományos kezelés vastagabb és osztatlan nya-

lájával. A Brookhavenben, valamint az Európai Szinkrotron Sugárzás Berendezésénél (European Synchrotron Radiation Facility, ESRF) Grenoble-ban végzett korábbi kísérletek azt mutatták, hogy az MRT módszerrel állatokban lehetséges a rosszindulatú daganatokat kézben tartani, ugyanakkor a nagy intenzitás mellett a környező egészséges szövetek csak igen kismértékben károsodnak.

(www.bnl.gov)

Pulzárak rengéseinek előrejelzése

John Middleditch vezetésével egy kutatócsoport a Los Alamos Nemzeti Laboratóriumban felfedezte, hogyan lehet a pulzárokban – felrobbant csillagok nagysűrűségű maradványaiban – előre jelezni földrengésszerű eseményeket. A kutatók azt találták, hogy egy bizonyos, a PSR J0537-6910 nevű pulzárnál a legutolsó rengés óta eltelt idő annak nagyságával arányos. Ennek az egyszerű összefüggésnek a segítségével a NASA Rossi X-ray Timing Explorer detektorát sikerült a pulzárra irányítani az esemény bekövetkezése előtt néhány nappal, és a rengést megfigyelni. A felfedezésről a kutatók az Amerikai Csillagászati Egyesület ülésén Calgaryban számoltak be június 5-én.

A Rossi Explorernek köszönhetően a csoport 20 „csillaglagréngést” figyelt meg ennél a pulzárnál az elmúlt nyolc év alatt és egy igen egyszerű törvényszerűséget állapított meg. A pulzár forgási sebességének folyamatos megfigyelésével néhány nap pontossággal megállapítható a kö-

vetkező rengés bekövetkezésének ideje. A PSR J0537-6910 jelű pulzár a Tejútrendszer galaxisban a déli féltekén egy 4000 éves szupernóva maradványban található, a Földtől 170 000 fényévnyi távolságban.

A pulzároknál igen gyakori a rengés, amelyet a szakirodalom glitch-nek (megcsúszásnak, működési hibának) nevez. A rengés alatt a forgási fordulatszám kissé megnövekszik. A PSR J0537-6910-nél a tengely körüli forgások száma 62 másodpercenként. A rengés alatt a fordulatszám 7 óránként 1-egységnyi értékkel növekszik, ami az eddigi legnagyobb megfigyelt érték, majd a forgás fokozatosan lelassul. 1999 óta 10 rengést figyeltek meg, ebből sikerült a törvényszerűséget megállapítani. A kutatócsoport továbbá azt is felfedezte, hogy a pulzár mágneses pólusa évente néhány métert elmozdul. Bár ez a jelenség a Föld esetében jól ismert, pulzárak esetében ezt először sikerült észlelni.

(www.lanl.gov)

2007-ben kezd működni a Nagy Hadron Ütköztető

2006. június 23-án a CERN Tanács ülésén jelentette be *Lyn Evans*, az LHC (Large Hadron Collider, Nagy Hadron Ütköztető) projekt vezetője, hogy a berendezés két hónapos próbaüzemére némi késéssel, 2007 novemberében kerül sor. A próbaüzem alatt a nyalábok alacsony, 0,9 TeV (tera elektronvolt, 10^{12} eV) energiával fognak ütközni.

A próbaüzem alatt kerül majd sor a gyorsítók és a detektorrendszer tesztelésére. A téli időszakban a berendezés teljes üzemeltetésének előkészítése nyalábok nélkül folytatódik. A gyorsító 2008 tavaszától működik a teljes tervezett 14 TeV-es nyaláber energiával.

(www.cern.ch)

Nagyenergiájú gammasugarak a Tejútrendszerből

A Los Alamos Nemzeti Laboratórium munkatársai kilenc másik amerikai intézet kutatóival együttműködve a laboratórium Milagro nevű teleszkópjával bizonyítékot találtak arra, hogy az eddig megfigyelt legnagyobb, TeV energiájú

elektronok a Tejútrendszer síkjából származhatnak. Ez az első bizonyíték, hogy ilyen nagy energiájú elektronok valóban keletkezhetnek a kozmikus sugárzás és a galaxisunk anyagának kölcsönhatásából.

(www.lanl.gov)

Mesterséges gömbvillám?

Sikerült laboratóriumban gömbvillámot – a titokzatos, lassan mozgó, alkalmanként nagy viharok idején megfigyelhető fénygömböt – előállítani. A Max Planck Plazmafizikai Intézet és a Humboldt Egyetem kutatói víz alatti elektromos kisüléssel fél másodpercig tartó, nyájából 20

cm átmérőjű, nagy fényességű plazmaködöket hoztak létre, amelyek nagyon hasonlítanak a gömbvillámhoz. Azt remélik, hogy ezek a mesterséges kisülések segítenek megérteni a bizzar jelenséget, valamint hozzájárulhatnak ahhoz is, hogy további ismereteket gyűjtsenek a fúziós

erőművekhez szükséges forró plazma tulajdonságairól. A gömbvillámok évszázadok óta foglalkoztatják a kutatókat, és bár igen kevés megbízható megfigyelési adat létezik, igen sok anekdota van róla forgalomban. Többek között *Charlemagne, II. Henrik* valamint *Niels Bohr* is azt állította, hogy látott ilyet. Sok kutató úgy képzei, hogy a gömbvillám egy plazmagömb, amely akkor keletkezik,

amikor a villám a földbe csap, a pontos mechanizmus azonban nem ismert. 2006 elején izraeli kutatók különböző anyagok mikrohullámokkal történő elpárolgatatásával hoztak létre plazmagömböket. A német kutatók azonban úgy gondolják, hogy az általuk használt módszer közelebb áll a furcsa természeti jelenség keletkezésének módjához. (www.newscientist.com)

Plútó gyermekei: egy istennő és egy szörnyeteg

A Plútó két újonnan felfedezett holdjának végre van neve – Nix és Hydra. Június utolsó hetében a Nemzetközi Csillagászati Unió formálisan is jóváhagyta az elmúlt évben felfedezett új holdak neveit. Nyx a görög mitológia szerint az éjszaka istennője és megszemélyesítője. A Nix írás-

formát azért választották, mert korábban már Nyx-nek nevezték el a Plútó 1978-ban felfedezett, legnagyobb holdját. Hydra szintén a mitológiából ismert kilencfejű szörny. A névválasztás arra is utal, hogy a Plútó Naprendszerünkben a kilencedik bolygó. (www.nature.com)

KÖNYVESPOLC

Kecskés Lajos: EGY ÖLNYI VÉGTELEN

Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 2002, 103 oldal

Kecskés Lajos könyve nem fizikakönyv, mégis jó szívvel ajánlható minden fizika (és természettudomány, matematika és informatika) iránt érdeklődő diáknak, egyetemi hallgatónak, tanárnak és kutatónak. A szerző célja az, hogy a komplex számsík másodfokú leképezéseivel kapcsolatos, meglepően összetett – mai szóhasználattal fraktál – struktúrák szabályszerűségeit bemutassa. Ehhez kizárólag a komplex számok elemi ismerete szükséges (melyet a Függelék röviden össze is foglal).

Kecskés Lajos könyve élvezetes olvasmány, s több szempontból is az. Élvezetes, mert középiskolai ismeretekkel is érthető, érdekes dolgokról szól, ráadásul irodalmi értékű, lebilincselő stílusban. Élvezetes, mert a szerző saját felfedezéséről számol be, s a könyvben mindenütt érezhető a felfedezés izgalma és öröme. Élvezetes, mert egy egyszerű matematikai probléma kapcsán spontán módon is a természettudományos vizsgálódás és megismerés eszközeit mutatja be.

A 80-as évek közepétől számos káosszal és fraktálokkal foglalkozó konferencia témája volt a komplex kvadratikusan leképezések Julia-halmazainak és az azokkal kapcsolatos Mandelbrot-halmaz vizsgálata. Olyan neves kutatók foglalkoztak a kérdéssel, mint a matematikus *Douady* és *Peitgen* (akinek több könyve is megjelent a fraktálokról) vagy a fizikus *Kadanoff* és *Richter*. Azóta világossá vált, hogy az ilyen leképezések a matematika felségterületéhez tartoznak. Mivel nem megfordíthatók, nem létezhet olyan természeti rendszer, melynek hű modelljei lehetnének. Ettől függetlenül természetesen gyönyörű geometriai struktúrával és érdekes időfüggésű dinamikával rendelkeznek.

A könyv érdekes módon nem elsősorban a fraktálokról vagy a káoszról szól. Célja annak bemutatása, hogy ho-

gyan deríthető fel egy első látásra nagyon bonyolultnak tűnő objektum numerikus szimulálás, részletes megfigyelés és elemi megfontolások alapján. Ezzel, annak ellenére, hogy tisztán matematikai problémáról van szó, a *nemlineáris rendszerek* megismerésének bevilágító modelljét kapjuk, hiszen ugyanezek a módszerek vezetnek eredményre számos modern fizikai probléma kutatásában is.

A szerző érdeklődése és szemlélete egyedi eredményhez vezet: az új didaktikai megközelítés mellett új tudományos felfedezések is születnek, melyek egy része annak köszönhető, hogy a szerző természettudományos analógiákat talál (a periódusos rendszerhez hasonló szabályszerűságot vagy a csillapított rezgésnek megfelelő szerkezetet).

A könyv tartalma jól illusztrálja a káosz-tudomány alapállítását, amely szerint egyszerű rendszerek is képesek arra, hogy igen bonyolult viselkedést mutassanak. Az egyszerű rendszer itt a középiskolából jól ismert másodfokú egyenlet, mely a komplex számok világában szinte áttekinthetetlen bonyolultságú szerkezetekre vezet. A könyv egyrészt jól illeszkedik a sikeres matematika-népszerűsítő művek sorába (*Péter Rózsa, Pólya György*), másrészt a Mandelbrot-halmaz minivalóságán belül a természettudományos szemlélet józan alkalmazására is példát ad. Ugyanakkor figyelemfelkeltésül szolgál: eredményei a téma kutatói részére továbbgondolandó feladatot jelenthetnek.

A könyv ezért a középiskolás korosztálytól kezdve széles olvasótáborra számíthat. Segédkönyvként, kiegészítő olvasmányként az egyetemi oktatásban is használható. Megjelenése érdekes, új területtel és szemlélettel gazdagítja a magyar nyelvű tudományos ismeretterjesztő irodalmat. A könyvet a szerző számos színes fraktálábrája illusztrálja.

Tél Tamás

RENDEZETLENSÉGBE FAGYVA

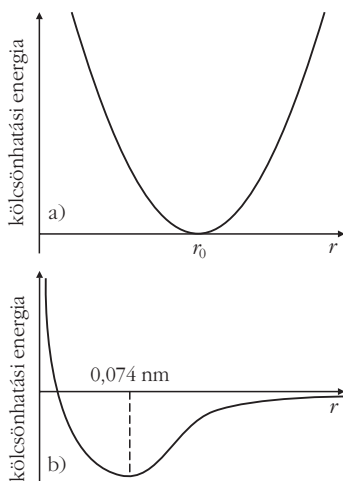
– az üvegállapot sajátosságai

Makroszkopikus testek potenciális energiája és az üvegállapot kialakulása

Egyszerű mechanikai rendszerek dinamikája jól követhető és szemléltethető a kölcsönhatási energia vizsgálatával. Példaként tekintsünk két olyan testet, amelyek egy – terheletlen állapotban r_0 hosszúságú – rugóval vannak összekötve (1.a ábra). A kölcsönhatási energia csak a két test távolságától (r) függ, és az egyensúlyi helyzetben, azaz ha $r = r_0$, minimális. A minimumtól való bármely irányú eltérés a testekre ható visszatérítő erőben nyilvánul meg: a rendszer igyekszik visszaállítani az egyensúlyt. A kölcsönhatási (vagy ahogyan gyakrabban nevezzük: potenciális) energia minimális a molekulák egyensúlyi konfigurációjában is. (Az 1.b ábrán a hidrogénmolekula jellegzetes energiafüggvénye látható; a H_2 -molekula olyan „súlyzóznak” tekinthető, amelyben a H-atomok távolsága a minimumnak megfelelő 0,074 nm.)

Bonyolultabb molekulák potenciális energiája már nem csak 1, hanem $3N-6$ olyan paramétertől függ, amelyek a molekula térszerkezetét meghatározzák. (Az N -atomos molekula összes szabadsági fokainak száma $3N$, és ebből még le kell vonni az eltolási és forgási szabadsági fokok számát.) A független változók száma már egy biológiai makromolekula (pl. fehérje) esetén is hatalmas, a minket érdeklő makroszkopikus rendszerekben – folyadékok, szilárd kristályos, illetve üvegszerű anyagok – az Avogadro-szám nagyságrendjébe esik, azaz praktikusán végtelen. A makroszkopikus rendszerek dinamikáját ezért csak egy olyan *sematikus* poten-

1. ábra. Rugóval kölcsönható testek (a), és a hidrogénmolekula potenciális energiája (b).

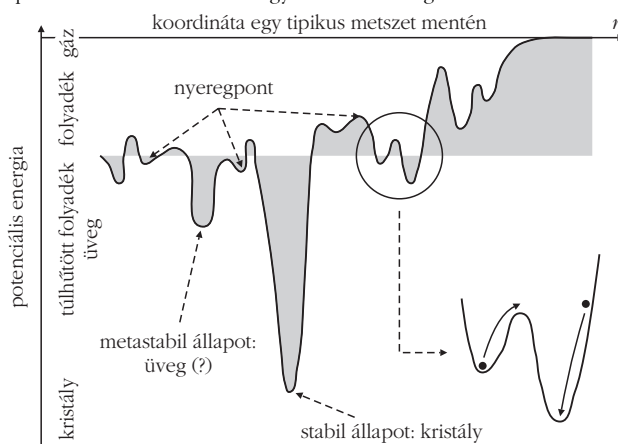


ciálisenergia-diagrammon tudjuk bemutatni, amelyik a lényeges jelenségeket tartalmazza, és mintegy az igazi (sokdimenziós) felület egy jellemző metszetének tekinthető. Ha a 2. ábrán jobbról balra haladunk, végigkövethetjük egy anyag viselkedését a hőmérséklet csökkentése során:

- Magas hőmérsékleten a gáz-halmazállapotot majdnem zérus, sima lefolyású potenciálisenergia-görbe jellemzi.
- A folyadékban az energiafelület egyenetlenné válik, nyeregponatok (olyan konfigurációk, amelyek bizonyos irányokban minimumok, másokban maximumok) jelennek meg.
- Viszonylag lassú hűtés esetén, a fagyási hőmérsékleten az anyag kristályossá válik; ez az abszolút minimumnak felel meg.
- Ez a teljesen stabil állapot azonban gyorsabb hűtessel elkerülhető, és ezután a potenciális energia „tájkép” vad és egzotikus vidékeire tévedünk, a nyeregponatok sokasodnak, és itt-ott metastabil (azaz nem abszolút) minimumok jelennek meg.

A hőmérséklet további csökkentése során a túlűtött folyadék egyre viszkózusabbá válik, belső súrlódása (viszkozitása) drámai módon, sok-sok nagyságrenddel megnő. Az anyag ekkor már gyakorlatilag szilárd üvegnek tekinthető. Az ideális üvegállapotban az atomok, illetve molekulák nem bolyongják be a rendelkezésükre álló térfogatot – mint ahogyan az a gázokban és folyadékokban történik –, hanem képzeletbeli egyensúlyi pontok körüli termikus rezgéseket végeznek. Ezek az egyensúlyi pontok azonban rendezetlen konfigurációt alkotnak, éppen ellentétben azzal a magasabb rendű szimmetriával, amely a kristályos szilárd anyagokat jellemzi.

2. ábra. Makroszkopikus rendszer komplex energiafelületének egy tipikus metszete. Részletes magyarázata a szövegben található.



A túlűtött folyadékban zajló fizikai folyamatok lelassulása egyszerű dinamikai modell segítségével követhető végig: a makroszkopikus rendszer időbeli fejlődését a sokdimenziós potenciálisenergia-felületen – mint egy holdbéli tájon – való bolyongásnak tekintjük. A 2. ábra kinagyított részletén a két alapvető dinamikai folyamat látható:

1. Igen gyors relaxációs folyamattal a rendszer minimalizálni igyekszik az energiáját (jobb oldali rész).

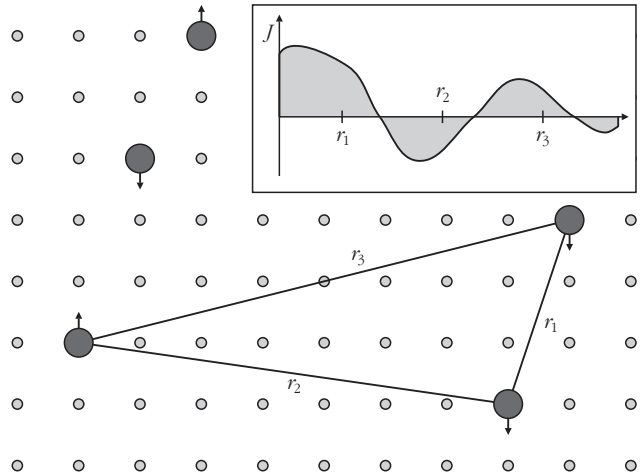
2. Lokális minimumban (metastabil állapot), a rendszer termikus rezgéseket végez: a T hőmérsékletű környezettől véletlenszerűen vesz föl kT nagyságrendű energiát (k a Boltzmann-állandó). Ha kT jóval kisebb, mint a többi lokális minimumtól elválasztó potenciálisenergia-gát, akkor nagyon hosszú idő kell ahhoz, hogy egy elegendően nagy energiaingadozás segítségével a rendszer végül is kiszabaduljon a metastabil csapdából (bal oldali rész).

A hőmérséklet csökkentése azt eredményezheti, hogy egy metastabil csapdába került rendszer „kiszabaduláshoz” szükséges idő több nagyságrenddel meghaladja a kísérlet tipikus idejét. A túlűtött folyadékot ilyenkor már üvegnek, ha nem is ideális üvegnek, hívjuk.

Miért ilyen bonyolult az energiafelület?

Egy makroszkopikus rendszer, amikor spontán módon igyekszik a potenciálisenergia-függvény minimalizálásával a termodinamikai állapotát stabilizálni, valójában egy optimalizációs problémát próbál megoldani. Az optimalizációelméletben a hasonlóan komplex és egyenetlen energiafelület (amit ekkor költségfüggvénynek hívnak) minimalizálása jelenti az igazán nehéz feladatot. Mi az oka ennek a komplexitásnak? Nyilvánvaló, hogy a független változók, illetve paraméterek nagy száma szükséges ehhez. (Egy fehérjemolekula már elég nagy rendszer ahhoz, hogy komplex energiafelülete legyen.) A lényegesebb azonban az úgynevezett frusztráció jelensége: a minimalizáció során a rendszer (vagy az optimalizációt végző algoritmus) nem talál tökéletes megoldást, bizonyos jónak tűnő lépések más szempontból energiaköltséggel járnak.¹

Illusztráljuk a frusztráció jelenségét a legegyszerűbb üvegszerű viselkedést mutató rendszerrel, a spinűveggel. A spinűvegek olyan, általában *kristályos* anyagok, amelyek többnyire nem-mágneses atomokból (illetve



3. ábra. Frusztráció spinűvegekben. Az itt nyilakkal ábrázolt mágneses momentumoknak két lehetséges beállásuk van. A frusztrációt a spinek rendezetlen elhelyezkedése és kölcsönhatási energiájuk oszcilláló csatolási állandója (J , lásd a mellékábrán) okozza.

ionokból) épülnek fel (pl. Cu), enyhén szennyezve mágnesesekkel (pl. Mn). Ez utóbbiak rendezetlen eloszlása, és a köztük fellépő mágneses kölcsönhatás csatolási állandója (J) előjelének periodikus váltakozása okozza az üvegszerű jelenségeket. (A „spinűveg” elnevezés alapja tehát kizárólag az analógia, a „spin” itt a mágneses momentum szinonimájaként tekinthető.) Pozitív J ferromágneses csatolást jelent, a spinek ilyenkor igyekeznek egy irányban állni (ez jelent kisebb energiát), a negatív, antiferromágneses, esetben pedig egymással ellentétes irányban. A 3. ábra egy jellegzetes spinűveg-konfigurációt mutat: a nem-mágneses atomok (kis, világos körök) mátrixába a mágneses atomok (nagyobb, sötétebb körök) felfelé vagy lefelé mutató nyilal, azaz spinnel) rendezetlenül eloszolva épülnek be. A külön kiemelt három spin olyan úgynevezett frusztrált háromszöget alkot, amelyben nem lehet mindhárom kölcsönhatási energia egyszerre minimális. (Az r_3 távolságra levő mágneses momentumok ellentétesek, holott – ahogy azt a mellékábra mutatja – csatolásuk ferromágneses.) Az ilyen lokális frusztrációk behálózják az egész rendszert, és ennek eredményeképpen rengeteg olyan metastabil állapot létezik, amelyek energiája közel egyforma. Ezek a metastabil állapotok azonban olyan spinkonfigurációknak felelnek meg, amelyek egymástól teljesen különböznek, ezért csak nagyon hosszú idő alatt lehet eljutni az egyik állapotból a másikba. Így a kísérletek ezeket az állapotokat „kvázi” egyensúlyként érzékelhetik. A spinűvegeket éppúgy jellemzi az időbeli folyamatok drámai lelassulása a hőmérséklet csökkentésekor, mint az „igazi” üvegeket.

Temesvári Tamás

MTA–ELTE, Elméleti Fizikai Tanszéki Kutatócsoport

¹ Az olyan komplex rendszer, mint például egy ország makrogazdasága nyilvánvalóan frusztrált: nehéz olyan beavatkozást elképzelni, amely vitán felül hasznos lenne. A lélektan is ismeri a frusztrációt, azaz azt a csalódást, amit akkor érzünk, amikor minden jobbító szándék ellenére sem találunk igazán jó megoldást.