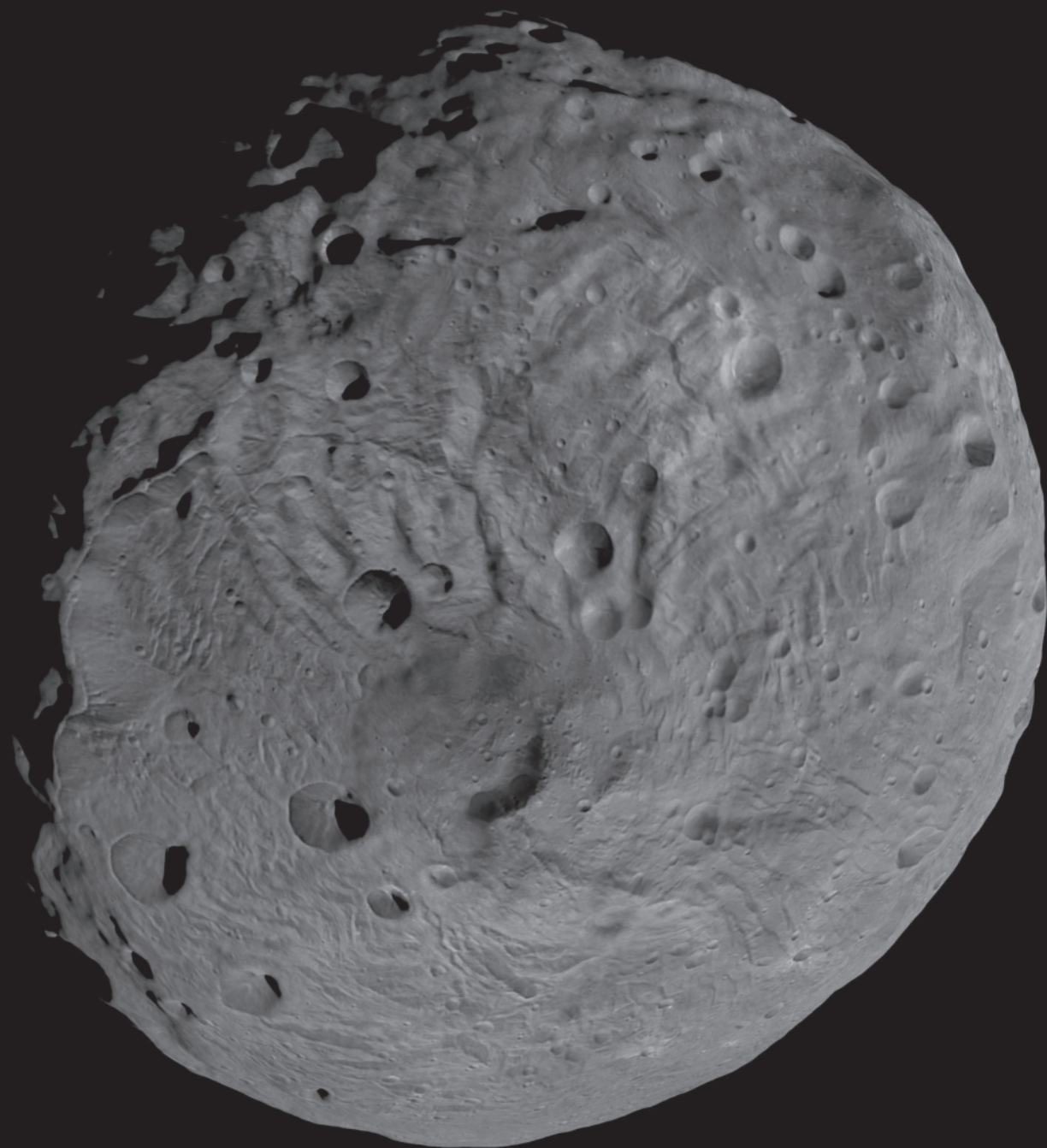


fizikai szemle



2011/9

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

Főszerkesztő:
Szatmáry Zoltán

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

Szerkesztő:
Füstöss László

Műszaki szerkesztő:
Kármán Tamás

A folyóirat e-mail címe:
szerkesztok@fizikaiszemle.hu
A lapba szánt írásokat erre a címre kérjük.

A folyóirat honlapja:
<http://www.fizikaiszemle.hu>

A címlapon:
A NASA Dawn űrszondája a Vesta
kisbolygó körül keringve készítette ezt
a képet az egyik legnagyobb
kisbolygóról. Az 530 km átmérőjű Vesta
anyaga kialakulása óta változatlan
összetételű, ezért részletes
tanulmányozása a Naprendszer
őstörténetéről ad értékes információt.
A kisbolygó déli pólusa környékén levő
hatalmas kráter becsapódás
eredménye. A 2007-ben indított Dawn
ez év nyarán állt pályára a Vesta körül,
majd egy év múlva a Ceres törpebolygó
felé indul, ahová 2015-ben érkezik meg.
NASA/JPL-Caltech/UCLA/MPS/DLR/IDA

TARTALOM

<i>Gyulai József</i> : A Rutherford-visszaszórás és „karrierje” a mikroelektronikában	293
<i>Kótai Endre, Szilágyi Edit</i> : Magyar innovációk a Rutherford-visszaszórási technikában	301
<i>Bokor Nándor, Laczik Bálint</i> : Vektorok párhuzamos eltolásának szemléltetése – II. rész	310
<i>Radnai Gyula</i> : Az első Solvay-konferencia centenáriuma – II.	316

A FIZIKA TANÍTÁSA

<i>Härtlein Károly</i> : Békésy György Fizika Emlékverseny	321
Eötvös-verseny 2011	325
Nyilatkozat	325
Az atomoktól a csillagokig	326

HÍREK – ESEMÉNYEK

<i>J. Gyulai</i> : The Rutherford backscattering and its effective applications in microelectronics	
<i>E. Kótai, E. Szilágyi</i> : Hungarian innovations in applying Rutherford backscattering in microelectronics	
<i>N. Bokor, B. Laczik</i> : A demonstration of the parallel shifting of vectors – Part II.	
<i>J. Radnai</i> : The centenary of the first Solvay Conference – Part II.	

TEACHING PHYSICS

<i>K. Härtlein</i> : The G. Békésy memorial contest in physics	
Eötvös contest 2011	
Declaration	
From atoms to stars	

EVENTS

<i>J. Gyulai</i> : Der Rutherfordsche Rückstreuungseffekt und seine erfolgreichen Anwendungen in der Mikroelektronik	
<i>E. Kótai, E. Szilágyi</i> : Ungarische Neuerungen bei der Anwendung der Rutherfordschen Rückstreuung in der Mikroelektronik	
<i>N. Bokor, B. Laczik</i> : Eine Veranschaulichung der Parallelverschiebung von Vektoren – Teil II.	
<i>J. Radnai</i> : Hundert Jahre nach der ersten Solvay-Konferenz – Teil I.	

PHYSIKUNTERRICHT

<i>K. Härtlein</i> : Der G. Békésy-Gedenk-Wettbewerb in Physik	
Eötvös-Wettbewerb 2011	
Erklärung	
Von den Atomen bis zu den Sternen	

EREIGNISSE

<i>И. Дьячов</i> : Обратное рассеяние Резерфорда и его успешное применение в микроэлектронике	
<i>Э. Котай, Э. Силади</i> : Венгерские новинки в применении обратного рассеяния Резерфорда в микроэлектронике	
<i>Н. Бокор, Б. Лашик</i> : Наглядный показ параллельного сдвига векторов – часть вторая	
<i>Д. Раднаи</i> : Столетие первой Сольвей-конференции – часть вторая	

ОБУЧЕНИЕ ФИЗИКЕ

<i>К. Гэртлейн</i> : Памятный физический конкурс им. Г. Бэкеши	
Конкурс им. Этвеша 2011	
Заявление	
От атомов до звезд	

ПРОИСХОДЯЩИЕ СОБЫТИЯ

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

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

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

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

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

Terjeszti az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, előfizethető a Társulatnál vagy postautalványon a 10200830-32310274-00000000 számú egyszerűsített.

Megjelenik havonta, egyes szám ára: 800.- Ft + postaköltség.

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

Fizikai Szemle
MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

megjelenését anyagilag támogatják:



paksi atomerőmű



Nemzeti
Kulturális
Alap

NCA
Nemzeti Civil Alaprogram



Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

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

LXI. évfolyam

9. szám

2011. szeptember

A RUTHERFORD-VISSZASZÓRÁS ÉS »KARRIERJE« A MIKROELEKTRONIKÁBAN

Gyulai József

MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet

Évtizedek óta kétvétenként rendezi meg az „ionsugaras” szakmai közösség az International Conference on Ion Beam Analysis (IBA), amely azon, főként anyagtudományos eredmények seregszemléje, ahol a vizsgálandó anyagot gyorsított ionokkal bombázzák és a kilépő reakció-termékeket gyűjtik be, vizsgálják, analizálják. E termékek lehetnek maguk a becsapódó, szóródott ionok, vagy velük azonos rezonancia-termékek, de lehetnek magreakciók révén keletkező másfajta részecskék, vagy akár a kiváltott optikai, röntgen-, illetve gamma-sugárzás fotonjai. E termékek vizsgálata alapján ugyanis következtetni lehet az eredeti anyag sok-sok tulajdonságára. Az utolsó IBA-konferenciát *Ernest Rutherford* személyének szentelte a közösség, munkásságának fő helyszínén, Cambridge-ben rendezve azt, mert nevezetes szórásformulája adja alapját az egyik legelterjedtebb és nevét is viselő módszernek, a *Rutherford-visszaszórásnak* (Rutherford Backscattering Spectrometry, RBS).

Az RBS-módszerről – bevezetésül

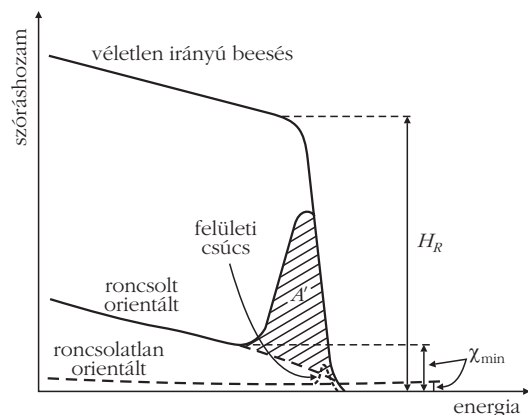
1. Az RBS – legegyszerűbb alakjában – egyfajta tömegspektrometria. Ha egy energikus, könnyű (m tömegű) ion, például alfa-rész, ${}^4\text{He}^+$, proton, ... beleüt-

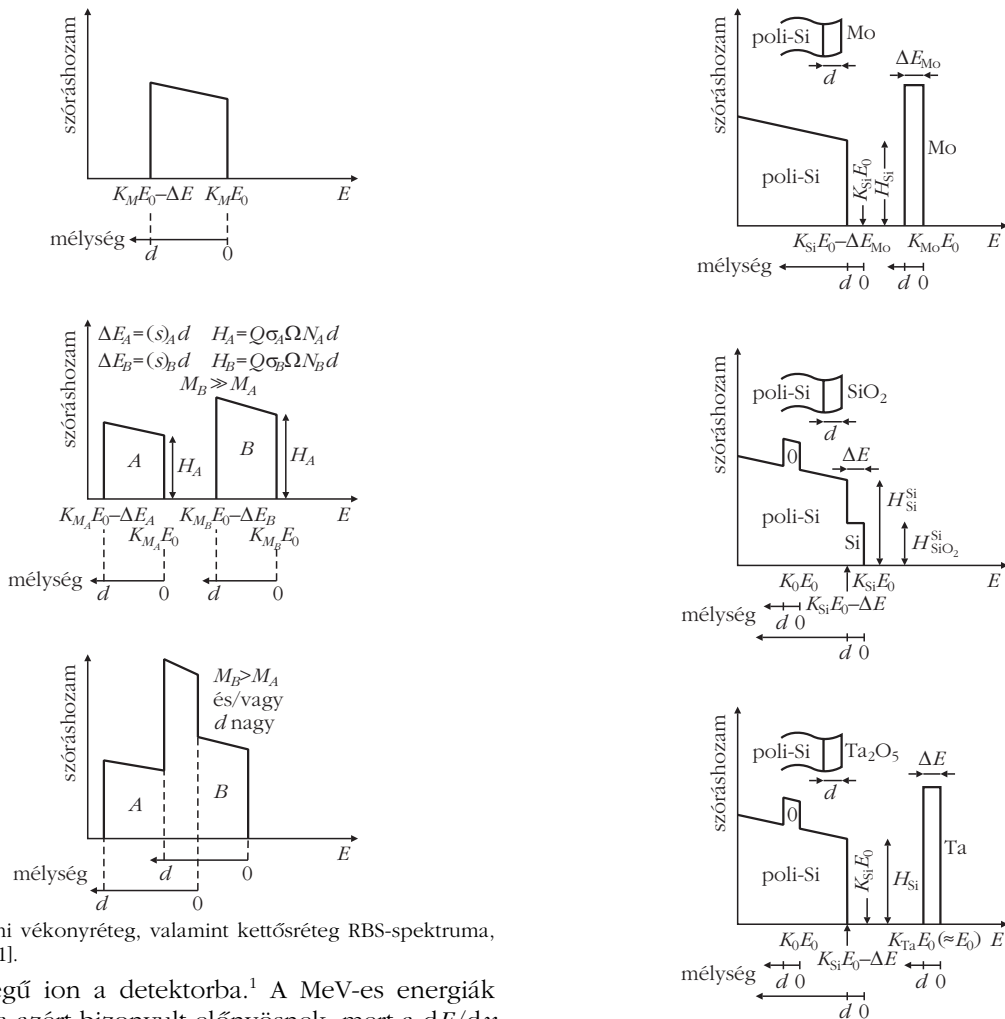
A *First Baron Rutherford of Nelson, New Zealand, and Cambridge*-et, mint minden idők egyik legnagyobb fizikusát több éve ünnepljük eredményes élete sokféle centenáriumának okán. A 2011. esztendő az atommodell felfedezése, a magfizika, mint tudomány létrejötté centenáriumaként aktuális. Erre emlékezve rendezett a Fizikai, valamint a Műszaki Tudományok Osztálya tudományos ülést az MTA Közgyűléséhez illeszkedően. Ebben szerepelt a fenti címmel tisztelgő előadás az alfarészecske-szórás anyagvizsgáló felhasználásának „karrierjéről” a mikroelektronikában. Ennek egy olvasható változata a jelen cikk.

közik a vizsgálandó tárgy egyik felszíni, az ionnál nagyobb (M) tömegű atomjába, akkor a Rutherford-formula szerint szóródik. A centrálisan érkező részecskék azonban – amelyek a párhuzamos pályájú nyaláb mintegy egy ezrelékét teszik ki – nagy szögű, rugalmas szórást szenvednek, az energia és impulzus-tételt kielégítve mintegy „visszapattannak” a nehezebb atomokról (1. ábra). Ilyenkor az $M \gg m$ feltétel teljesülésekor az energiavesztés-formula rendkívül leegyszerűsödik [1]. A ${}^4\text{He}$ ionok, például aranyról körülbelül 95%-os, szilíciumról 56%-os, oxigénről 32%-os stb. energiával „pattannak” vissza.

2. *Mélységfüggő kémiai analízis*. Ha az atom, amelyen a szóródás bekövetkezik nem a felszínen, hanem az anyag mélységében van, az ion a behatolás folyamán – enyhe ütközésekkel – veszít energiájából, amely anyagfajtától is függő „fékezőerő” (dE/dx) révén mélységskálává alakítható. A szórásnál bekövetkezik az előző pont szerinti karakterisztikus energiavesztés, majd a kifelé úton fellépő további energiavesztéssel jut

1. ábra. Egy roncsolt, kristályos Si RBS-spektruma, sematikusan [1].





2. ábra. Atomi vékonyréteg, valamint kettősréteg RBS-spektruma, sematikusan [1].

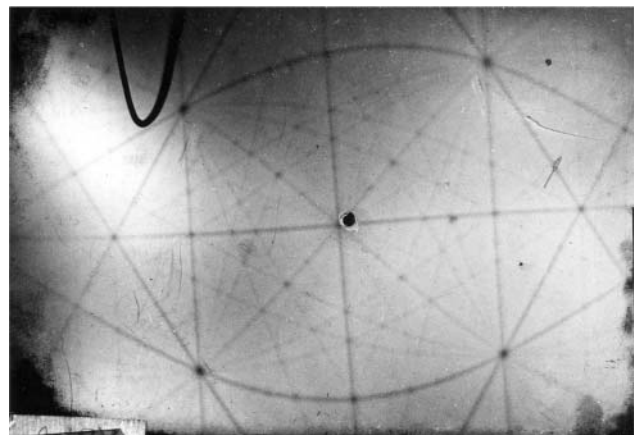
az m tömegű ion a detektorba.¹ A MeV-es energiák alkalmazása azért bizonyult előnyösnek, mert a dE/dx függvény valamennyi anyagra valahol ebben az energiatarományban lapos maximummal rendelkező függvény, azaz a fajlagos energiavesztés mind a behatolásnál, mind a kifelé haladásnál közel azonosnak választható. Így az energiaskála egyszerűen mélységskálává alakítható át (2. és 3. ábra).

3. A csatornabatas további lehetőségeket kínál. Ha a besugárzott anyag kristályos, annak atomjai, síkjai irányító hatást gyakorolnak a belépő részecskére, és – a fent említett – „enyhe ütközések” jellege megváltozik: a csatornák atomközi terében az ionok szinte akadálytalanul repülnek, kiszóródást csak az ionpálya orientációs pontatlanságai, vagy a hőrezgések miatt a csatornába „belógó” atomok fokozatos hatása okoz.² Ha tehát az ionokat, például résekkel század fok kúpszögű szétartással „kollimáljuk”, továbbá a mintát egy goniométerre

3. ábra. Polikristályos (azaz makroszkopikus csatornabatas nélküli) szilíciumra felvitt vékonyrétegek RBS-spektruma, sematikusan.

szereljük, megnyílik a lehetőség, hogy a szórásképből kristályszerkezeti információt is szerezzünk (4. ábra).

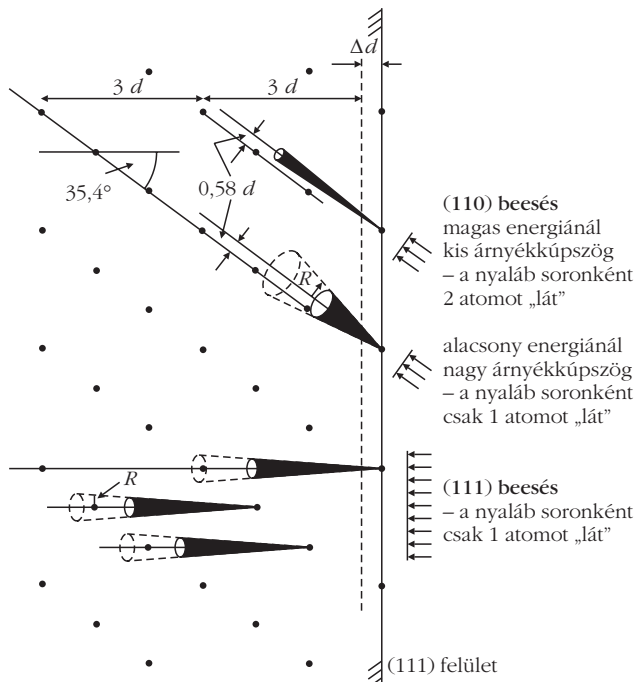
4. ábra. A „Blocking pattern” kirajzolja a kristályszerkezetet. A középső lyukon a képsíkra merőlegesen felénk haladó, ez esetben 1,5 MeV-es He-ionok beütköznek, majd visszaszóródnak a szemünk helyén lévő szilíciumkristályról. Az atomsorok, -síkok azonban bizonyos irányokban megakadályozzák az ionok távozását a kristályból, azaz „blokkolják” pályájukat, illetve a csatornába kormányozzák azokat – így, például egy polimer-lemezen létrejövő, marással előhívható károsodási ábra magán viseli a kristályszerkezet képét.³



¹ Hogy egy könnyebb atom van-e a felszínen, vagy egy nehezebb mélyebben, az a minta megdöntésével, azaz a geometriai út megnevelésével könnyen megállapítható.

² Az ionok sebessége nagyságrendekkel meghaladja a termikus rezgések során fellépő sebességeket, emiatt az ion „fagyottnak” látja a kristályrácsot, a „belógó” ionok csak a csatorna falának „egyenetlenségét” fokozzák, és ezzel növelik meg a kiszóródás valószínűségét.

³ I. V. Mitchell és J. Gyulai egykori „játéka” a Caltech Van de Graaff-ján... A fekete hurok véletlen: a szórókamrában lévő RBS-detektor vezetéke lógott be, ami persze szintén „blokkolta” az ionokat, bocsánat...



5. ábra. Az RBS és csatornahatás felhasználása a legfelső atomsorok vizsgálatára: a legfelső atomsor relaxációja, adszorbátumok kvantitatív meghatározása annak alapján, hogy az egyes atomok árnyékkúpja nem csak irányfüggő, hanem a szonda-ion energiájától is függ, csökkenő energiával nő a kúpszög, ezzel az ion számára láthatatlan térrész [2].

A történet, röviden

Térjünk azonban vissza a történethez, ami jóval korábban indult. Köztudott volt, hogy a „magfizikusok” már a harmincas években az RBS-t használták arra, hogy a céltárgyaik tisztaságát ellenőrizzék. Az első, a világ figyelmét is felkeltő RBS-vizsgálatot – tudtommal – *Anthony L. Turkevich* (1916–2002) javaslatára a Surveyor-5 (1967) fedélzetén végezték, a Hold talaja kémiai összetételének megismerésére – a Nyugalom Tengerénél leszállt űrhajó alatti talajrészén.

Az RBS-t is megvalósító eszköz egy leengedhető, 15 cm átmérőjű „fazék” volt, amelyben hat ^{242}Cm (curium) α -forrás szolgáltatta a gyors, maximum 5,8 MeV energiájú alfa-részecskéket. Az eszköznek két független detektáló rendszere volt: két detektor mérte a Rutherford-visszaszóródást (RBS), négy detektor az egyidejűleg fellépő magreakciók proton és α -részecske termékeit.

A detektorok elektromos impulzusait, amelyek a kémiai információt szállító részecskék számát és energieloszlását „rejtették”, egy sokcsatornás analízátor rendezte energiaspektrummá, azaz olyan grafikonná, amelynek abszcisszája a detektorok által észlelt részecskeenergia, ordinátája azok száma a besugárzás alatti időre, pontosabban az érkező iondózisra vonatkoztatva. Ez a készülék már az űrhajóban volt.

A teljes misszió 83 + 22 órányi adattömeget juttatott a Földre. Az adatok analízise arra utalt, hogy ott a Hold talaja bazalt, sok titánnal – hasonlít a Hudson folyó talajára a Palisades vidékén. A titántartalmat

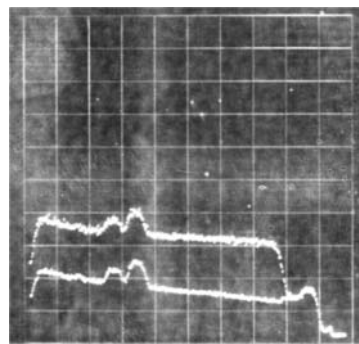
aggályosnak találták, de később, a hazahozott mintákon végzett mérések igazolták a mérés helyességét.

Turkevich sikere felvillanyozta a MeV-es, jó energiaszabotású gyorsítók körül dolgozó kutatókat, hogy a mérést ^{242}Cm helyett ionnyalábbal valósítsák meg. Sőt, rögtön adódott az az ötlet is, hogy a mintát goniméterre szereljék, amikor is a csatornahatást is be lehet kapcsolni kristályszerkezeti mérésre, sőt, a kristályatomok „árnyékkúpja”, annak energiafüggése további, különleges kristálytani méréseket tett lehetővé, mint például a felszíni atomok relaxációja, azaz a rácsállandó megváltozásának mérése az aszimmetriku kötéserők hatására [2] (5. ábra).

Az én pályám félvezető-kutatóként indult Szege-den, *Budó Ágoston* mellett és csak a szerencsém vagy az „őrangyalom” irányított 1969-ben a Caltech *Jim W. Mayer* professzor vezette, akkoriban szerveződő csapatához, ahol nem sokkal korábban születtek meg az első RBS-spektrumok, implantált szilíciumot vizsgálva, *S. T. Picraux*, Jim első doktoranduszának munkáját is dicsérve.⁴

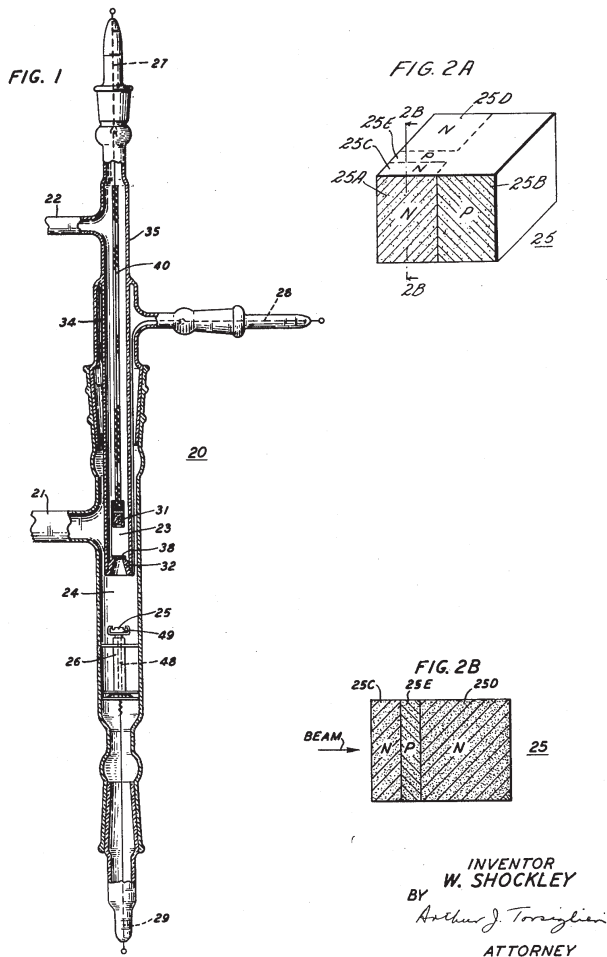
A téma érdekessége okán sok kiváló magfizikus és szilárdtestfizikához, a félvezető-fizikához, az embrionális mikroelektronikához is jól értő kutatócsapat kapcsolódott be az RBS finomításába, alkalmazásába a mikroelektronika „pre-Moore” korszakában.⁵ Rövidesen csatlakozott a KFKI-csapat is sok metodikai újítással.

⁴ Abban a szerencsés pillanatban érkeztem a Caltechre 1969 őszén, amikor Jim Mayer és egy német vendégkutató, *Otto Meyer* a szilíciumon kialakított oxid-, illetve nitridrétegeken rögzítették az első RBS+C (C: csatornahatás is bekapcsolva) spektrumokat, és a sztöchiometriát ellenőrizendő *mélységfüggő kémiai analízisre* szerették volna az RBS+C-t alkalmazni. Szerencsémre, nem jöttek rá, hogyan kell a spektrum csúcsaiból kiszámolni a mélységfüggő kémiai összetételt – azaz az $N_{\text{Si}}/N_{\text{O}}$, illetve az $N_{\text{Si}}/N_{\text{C}}$ atomi koncentrációarányt – a mélység függvényében. Én, a magfizikában járatlan, ültem neki és a bombázási jelenséget, mint atomi mozgóképet magam elé képzelve, rájöttem a kiszámítás módjára. Hamarosan elküldtük az első cikkünket.



A polaroid képen egy X-Si/Si₃N₄/SiO₂ multiréteg véletlen beesésű (felső), valamint csatornázott (alsó görbe) spektruma látható [3].

⁵ Ha csak néhány „versenyhársat” megemlítek a rástartoló RBS-iskolák közül, a tisztelt Olvasó megértheti, hogy mekkora verseny keletkezett nagyhirtelen: *J. A. Davies* (Chalk River), *W. M. Gibson*, *J. F. Poate* (Bell), *J. S. Williams* (Canberra), *I. Ruge*, *H. Ryssel* (München), *J. E. E. Baglin*, *K. N. Tu*, *W. K. Chu*, *J. F. Ziegler* (IBM), *E. Rimini* (Catania), *F. W. Saris* (FOM), *G. Carter* (Salford), *S. T. Picraux* (Sandia), *G. Amsel* (ELFT tiszteleti tag, Paris 7) és sokan mások, akik például a magfizika oldaláról érkeztek és főleg a metodikához szóltak hozzá...



6. ábra. Shockley ábrája az ionimplantációs eljárás 1957-es találmányi bejelentéséből (US Pat. 2,787,564). Felismerte a pn-átmenetek létrehozásának lehetőségét ionok belövésével, sőt, a rácskárosodásnak hőkezeléssel való eltávolíthatóságát is fontos elemként említi.

Az ionimplantáció alapszabadalma és „technológiává” válása

Az implantációs eljárást is *Shockley* szabadalmaztatta, még 1957-ben. Az ő „implantere” még fiatal korom vákuumrendszereihez hasonlított, de a szabadalom lefedte a fő célt, a pn-átmenet létrehozását megfelelő adalékok bejuttatásával. Zsenialitásával arra is rájött, hogy az eljárás legfőbb gondja az lesz, hogy a becsapódó ionok energiáját disszipálni kell az anyagban, ami óhatatlanul a kristályrács roncsolását eredményezi. Megoldásként már ő is az utólagos hőkezelést javasolta (6. ábra).

Az emberiség nagy szerencséje, hogy a korábban egyeduralgató, diffúziós adalékolási eljárás⁶ hátrá-

⁶ Ennél az eljárásnál az adalékanyagot, vagy az azt tartalmazó, könnyen bomló vegyületet közvetlenül a szeletre viszik, vagy annak közelébe helyezik (ekkor más tartóanyagon). Mindezt megfelelően magas hőmérsékleten, pontosan választott ideig tartva, az adalékatomok bediffundálnak a félvezetőbe, létrehozva a kívánt koncentrációprofil.

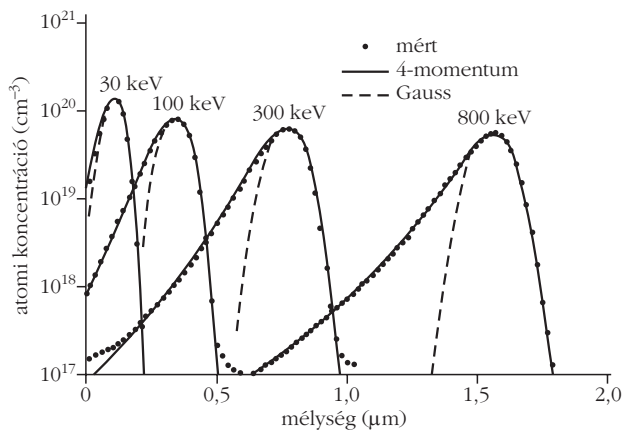
nyai az áramköri gyártásban csak a hetvenes években váltak kritikussá, amikor az eredeti szabadalom „kifutott” és az eljárás általánosan alkalmazhatóvá vált, de még jelentős kutatómunkát kellett kifejteni az implantáció előnyeinek bizonyítására. További nehézség volt azon pszichológiai gát legyőzése, hogy a részecskegyorsító, mint gyártóeszköz teljességgel idegen volt a félvezető áramkörök gyártási környezetében. Így a nagy kihívás abban rejlett, miként lehet az implantációt a fizikusi egzotikumából ipari eljárássá alakítani, fejleszteni. Ebben a munkában mi is bekapcsolódhattunk.

Emlékezetes maradt számomra, amikor az egyik legelső implantációs konferencián (Thousand Oaks, 1970) egy intees kollégával beszélgetve ő mélyen lekicsinyelte az implantációt, mondván: legfeljebb arra lesz jó, hogy amorfizálja két tranzisztor közötti területet az elemek elektromos szigeteltségének javítása érdekében. Az Intel véleménye nem volt meglepő: a nem sokkal korábbi, alapításkori titkuk a technológiai higiéné olyan mértékű biztosításában rejlett, amellyel el tudták kerülni a kemencék samottja „gyilkos” ionjainak beépülését a leendő tranzisztorba. Az ezt biztosító műszaki-gépészeti „trükk” tette számukra lehetővé, hogy elsőként hozzanak létre diffúziós eljárással komplementer tranzisztorpárokat, azaz invertáltakat. 1975-ben lehetett, amikor korábbi Caltech doktoranduszunk, *R. D. Pashley* megírta nekem, hogy az Intel alkalmazta – ez a hír jelezte a filozófia ottani megváltozását. Az implantációs adalékolás ugyanis sokkalta egyszerűbb utat jelent a cél eléréséhez. Dick egyébként a flash memória egyik feltalálója, milliárdos üzletággá fejlesztője, és az Intel egyik igazgatóhelyettese lett.

De az alapkérdés, a rácskárosodás megszüntetése évtizedes, a generáció szakmai életének hosszával mérhető kutatást indított, hogy a miniatürizálásból folyamatosan következő újabb igényeket ki lehessen elégíteni. Az első paradigmaváltás akkor lépett fel, amikor a diffúzióval biztosítható eloszlási bizonytalanságok kritikussá váltak. Az új paradigma az lett, hogy a gyártás közben fellépő diffúzió kerülendő, azaz az implantáció oda és annyi adalékot juttasson be, ahol és amennyire szükség van a funkcióhoz és a diffúziót okozó termikus terhelés, a „thermal budget” minél kisebb legyen.

Miért találkozott az RBS és az ionimplantáció?

A MeV-es energiájú hélium ionok behatolási mélysége (R_p) szilíciumba mintegy 6-8 μm ; az ionok R_p körül adják le energiájuk zömét, azaz ebben a mélységben roncsolják az anyagot, de ahol az „érdekes” rész van, ott szinte roncsolásmentesen átfutnak. A 7. ábrán a szilícium-technológia legfontosabb adalékanyaga, a bór mélységi eloszlását mutatjuk be [1], különböző gyorsítási energiákkal belöve. A 2 μm -ig ábrázolt abszcisszát kell a 6-8 μm körüli roncsolási csúcsához hasonlítani. Már itt meg kell jegyezni, hogy az áram-



7. ábra. Implantált bóratomok mélységi eloszlása; valamennyi jóval sekélyebb, mint a He-ionok R_p behatolási mélysége, ahol azok roncsoló hatása érvényesül.

körök méretcsökkenése következtében az alkalmazott gyorsítási energiák mára az 1-2 keV környékére csökkentek! Ez erősítene az RBS alkalmazhatóságát, ha a tranzisztorok mérete nem csökkent volna mélyen a praktikus nyalábméret alá. Ezzel megsejthető, hogy a mikroelektronikai alkalmazásoknál – szemben a hetvenes, nyolcvanas évekkel – a kilencvenes évektől miert csökkent az RBS alkalmazhatósága.

A spektrum-olvasás ABC-je, az RBS+channelinggel mérhető mennyiségek⁷

A szórás folyamatot rögzítő spektrum egyetlen folyamatként hihetetlenül sok információt tartalmaz az anyagszerkezetről. Nem túlzás azt mondani, hogy az RBS, pláne az ionsugaras analitika rokon módszereivel kombinálva, biztosan az a fizikai módszer, amely a legtöbb információt rejti egyetlen regisztrátumban. A következő mennyiségek ugyanis mind kiolvashatók a detektorba ütköző, egy-egy ΔE energiaablakba eső visszaszórt ionok (a belőtt dózishoz viszonyított) számából:

- Energiavesztés – kinematikus, illetve fékeződések;
- Irányfüggés mérése;
- A csatornahatás kritikus szöge;
- Felületi csúcs – az első atomi rétegről való visszaszóródás;
- Direkt visszaszóródás az adszorbeált (más fajta) első atomsorról;
- Minimális hozam – a felületi csúcs mögötti jelmagasság a csatornahatás megnyilvánulása;
- Kiszóródás csatornából, „dechanneling”;
- Árnyékkúpok energiafüggésben;
- Kettős csatornázás (beeső és kilépő nyaláb is csatornázható);
- Anomális hozam, úgynevezett „flux peaking”, ha különleges rácshelyeken ülnek atomok, amelyekbe szűk szögtartományban az ionok bele tudnak ütközni.
- Végül, az RBS „autokalibrált”, azaz nem feltétlenül igényel kalibrációs standardot – szemben a leg-

több analitikai módszerrel – bár itt is lehet egyszerűbb egy standarddal való összehasonlítás.

Ezek a mennyiségek érzékenyek arra, hogy mi a „lövedék” és annak mekkora az energiája, ezért a mérés körülményei optimálissá tehető, amire természetesen törekedni kell.

- Megválasztandó a lövedékion fajtája. Főleg könnyű ionok jönnek számításba, de előnyös lehet a Heavy Ion Backscattering, HIBS, alkalmazása is;
- Ionenergia MeV körül optimális, de felületi, felület-közel hatások mérésére a száz keV nagyságrendű energia előnyös: Medium Energy Ion Scattering, MEIS;
- Az ionenergia megválasztásánál kihasználhatók a Rutherford-hatáskeresztmetszetben egyes lövedék-céltárgyelem párok esetén bizonyos energiákon fellépő rezonanciák, amely energiákon a kérdéses elem különösen nagy érzékenységgel mutatható ki (például He-ionok hatáskeresztmetszete oxigénre 3 MeV táján, szénre 4 MeV táján mutat ilyen hatást);
- A szórás geometria, beesési, detektálási szög – a mélységfelbontás nő, ha a fékeződési energiavesztést meg növeljük, akár súroló irányú beesésig;
- Ion dózisz – ha számítani kell sugárzási károsodásra;
- A módszer egyik változata a „kilökéses” spektroszkópia, Elastic Recoil Detection Analysis, ERDA, amikor a lövedéknél kisebb tömegű, az impulzusátadáskor az anyagot elhagyni képes sebességre felgyorsuló atomokat detektáljuk (például hidrogéntartalom, eloszlás mérése);
- A becsapódási nyalábméret mikro-, nanonyalábok méretéig csökkenthető;
- Kettős csatornázás megjavítja a rácshelyzet vizsgálatának pontosságát (befelé és kifelé is).

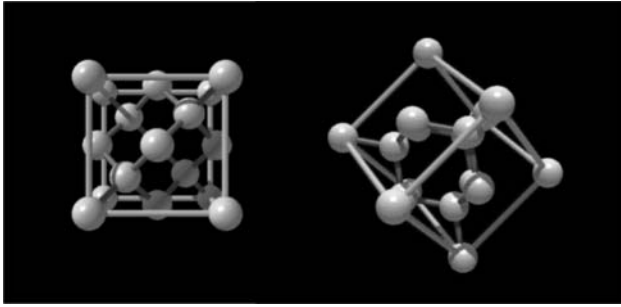
Az RBS különlegessége még az is, hogy léteznek olyan rokon módszerek, amelyek ugyanazt a gyorsítót, azonos szórókamrát igényelnek, amelybe több, megfelelő detektáló rendszer is beépíthető, sőt a detektálandó termékek akár levegőbe vagy héliumba is kihozhatók. Ezek a rokon módszerek a

- lövedékrészecskék által gerjesztett röntgen emisszió felhasználása, Particle Induced X-Ray Emission, PIXE,
- vagy a magreakciókból származó gamma-fotonok detektálása, Particle Induced Gamma Emission, PIGE,
- valamint a széles körben alkalmazott eljárás, amely a MeV-es részecskék által kiváltott magreakciók termékeit gyűjti a detektorba és azokból következtet vissza a tárgy összetételére, netán szerkezetére is, ez a Nuclear Reaction Analysis, NRA.

Az RBS-t is beleértve, amint említettük, ezen módszerek gyűjtőneve Ion Beam Analysis, IBA.

Egyéb segédeszközök alkalmazása is segítheti a konkrét feladat megoldását, például az kérdéses réteg feletti anyag előzetes eltávolítása valamilyen porlasztással, marással, hogy a fékeződés okozta kényszerű energiaelmosódást elkerüljük.

⁷ Lásd például [1] 93–196. o.



8. ábra. A Si (100) irányú vágása (balra), melyre jobb elektromos minőségű SiO₂ réteg implantálható, mint a korábban (111) irányban szeletelt anyagon (jobbira).

Az RBS és channeling együttes (RBS+C) mérése esetén talán nem túlzás azt mondani, hogy aligha van a fizikában még egy olyan eljárás, amelynél *egyetlen* mérésből ennyiféle adat olvasható ki – ha nem is csúcserzékenységgel:

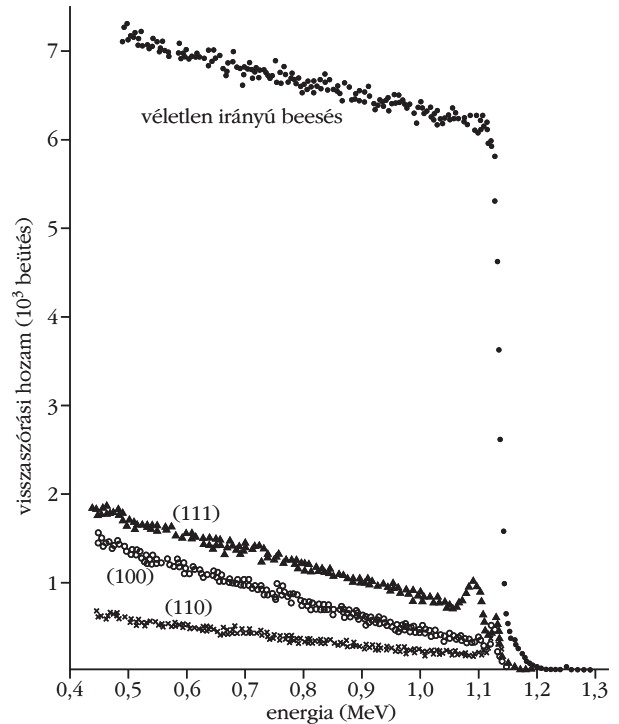
- kémiai összetétel, réteges szerkezeteknél is,
- információ a kristály minőségéről,
- szennyezések, adalékok rácsbeli elhelyezkedése, vándorlása,
- a felület minősége,
- felületi adszorpció, relaxáció kvantitatív meghatározása,
- bevonatok atomi szerkezete,
- rácsrezgések amplitúdója,

A kisebb méretű számítógépek kapacitásának növekedésével lehetővé vált szimulációs programokat írni, amelyek egzaktul kiszámolták és megjelenítették egy adott vizsgálati minta RBS, sőt csatornázott spektrumát, ez az eljárás használhatóságának óriási lökést adott. Az egyik elsőt a Mayer-csapat doktorandusza, *L. Doolittle* fejlesztette lépésről-lépésre, ez RUMP néven vált ismertté [4]. Egyidejűleg *Kótai Endre* (KFKI) is hozzákezdett egy szimulációs program kifejlesztéséhez ZX-Spectrum mikrogépen. Mái előtttem van Larry Doolittle arkifejezése, amikor a KFKI-ban megmutattuk neki a „konkurenciát”: őszintén elcsodálkozott, hogy alig tud kevesebbet, mint az övé. Kótai Endre ma ismert RBX programja [5] az egyik legpontosabb, kényelmes és praktikus. Hazai eredmény az azzal kompatibilis és együtt alkalmazandó program, a DEPTH-kód [6], amely pontossá tette a mélységi energiaelosódások számolását és együtt terjed az RBX-szel. Később munkatársaink kidolgoztak egy további programot, „kódot”, amely pórusos szerkezetek esetén is pontos eredményt ad [7].

Implantációs közösségünk RBS alkalmazásával elért alapvető eredményei

Eredményeket, amelyek jelentősége olyan lett, hogy nem szerénytelen az RBS mikroelektronikai, integrált áramkört „karrierjéről” beszélni...

A Caltech korábbi diákja, a Fairchild kutatólaborjában dolgozó *Val Rodriguez*, meglátogatta korábbi iskoláját 1969 októberében, éppen amikor az RBS ügyeiben előreléptünk. Val, zseniális ember lévén,



9. ábra. RBS- és csatornahatás-vizsgálat azonosan (200 keV energiájú, $5 \times 10^{14}/\text{cm}^2$ -nyi ⁷⁵As⁺ ionnal) implantált és (1000 °C-on 30 percig N₂ atmoszférában) hőkezelt, különböző orientációval szeletelt Si egykristályokon. A legkevésbé „átlátszó”, azaz hibákkal terhelt az (111), az akkoriban széles körben használt alapanyag [8].

amikor megismerte a kísérleti lehetőségeinket, az RBS lehetőségeit, rögtön vagy hat-nyolc kísérletsorozat említett, amelynél a Fairchild fejlesztők analitikai feladatok előtt álltak és metodikai gondjaik voltak. Szinte hetenként érkeztek a mintasorozatok, például az akkor újdonság MNOS (szilíciumnitrid réteggel működő) technológia fejlesztése, a Gunn-diódák kontaktusainak optimalizálása, a GaAs eszközök diffúziós gátjainak optimalizálása, a GaAs kémiai bomlása a technológia során stb. megoldására. Sorozatban készültek el azok a cikkek, amelyek demonstrálták az RBS hihetetlen sokoldalúságát és teljesítőképeségét a mikroelektronikai feladatok megoldásában – biztosítva ezzel a Caltech-csapat élen maradását.

Az amerikai Nemzeti Kutatási Alap (NSF) által létrehívott Caltech–KFKI csereprogram 1974-ben indult meg, egy kéthónapos utammal. Ez lett közvetlen szakmai életünk – hatásában – a csúcspontja.

Az Intel eredménye ugyanis, hogy a MOS-tranzisztorban⁸ funkcionális elemként szereplő termikus SiO₂ réteg jobb elektromos minőségű az (100)-szilíciumon, mint a korábban általános (111) irányban szeletelt anyagon (8. ábra), ekkor kezdett fontossá válni.

A Mayer–Gyulai-csapat csatlakozó eredménye, hogy az implantációt követő visszanyelés is tökéletesebb az (100) irányban szeletelt kristályon. Nem vitatom, hogy az oxidminőség kérdése alapvetőbb, de a mi eredményünk – amelyet a Kellogg Laboratórium-

⁸ Metal-Oxide-Semiconductor tranzisztor mára vezető tranziszortípus.

ban egyik este *Helmut Müller* vendégkutató figyelmessége iniciált, aki észrevette a mintatartó dobozok feliratában a különbséget („Look, this is 111 and this one is 100!”) – és az ezt igazoló, saját mérésém alapján született eredmény (9. ábra) nem-jelentéktelen lépés volt az ionimplantáció „technológiává válásában”. Mindenesetre, a világ teljes szilícium-ipara ezeket az eseményeket követően állt át tömegében az (100) orientációjú kristály növesztésére.

Különösképpen igaz ez egy további eredmény fényében. Az első KFKI-s cserekutató *Csepregi László* lett. 1974-es hazajöveletemkor egyetértettünk Mayer professzorral, hogy a rövidesen kiérkező Laci itt és ezzel a témával folytatja. Így indulhatott el Laci a világhír felé.

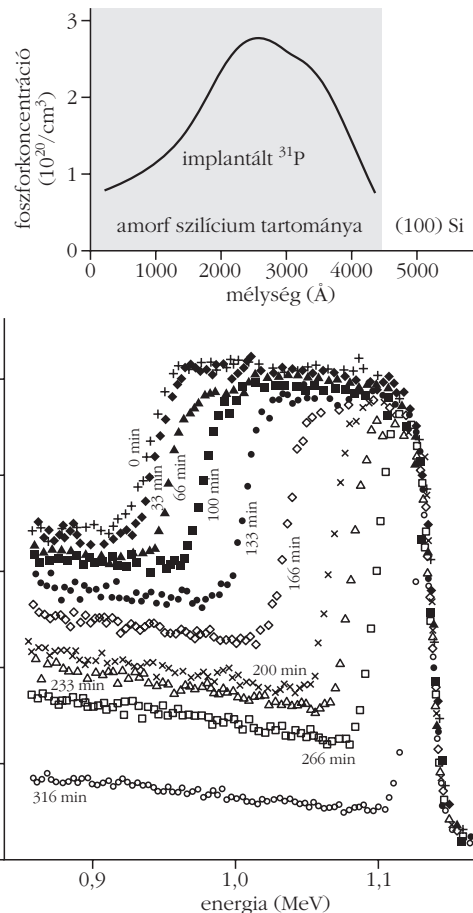
Mi volt ez a folytatás?

Az ionimplantáció inherens gondja volt, hogy a csatornahatás miatt az ionok (főleg a „könnyű” bór) mélyebre és statisztikáival kevésbé kiszámítható mélységekbe jutnak. A világ első gondolata az lett, hogy implantációkor a Si-lapkát kissé félre kell fordítani.⁹ A zavaró hatás ezzel ugyan csökken, de nem tűnik el. A visszánövés kísérletek azt is megmutatták, hogy a teljesen amorf Si könnyebben nő vissza, mint a „csupán” sok hibával terhelt. Az a gondolat kezdett érlelődni, hogy amorfá kell tenni a szilíciumot. *H. Ryssel* egy nagyon szellemes eljárást talált ki [9]. Az implantációkban a bórionokat leggyakrabban BF_3 gáz elektromos kisüléséből nyerik. Meglepő azonban, hogy a kilépő ionok jelentős része metastabil molekula-ion, sőt, a BF_2^+ formációból jóval több van a nyalámban, mint elemi B^+ -ból. Ryssel ötlete abban állt, hogy a becsapódáskor széteső molekula ionjai, eltérő tömegeik és a megfelelő R_p behatolási mélységek miatt, nagyjából azonos mélységben állnak meg. Azonban a fluor erőteljesebben roncsol, mint a bór, azaz a kristály hamar eléri az amorfizációt. Ekkor már az amorf anyagban áll meg, és a szokásos Gauss-eloszlást mutatja. Azokban az években a fluor jelenléte még nem látszott katasztrofálisnak.

A *Csepregi László* sikeres munkájával kifejlesztett és később nyerőnek bizonyult eljárásban, amelyet „pre-amorphization”-ként ismer a világ [10], az „ön-implantáció” volt az ötlet: bombázzuk amorfá a felszíni réteget az alapanyaggal azonos, azaz Si-ionokkal, majd ebbe az amorf rétegbe lőjük bele az adalékatomokat. Végül egy viszonylag alacsony hőmérsékletű hőkezeléssel, amikor is a nem-roncsolt alapkristály kristályosodási magként is szerepel, kristályosítsuk vissza az anyagot, benne az adalékkal, amely – az alacsony hőmérséklet miatt – alig diffundál, azaz ott marad, ahova belőttük (10. ábra).

Évtizedek óta ez a standard eljárás. Voltak gyárak, amelyek az egyszerűsége miatt a Ryssel-módszert alkalmazták, de két hátránya miatt ma egyre kevesebben

⁹ W. K. Chu 7°-ot javasolt, ez lett standard.



10. ábra. Si ionokkal amorfá bombázott Si kristályba lőtt foszfor eloszlása (felül), valamint a kristály visszánövése mindössze 475 °C-on (alul). A csatornázott RBS-spektrumok a kristály átlátszóságának, azaz tökéletességének visszaállítását mutatják [6].

teszik: 1) a belövés kezdeti szakaszában még kristályos a Si, amikor tehát még nem véd a csatornahatásból eredő profitorzulás ellen, 2) de főleg, az áramköri elem méretcsökkenésével egyre nagyobb gondná vált a töltéshordozó csapdákat okozó fluor jelenléte.¹⁰

A visszánövés témája (amelyet Solid Phase Epitaxial Growth, SPEG néven rögzített a világ) évtizedekig uralta az integrált áramköri technológiák adalékolási kérdéseinek kutatását. Egy mai processzorban az Intel – ez szakmai elégtétel is a korábbiakban mondott anekdotához – huszonháromszor alkalmazza az implantációs adalékolást! A témáról, felkérésre, cikket írtunk, amelyben összefoglaltuk annak a versenynek az állomásait, amely nem elhanyagolható mértékben járult hozzá – és jelentős százalékban az RBS-t használva módszerül(!) – a mikroelektronika Moore-törvény szerinti fejlődéséhez. A cikk tiszteletadás is volt a tragikus sorsú, akkor már súlyosan beteg *Csepregi László* eredményes, a KFKI tekintélyét nagyban megnövelő munkásságának.

¹⁰ Mivel Ryssel professzor (első „nyugati” kutatóként) huzamosan vendégünk volt a KFKI-ban, már a hetvenes években tudtunk ötletéről. Ki is próbáltuk azt az ILU implanterrel, de a mi kísérleteink nem hozták a várható eredményt – feltehetőleg az implantáció áraműrűségére volt kritikus a fluor amorfizáló képessége. Így mi kitaláltunk a saját módszer, a preamorfizálás mellett.

Mit ismertek fel ezeken kívül az RBS-szel az IC-technológia számára?

A korábbiakban azokat az eredményeket ismertettem részletesebben, amelyekhez közünk volt. Igaz, az a kettő kiemelkedően fontossá vált a mikroelektronikában és az RBS teljes sikerét demonstrálta. De álljon itt egy lista, amely bizonyítja, hogy az eddigiekben megrajzolt kép még szerény is. Mert a következő, szintén fontos kérdések megoldásában is kardinális szerepe volt az RBS-nek:

- Ionimplantáció témában:
 - Behatolási mélység, eloszlás mérése – itt a kis érzékenység ugyan korlátot jelentett (a SIMS jobb, de nem önkalibrált),
 - Roncsolás, rácshiba eloszlás, *rácsbibák* *minőség* meghatározása. Annak eldöntése, hogy fog-e kvantitatív képet látni a fázismentes mintakészítést igénylő elektronmikroszkópia?
 - Visszakristályosodás, termikus (kemence, lézer, Rapid Thermal Processing).
 - *Diffúziós mechanizmus*, a rácspontokon „ugráló”, illetve rácsközi diffúzió megkülönböztetése.
 - A „defect engineering” megindítása.
 - Későbbi, de szép és hazai eredmény, amely a SiC félvezető kutatásában, a rezonanciák felhasználásával meg tudta különböztetni a Si, illetve C alrácshibaszervezetét.
- Vékonyréteg-leválasztás kémiaja:
 - A vékonyréteg reakcióknál keletkező fázisok, az első fázis kérdése.
 - *Szilicid-képződés* – a kontaktus kérdése (Mo_2Si , Ni_2Si , Co_2Si ,...).
 - Diffúziós gátak („barrier”) kérdéseinek megoldása (TiN , TaN ,...).
 - Diffúzió – *mozgó komponens* (oxid a Si-határon nő, a szilicidke változatosan), marker kísérletek ötlete.
- Az *ionsugaras keverés* „mixing”, mint új vékonyréteg-előállítás.
 - Vékonyréteg minősítés:
 - Implantáció és vékonyréteg-vizsgálat *RBS-kalibrált spektroszkópiával* *ellipszometriával*.
 - Egy kiút az igazi roncsolásmentesség felé is: spektroszkópiával ellipszometria hitelesítése RBS+C-vel (Lohner–Fried–Petrik-iskola).

Az RBS és a többiek

Természetesen a jubileumi és a személyes lelkesedés sem mondhatja velem, hogy a tegnapi-mai mikroelektronika *főleg* az RBS-nek köszönheti a sikereit. Az RBS a „nem mindent verő” érzékenysége miatt ugyanis sok esetben csak előmérés-ként alkalmas. Kombinálni kellett például a szerkezeti kérdéseket kvantitatív módon analizálni képes módszerekkel – elsősorban az elektronmikroszkópiával, a pásztázó (SEM) és a transzmissziós (TEM), de a profilokat érzékenyen kirajzoló szekundáris tömegspektrometriával (SIMS) is.

Emellett – mint a végső választ szolgáltatni képes eljárások – az eszközök elektromos tulajdonságainak részleteit vizsgáló módszerek (töltéshordozó élettartam, áram-feszültség, kapacitás-feszültség mérése stb.) a legfontosabbak.

Miért csökkent nemcsak az RBS-, hanem az ionsugaras analitika jelentősége a mikroelektronika későbbi, pláne a nanoelektronika szakaszában?

Elsősorban az eszközméretetek csökkenése, azaz a Moore-törvényként¹¹ ismert exponenciális fejlődés által támasztott igények miatt. Az implantáció során alkalmazott ionenergiák ma akár 1 keV alattiak, amelyhez ≈ 100 nm behatolás tartozik(!), a dózisek – néhány tíz-száz bóratom állítja be a kapuelektród potenciálját. Emiatt a legtöbb gyorsított laboratóriumban már csak korlátozott relevanciát jelentő modellmintákkal lehet dolgozni. A terjedő módszer, a fókuszált mikronyaláb alkalmazása sem segít igazán, mert olyan helyi hőterhelést jelent, amely meghamisíthatja a mérés eredményét.

Van azért néhány sikeres ötlet *nanoelektronikai* alkalmazások terén:

- Háromdimenziós RBS-képet is lehet tomográftechnikával készíteni, ami kisebb sugarterheléssel is járhat (*M. Takai, Osaka*, és munkatársai, valamint *Pászti Ferenc és Lohner Tivadar*);
- Speciális fókuszált ionnyaláb eszközt (Focused Ion Beam) fejlesztett ki ugyancsak a Takai-iskola – szintén több kutatónk bekapcsolódásával – 100 kV körüli ionenergiát használva, ami tehát közepes energiájú ionszórás, MEIS-ként terjed. Különleges detektorokat és elektronikát igényel, ha – mint a tervek szólnak – akár egyedi atomok jeleit akarják megtalálni...

Ez nem jelenti az RBS jelentőségének egyéb területeken való csökkenését. Az a lehetőség, hogy a metodika-kombinációk, azaz az RBS, ERDA, PIXE, NRA stb. egyetlen szórókamrában is megvalósíthatók, sok területen jelent nagy előnyt. Egyre több laboratóriumban valósul meg mikronyaláb elrendezés. Hazánkban is kettő működik (ATOMKI, RMKI). Ezek nélkülözhetetlené tették magukat például az archeológia, a muzeológia (levegőn végzett mérések), a környezetvédelmi analitika terén. Nagyobb ionenergiák új területeket nyitnak meg, főleg az NRA-alkalmazásokban, illetve a közepes energiák hozzáférhetővé tesznek szilárdtestfizikai-kémiai problémákat. Említettem, hogy vegyület-félvezetők, például SiC esetén a rezonanciák kihasználásával olyan adatokhoz lehet jutni, amelyre más módszerek esélyt sem adnak (SiC alrácshibáinak hibái [11]).

¹¹ Gordon Moore törvény – <http://public.itrs.net/>, International Technology Roadmap for Semiconductors, négyévenként korszerűsítik: mi kell ahhoz, hogy duplázódhasson az elemszám?

Enumeráció

Az írásból talán kiviláglott, hogy ez a téma beverekedett magát a KFKI sikertörténetei közé, amelyet Kótai Endre egyidejű előadása mutatott be és a cikke [12] foglalja össze. Befejezésül álljon itt egy névsor, az akkori implantációs célfeladat RBS-sel is kapcsolatos csapatának neveivel, jobb híján ABC rendben – többüknek megköszönve, hogy átnézték írásom kéziratát és megjegyzéseikkel pontosították az emlékeimet:

Barna P., Battistig G., †Csepregi L., Demeter I., Fried M., Gyimesi J., Hegedűs A., Keresztes P., Keszthelyi L., N. Q. Khánb, Kótai E., Lohner T., †Manuaba A., Mezey G., Mohácsy T., Nagy T., †Pásztai F., Petrik P., Polgár O., Révész P., Schiller Róbertné, Szilágyi E., Szőkefalvi-Nagy Z., Tunyogi Á., Varga L., Zolnai Zs., valamint sok doktorandusz, itthon, illetve nekem a Caltechen, Cornellén, Erlangeni FA-Egyetemen is...

A segédek között *Majthényi Lászlóné* volt mindig jelen az RBS-csapat segítésére, de *Erős Magda* és *Paeyer Károlyné* a technológián nélkülözhetetlen tapasztalattal segítettek. Meg kell említeni a KFKI, ma RMKI-s gyorsítót építő, üzemeltető csapat munkatársait, legalábbis a főbb és kiemelkedőt nyújtó tagjait: *Bürger G.*, *Királybidi L.*, *Klopfer E.*, *Kostka P.*, *Pásztor E.*, *Riedl P.*, *Roósz J.*, *Seres Cs.*, akik a legjobb Simonyi-hagyomány szerint építették, tartották üzemben a gyorsítókat, implantereket. Köszönet érte.

Végül, tágítva a kört, Jim W. Mayer professzor barátsága tette lehetővé, hogy a mikroelektronika-közeli ionsugaras témákban évtizedeken át ott lehettünk az élbolyban, majd a kapcsolatok Heiner Ryssellel (FhG

Inst. Bauelementetechnologie, Erlangen) és a nyolcvanas évek közepétől *Georges Amsellel* (GPS d’C.N.R.S., Paris) erősítették a csapat nemzetközi elismertségét.

És mindezért köszönet a hálás utókortól, Sir Rutherford!

Irodalom

1. Gyulai J., Mezey G.: Felületek és vékonyrétegek vizsgálata MeV energiájú ionokkal. *A szilárdtestkutatás újabb eredményei*. 14. kötet, Szerk. Siklós T., Akadémiai Kiadó, Budapest, 1985.
2. J. A. Davies, D. P. Jackson, J. B. Mitchell, P. R. Norton, R. L. Tapping: Measurement of surface relaxation by MeV ion backscattering and channeling. *Phys. Lett.* 54A (1975) 239.
3. J. Gyulai, O. Meyer, J. W. Mayer, V. Rodriguez: Analysis of silicon nitride layers on silicon by backscattering and channeling effect measurements. *Appl. Phys. Lett.* 16 (1970) 232.
4. L. Doolittle: Algorithms for the rapid simulation of Rutherford backscattering spectra. *Nucl. Instrum. Methods B9* (1985) 344.
5. E. Kótai: Computer methods for analysis and simulation of RBS and ERDA spectra. *Nucl. Instr. Meth.* B85 (1994) 588–596.
6. E. Szilágyi, F. Pásztai: Theoretical calculation of the depth resolution of IBA methods. *Nucl. Instrum. Methods.* B85 (1994) 616.
7. Z. Hajnal, E. Szilágyi, F. Pásztai, G. Battistig: Channeling-like effects due to the macroscopic structure of porous silicon. *Nucl. Instr. and Meth.* B118 (1996) 617.
8. H. Müller, W. K. Chu, J. Gyulai, J. W. Mayer, T. W. Sigmon, T. R. Cass: Crystal orientation dependence of residual disorder in As implanted Si. *Appl. Phys. Lett.* 26 292 (1975)
9. H. Ryssel: DE 2835121 Patent, 1980.
10. L. Csepregi, E. F. Kennedy, T. J. Gallagher, J. W. Mayer, T. W. Sigmon: Reordering of amorphous layers of Si implanted with ³¹P, ⁷⁵As, and ¹¹B ions. *J. Appl. Phys.* 48 (1977) 4234.
11. E. Szilágyi, N. Q. Khánb, Z. E. Horváth, T. Lohner, G. Battistig, Z. Zolnai, E. Kótai, J. Gyulai: Ion bombardment induced damage on silicon carbide studied by ion beam analytical methods. *Mater. Sci. Forum* 353–356 (2001) 271–274.
12. Kótai E., Szilágyi E.: Magyar innovációk a Rutherford-visszaszórási technikában. *Fizikai Szemle* 61 (2011) 301.

MAGYAR INNOVÁCIÓK A RUTHERFORD-VISSZASZÓRÁSI TECHNIKÁBAN

Kótai Endre, Szilágyi Edit

MTA KFKI Részecske- és Magfizikai Kutatóintézet

Magyar kutatók igen korán, már a 60-as évek végén bekapcsolódtak a Rutherford-visszaszórási spektroszkópia (RBS)¹ alkalmazásába és fejlesztésébe. A fejlesztések legfőbb célja az volt, hogy minél pontosabb képet kapjunk a vizsgálandó minták összetételéről, eloszlásáról, továbbá az egykristályos anyagokban az elemek elhelyezkedéséről, rácsbéli helyzetükről és a kristályhibák eloszlásáról. Bemutatjuk, hogyan lehetett – ma már sok esetben triviálisnak tűnő ötletekkel – javítani az analízis érzékenységét, tömeg- és mélységfelbontását és ezen ötletek alkalmazásával kiváltani a méregdrága,

nagyfelbontású berendezéseket, detektorokat, amelyek beszerzésére abban az időben gondolni sem mertünk.

Legfontosabb hozzájárulásaink a módszer fejlesztéséhez a következők voltak időrendben:

1. Kémiai elemösszetétel meghatározása a mélység függvényében (1970) [1].

2. Oxigén-detektálás érzékenységének közel egy nagyságrenddel való növelése ¹⁶O(α,α)¹⁶O reakció alkalmazásával (1972, 1975) [2, 3].

3. Mélységfelbontás javítása sűrűlódó beesés alkalmazásával. Csatornahatással kombinált RBS mélységfelbontásának javítása sűrűlódó detektálás alkalmazásával (1978) [4].

4. Könnyű elemek analízise céljából az RBS kombinációja magreakciókon alapuló (NRA) módszerekkel (N és O, 1976).

Elhangzott az MTA Rutherford-emléknapján 2011. május 5-én.

¹ A visszaszórási módszerről részletesebben olvashatnak az előző cikkben (Gyulai József: *A Rutherford-visszaszórás és „karrierje” a mikroelektronikában*).

5. Rétegtárolítással kombinált módszer kifejlesztése.

6. Eljárás kidolgozása kváziorientált polikristályos minták vizsgálatára (1975).

7. Az analízáló ionoknál könnyebb elemek kimutatása (ERDA) (1981) [5]. Hidrogén és deutérium hatáskeresztmetszetének kimérése és a hatáskeresztmetszet energia- és szögfüggésére közelítő analitikus kifejezés meghatározása (1986, 1989) [6].

8. Transzmissziós Faraday-kalitka kifejlesztése (1990) [7].

9. Eljárás kidolgozása pórusos anyagok pórusszerkezetének meghatározására (1996) [8].

10. A mélységfelbontásra hatással levő fizikai folyamatok (többszörös szórás, energia elmosódás, Doppler-effektus stb.) pontos meghatározása és analitikai formulák kidolgozása (1995–2000) [9, 10].

11. A szén-detektálás érzékenységének javítása $^{12}\text{C}(\alpha,\alpha)^{12}\text{C}$ reakció alkalmazásával (2001) [11].

Kezdetek

Az 1960-as évek végén megkezdődött a Rutherford-visszaszórás analitikai módszer széleskörű alkalmazása, elsősorban a félvezető-kutatásokban. Ebben az időben alakult meg az RBS-kutatások egyik iskolateremtő központja a Kaliforniai Egyetemen (Caltech). Ide került ki ösztöndíjasként *Gyulai József*, akinek egyik első feladata a szilíciumnitrid és szilíciumoxid minták analízise volt. Ekkor szembesült azzal a ténnyel, hogy habár a módszer régóta ismert volt, de nem készült olyan kiértékelő eljárás, amely segítségével a rétegek összetételét és annak mélységeloszlását ki lehetett volna számolni. Ő alkotta meg az első képletet és alkalmazta szilíciumnitrid mintákra (1. ábra) [1].

Közben idehaza 1971-ben befejeződött a KFKI 5 MeV-es Van de Graaff gyorsítójának első rekonstrukciója. Az újraindult gyorsítón *Keszthelyi Lajos* javaslatára megindultak a visszaszórásos mérések. Mindjárt az első évben igen jelentős eredményt értek el. Sikertült az oxigén-kimutatás érzékenységét egy nagyságrenddel javítani.

Érzékenység növelése rezonanciaszórással

Az RBS-módszer egyik kezdeti problémája volt, hogy a könnyű elemek kimutathatósága nehézségekbe ütközött, ha a minta nehéz elemeket is tartalmazott tömbi eloszlásban. A rugalmasan szórt ion E energiája arányos az ion szórás előtti E_0 energiájával. Az arányosságot jellemző k faktort laboratóriumi rendszerben a következő képlet adja meg:

$$k = \frac{E}{E_0} = \left(\frac{m \cos \Theta \pm \sqrt{M^2 - m^2 \sin^2 \Theta}}{M + m} \right)^2,$$

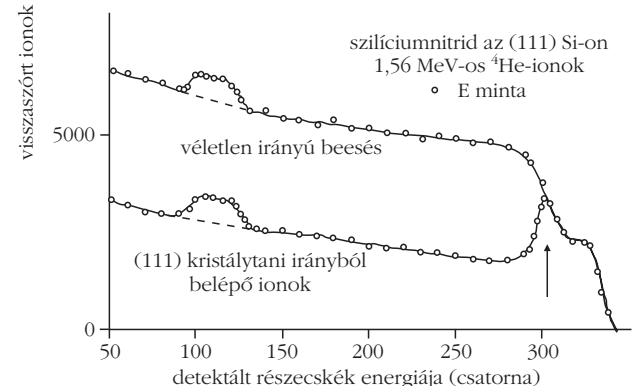
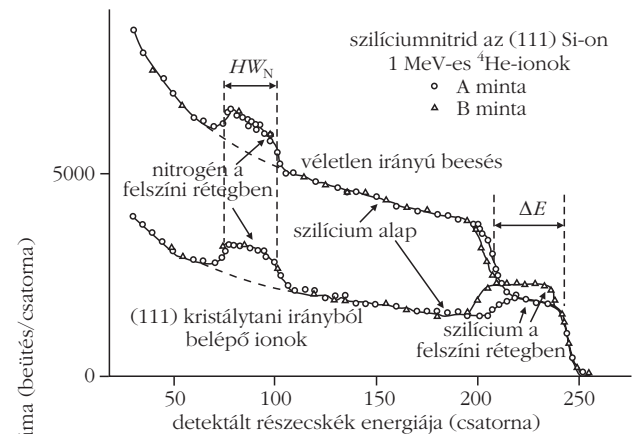
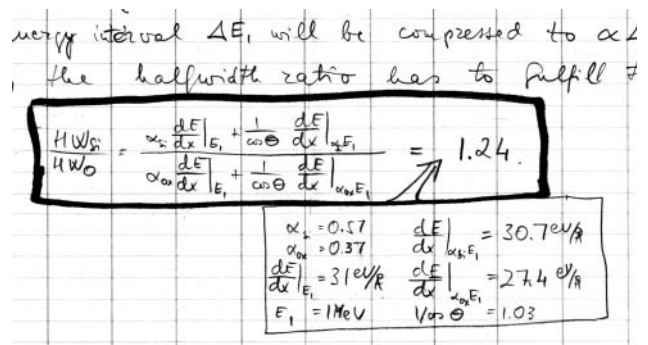
ahol m az ion, M a szóró atom tömege, Θ a szórási szög.

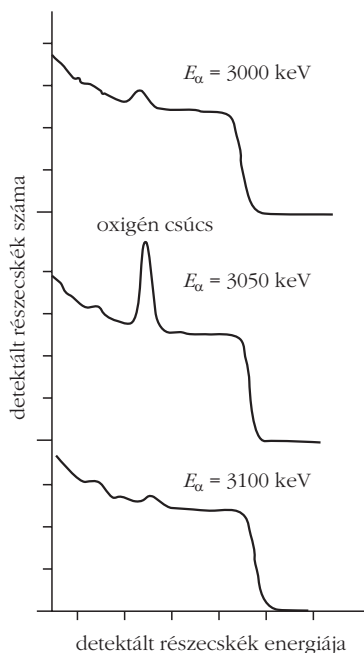
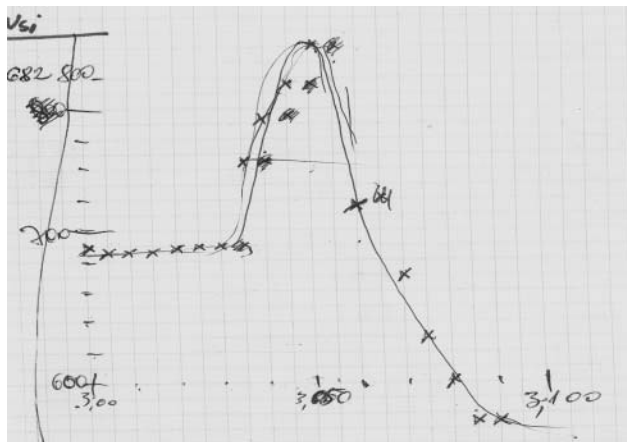
A rugalmasan szórt ion energiája annál nagyobb, minél nehezebb atomról szóródik. A nehezebb elemekről szóródó ionok így folytonos háttérrel adnak a könnyebb elemekről szóródott ionok esetében. A jel/háttér viszonyt tovább rontja, hogy a szóródás valószínűsége – amit a szórási hatáskeresztmetszet ír le – arányos az atomszám négyzetével. A Rutherford-hatáskeresztmetszet laboratóriumi rendszerben a következő:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{Z_1 Z_2 e^2}{2 E_0 \sin^2 \Theta} \right)^2 \frac{\left[\cos \Theta + \sqrt{1 - \left(\frac{m}{M} \sin \Theta \right)^2} \right]^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{m}{M} \sin \Theta \right)^2}},$$

ahol Z_1 az ion, Z_2 a szóró atom rendszáma.

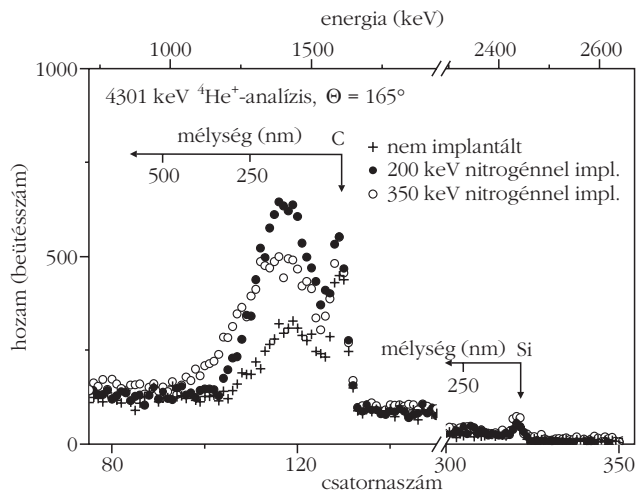
1. ábra. Másolat az eredeti jegyzőkönyvből és az első alkalmazás.





2. ábra. Az oxigén-rezonancia első alkalmazása (az eredeti jegyzőkönyvből kimásolva): visszashórési spektrum különböző ionenergiák esetében. Megfigyelhető, hogy 3050 keV-es energián az oxigén-csúcs jelentősen megnőtt.

Szemléletes példa látható az 1. ábrán, ahol a nitrogén-csúcs a szilíciumról szórt ionok folytonos hátterén ül. A probléma megoldásában segítséget jelentett, hogy a visszashórásos technikával foglalkozó kutatóink korábban magfizikával foglalkoztak, ellentétben a világ többi helyével, ahol szilárdtest-fizikusok indították el az RBS-laboratóriumokat. A magfizikusok jól tudták, hogy az ötvenes-hatvanas években a magszerkezet-kutatások során sok elem szórásis hatáskeresztmetszetét megmérték abban az energiatarományban is, ahol az RBS-méréseket végezzük. Egyes könnyű elemek esetén rugalmas rezonanciaszórásokat találtak, ahol a szórás kinematikája nem változik, de a hatáskeresztmetszet egy szűk energiatarományon belül a Rutherford-érték többszöröse lehet. Az oxigén esetében a $^{16}\text{O}(\alpha, \alpha)^{16}\text{O}$ szórásnak 3045 keV-en van egy ilyen rezonanciája, ahol a hatáskeresztmetszet a Rutherford-érték 17-szerese, és a rezonancia félértékszélessége 13 keV [12]. Ezért ezen



3. ábra. Szén rács sugárzáskárosodásának kimutatása szilícium-karbidban csatornahatással kombinált rezonanciaszórással. A kereszt a nem implantált, a fekete kör a 200 keV, üres kör a 350 keV energiájú nitrogénnel implantált minta spektrumát jelöli.

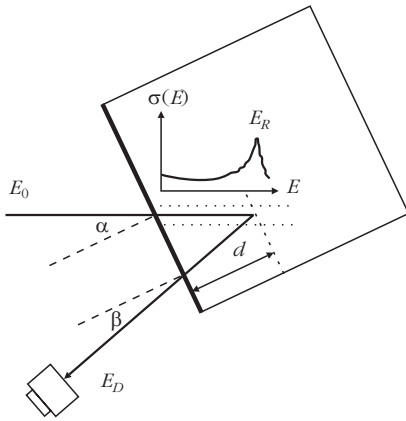
az energián mérve az oxigén-csúcs jól kiemelkedik a szilícium-háttérből (2. ábra).

Kutatóink nem csak kimutatták a rezonanciaszórás alkalmazhatóságát [2], hanem kidolgozták az ilyen spektrumok kiértékelésének szabályait is [3]. Ez az eredmény ma is minden RBS-sel foglalkozó tankönyvben szerepel.

Hasonló problémába ütköztünk a kilencvenes évek elején a szilíciumkarbid vizsgálatokor. A SiC nagy tiltott sávzélessége miatt igen alkalmas optoeletronikai és nagyáramú félvezető eszközök készítésére. A gyártás egyik nagy problémája, hogy nehéz adalékanyagokat bevinni. Szinte egyedüli járható út az ionimplantáció. Ezért volt fontos meghatározni az implantáció okozta rácskárosodást és megszüntetésének módját. Kiváló eszköz erre a csatornahatással kombinált RBS, azonban a szilícium jele elnyomja a szénét. A korábbi tapasztalatokból okulva kerestünk egy olyan rezonanciaszórás szén esetére, amelyet felhasználhatnánk az analízishez. 4260 keV-en találtuk meg a számunkra legalkalmasabb $^{12}\text{C}(\alpha, \alpha)^{12}\text{C}$ rezonanciát, amely hatáskeresztmetszete a rezonancia energián százszorosa a Rutherford-értéknek [13]. Felhasználásával kimutathattuk a sugárkárosodás mértékét mind a szilícium, mind a szén rácsban (3. ábra) [11].

Rezonanciaszórás speciális alkalmazása

Az RBS-mérések kiértékelésének egyik sarkalatos pontja, hogy ismerni kell az ion és a szórt részecske fékeződését (energiavesztését) a vizsgálandó mintában. Erre pontos elméleti számolás nem létezik, a mért fékeződési adatokra illesztett fél-empirikus képletekkel dolgozunk. A csatornázott ionokról csak annyit tudunk, hogy fékeződésük kisebb, mint az amorf anyagban mért érték. Néhány levékonyított, illetve speciálisan preparált egykristály-mintán történtek már mérések, de ezek nem szolgáltattak elég információt a kristályhibákat tartalmazó mintákban mérhető fékező-



4. ábra. A csatornázott ionok fékeződésének meghatározására szolgáló kísérlet elrendezése. E_0 a belépő ion energiája, α a belépési szög, d a szórás távolsága a felülettől, E_D a detektált energia, β a kilépési szög.

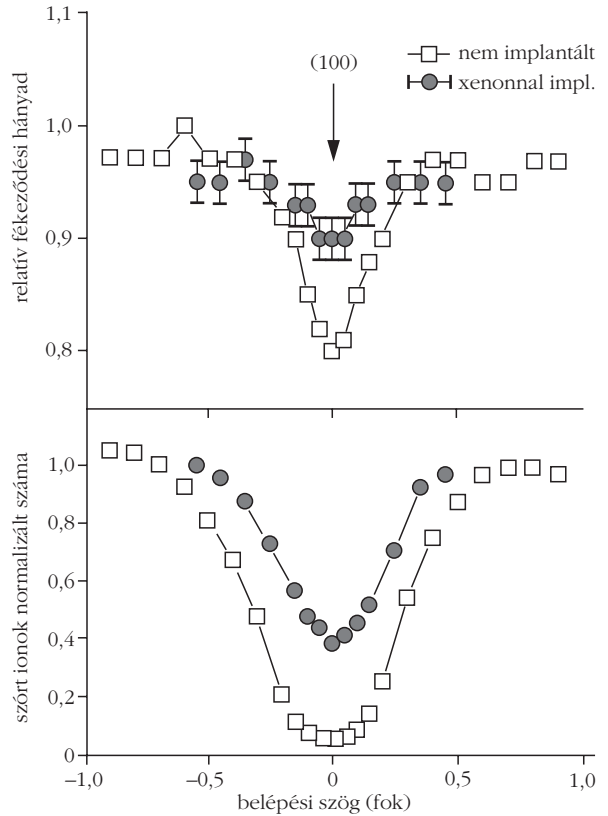
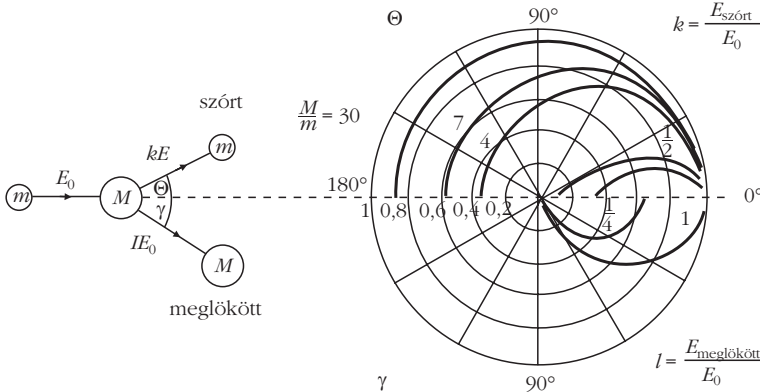
désekről. A nagyon keskeny (néhány keV-es) rezonanciákat használtuk fel a csatornázott ionok fékeződésének meghatározására. Az egykristály-mintát úgy orientáltuk, hogy az ionok befelé csatornában haladjanak, majd a szórt ionok kifelé csatornán kívül (4. ábra). A mért energiaspektrumokból meg tudtuk határozni a rezonánsan szóródott ion energiáját, majd a rezonanciaenergia ismeretében kiszámolhattuk, milyen mélyen történt a szórás. Ezután már egyszerűen megadható a befelé csatornában haladó ion átlagos fékeződése. Kimutattuk a fékeződés változását egykristályban, illetve kristályhibákat tartalmazó kristályok esetében (5. ábra) [14].

Könnyű elemek kimutatása

Az ionok csak olyan atomokról képesek visszaszóródni, amelyek tömege nagyobb, mint a bombázó ion tömege. A vele egyenlő tömegű, vagy könnyebb atomokról csak előre tudnak szóródni. A kinematika ismeretében megadható az a határszög, amelynél nagyobb szögben nem képes az ion szóródni:

$$\Theta_{\min} = \arcsin\left(\frac{M}{m}\right).$$

6. ábra. A szóródott ion és a meglökött atom kinematikai faktora a szög és a tömegarány (M/m) függvényében.



5. ábra. Felső ábrán a csatornázott ionok relatív fékeződése tökéletes (üres kocka) és implantált szilíciumkristályban (szürke kör) a csatornairányhoz képest mért belépési szög függvényében. Az alsó ábrán a szórt ionok száma látszik.

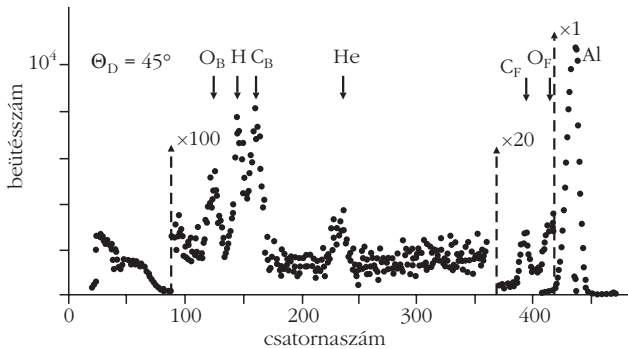
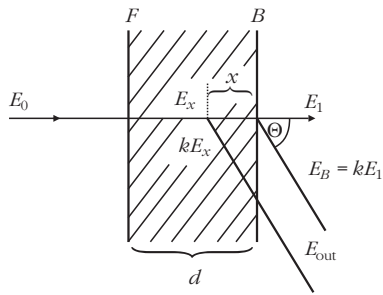
Kis szögben azonban nem csak az előreszórt ion mozog, hanem az általa meglökött atom is. Ennek energiája szintén arányos az ion szórás előtti energiájával, amely arányossági (kinematikai) faktort a következő képlet írja le (laboratóriumi rendszerben):

$$l = \frac{4 m M}{(m + M)^2} \cos^2 \gamma,$$

ahol γ a meglökött atom mozgásának szöge az ion útjához képest. A két kinematikai faktort a szög függvényében a 6. ábra mutatja.

Az első kísérleteket vékony alumíniumfólián végeztük, amelybe He-ionokat implantáltunk. Két detektort használtunk, az egyikkel a 45 fokban az előreszórt ionokat és kilökött atomokat, a másikkal 165 fokban a visszaszórt ionokat detektáltuk [5]. A 45 fokban elhelyezett detektor által mért energia spektrumot a 7. ábra mutatja.

A bejelölt csúcsok a következők: a kilökött oxigén (O_B), szén (C_B) és hidrogén (H) atomok, illetve az oxigénről (O_F) és szénről (C_F), valamint az alumíniumfóliáról szóródott ionok (Al). A spektrum közepén a kilökött, illetve szóródott He-ionok láthatók (He). Az utóbbi esetben, mivel He-ionokat használtunk és 45 fokban mér-



7. ábra. Héliumot tartalmazó alumíniumfólián mért előreszórt spektrum és a mérési elrendezés. A mérést 4000 keV-es He-nyalábbal végeztük. E_0 a belépő ion energiája, E_1 a kilépő ion, E_{out} a detektált részecske energiája, x a szórás helyének távolsága a fólia hátsó falától, d a fólia vastagsága, k a kinematikai faktor, Θ a detektálás szöge.

tünk, a szóródott ionok és meglökött atomok energiája azonos.

Látható, hogy sikerült hidrogént és héliumot is kimutatni. Az előreszórás hátránya, hogy csak megfelelően vékony fólia esetében lehet alkalmazni. Ez a hátrány kiküszöbölhető, ha nem transzmissziós, hanem érintőleges mérési elrendezés használnánk. Ebben az esetben azonban a szórt ionok igen nagy háttérrel adnának a kilökött ionok számára. Ha azonban valamilyen módszerrel el lehetne különíteni a szórt és meglökött részecskéket, akkor a könnyű elemek háttérmentesen is detektálhatók lennének. Ennek egyik módszere, ha tömeg szerint tudnánk szeparálni. Ez történhet mágneses vagy repülési idő spektrométerrel. Ezek azonban drága berendezések és nehezen illeszthetők a meglévő kamrához.

Tudjuk azonban, hogy a könnyebb elemek fékeződése a különféle anyagokban általában kisebb, mint a nehezebbeké. Ha egy vékony fóliát helyeznénk a detektor elé, ami elnyelné a szóródott héliumot és nehezebb részecskéket, de a kilökött hidrogént átengedné, akkor egy könnyen megvalósítható, olcsó módszert kapnánk. Laboratóriumunkban éppen azt számoltuk ki, hogy milyen anyagú és vastagságú fóliát kellene használni, amikor megjelent a fóliás módszer leíró első publikáció. A ma használt elrendezést a 8. ábra mutatja.

A módszert ma ERDA-nak (Elastic Recoiled Detection Analysis) hívják.

Habár ebben az esetben lemaradtunk az elsőbségről, nem adtuk fel. Kimértük a mérések kiértékeléséhez szükséges hatáskeresztmetszeteket az általunk használt energia- és szögterületben [6]. A kiértékelés

és a spektrumszimulációk segítségével egy közelítő képletet dolgoztunk ki:

$$\frac{d\sigma}{d\Theta} = 8,91 E^2 - 0,119 \Theta^2 - 455,7 E + 10,2 \Theta - 1,38 \Theta E + 693,$$

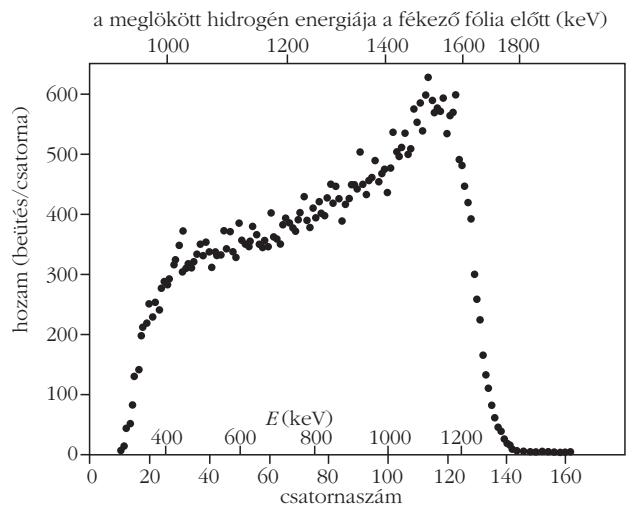
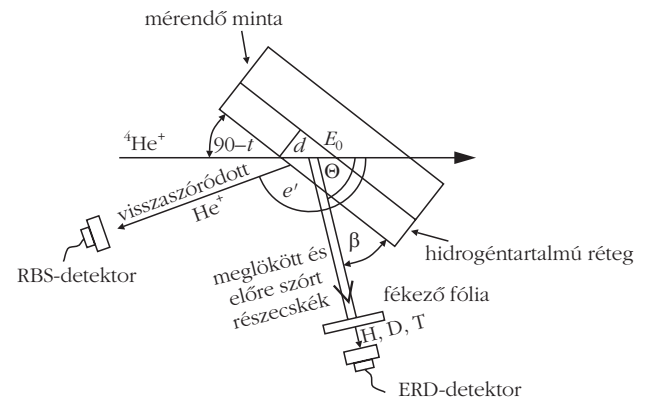
ahol E az ion energiája (MeV), Θ a szórás szög (fok) és a számított hatáskeresztmetszet mértékegysége $10^{-31} \text{ m}^2/\text{sr}$. A képlet 1 és 3,5 MeV energiatarományban érvényes.

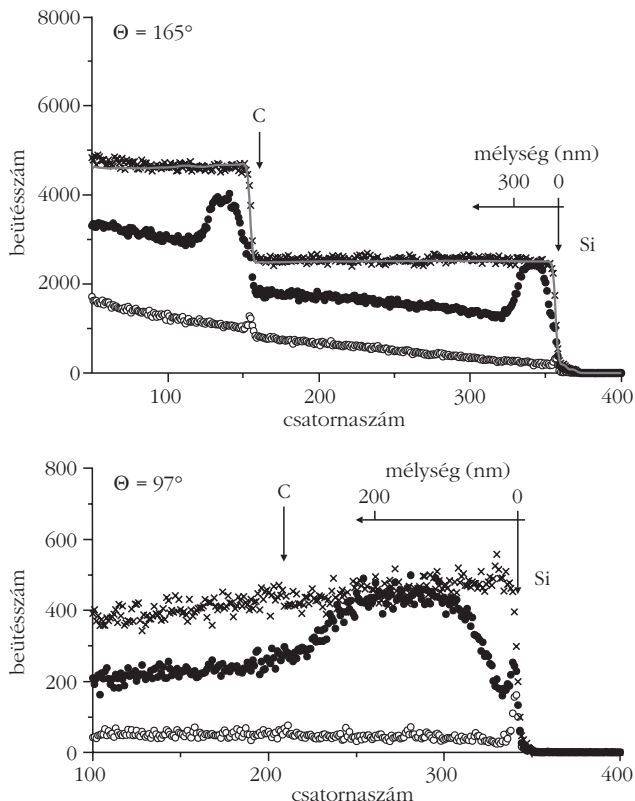
Mélységfelbontó-képesség növelése

Mélységnek az ionnyaláb-analitikában a felülettől mért távolságot nevezzük. Mélységfelbontó-képességen azt a minimális mélységkülönbséget értjük, amely esetben az ott elhelyezkedő atomokról szóródott ionokat meg tudjuk különböztetni, azaz meg tudjuk mondani, hogy az atomok különböző mélységben vannak. A standard RBS-mérések esetében (1–2 MeV He ionok, 165° detektálási szög) ez az érték 20–50 nm.

Mitől függ a mélységfelbontó-képesség? RBS esetében a szóródott ionok energiáját mérjük, ezért a különböző mélységben levő atomokról szórt ionok mér-

8. ábra. Ma használatos ERDA-elrendezés és egy mért hidrogén-spektrum.





9. ábra. Szilíciumkarbid csatornázott spektruma 165 és 97 fokos detektálási szög esetében. A nyitott kör a nem implantált, a fekete kör a csatornázott, a kereszt a nem csatornázott ionok spektrumát jelöli. A folytonos szürke vonal a szimulált spektrumot mutatja.

hető energiakülönbségétől függ. Triviális, hogy az egyik meghatározó tényező az alkalmazott detektor energiafelbontó-képessége. Az általánosan használt felületi záróréteges detektorok esetében ez 12–15 keV. Javítani lehet, ha más elven működő detektorokat használunk, mint az elektrosztatikus, mágneses vagy repülési idő spektrométereket. Habár ezek felbontóképessége 2–5 keV, azonban drága és nagyméretű berendezések, hatásfokuk pedig kicsiny (A felületi záróréteges detektorok hatásfoka 100%).

A másik alaptényező, ami a mélységfelbontó-képességet meghatározza, az ionok energia-vesztesége, azaz a fékeződése. Két különböző mélységben levő atom által szórt ionok energiakülönbsége annál nagyobb, minél több energiát veszít az ion a közöttük levő útszakaszon (befelé és kifelé is). A fékezőképesség az ionok és az anyag kölcsönhatásától függ, azaz az alkalmazott ion fajtájától, energiájától és a minta összetételétől. Mivel éppen ez utóbbit akarjuk meghatározni, ezért csak az első kettő tényezőt változtathatjuk. Könnyű ionok esetében tudjuk, hogy kisebb energiákon (< 1 MeV) a fékező-

dés nagyobb. Ezzel a módszerrel ugyan növelhetjük az energiakülönbséget, azonban a konstans kinematikai faktor miatt a tömegfelbontó-képesség romlik. Másik lehetőség, hogy nehezebb iont használunk, amelynek fékeződése az adott energiatarományban nagyobb. Csoportunk mutatta ki, hogy nitrogén ionok alkalmazásával ugyan javítható a mélységfelbontó-képesség, azonban a nehezebb ionok jobban roncsolják a mintát, sőt a detektort is [15]. Ezért ez az út felületi záróréteges detektorokkal nem járható.

Mit lehet tenni, ha nincs pénzünk jobb detektor vásárlására? Hogyan növeljük a különböző mélységben levő atomokról szórt ionok közötti energiakülönbséget, ha a minta és az ion is adott? Már az RBS alkalmazásának első évtizedében rájöttek, hogy úgy is lehet az energiakülönbséget növelni, ha az úthosszat növeljük. Ezt úgy érjük el, hogy a mintát megdöntjük, az ion nem merőlegesen esik be. Ezzel a módszerrel 2–3 szoros mélységfelbontó-képesség javulást lehet elérni. A módszer hátránya, hogy csatornahatás esetén nem alkalmazható, hiszen a beesés szögét a csatorna iránya szabja meg. Csoportunk jött rá, hogy nem kell a mintát megdönteni, elég, ha a detektálási szöget úgy választjuk meg, hogy a detektált ionok közel sűrűlő irányban lépjenek ki a mintából [4]. Az eredményt a 9. ábra mutatja.

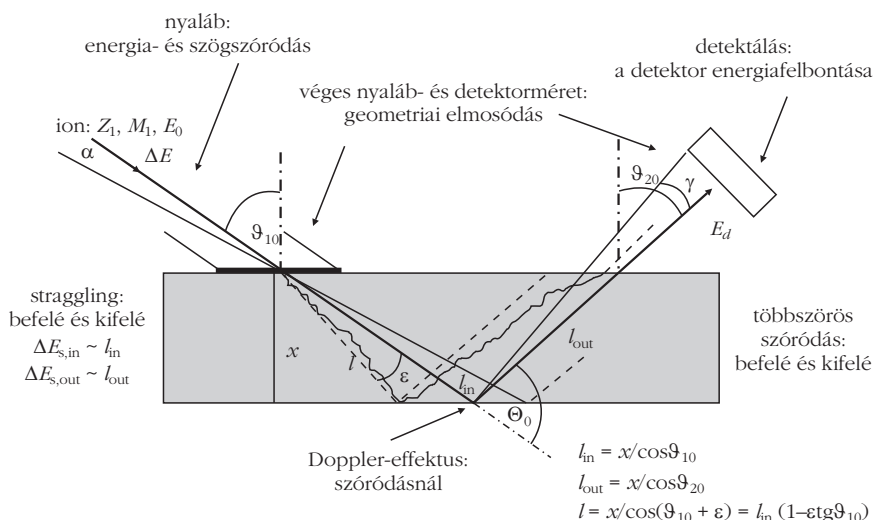
Ezzel a módszerrel 2 MeV-es He-ionok alkalmazása esetében elérhető az 5 nm-es felbontóképesség. A különféle csoportok között zajló versenyt mutatja, hogy ez az eredményünk egy időben jelent meg egy ausztrál csoport hasonló eredményével.

Eddig két tényezőről esik szó, ami meghatározza a mélységfelbontó-képességet. Valójában ezt több más effektus is befolyásolja, amelyek adott esetben drasztikusabb hozzájárulást is adnak. Csoportunk tagjai a Párizsi Egyetem professzorával, *Amsel Györggyel* együttműködve elhatározták, hogy utánajárnak az összes effektusnak és megpróbálnak elméleti leírást adni ezekről.

A számba vehető effektusokat a 10. ábra mutatja.

1. *A nyaláb energia- és szögszórása.* A belépő ionnyaláb nem teljesen monoenergiás, az alkalmazott gyor-

10. ábra. A mélységfelbontó-képességet befolyásoló tényezők.



sítótól függően az energiaszórása 0,5–2 keV lehet. A nyaláb nem is teljesen párhuzamos, hanem az alkalmazott nyalábkollimáló rendszerek miatt 0,1–1 fokos eltérés is lehet. Mindez befolyásolja az adott mélységig megtett utat és a szórás előtti ionenergiát.

2. *A detektor energiafelbontása.* Ezt már részletesen ismertettem.

3. *Véges nyaláb- és detektorméret.* A nem pontszerű méretek befolyásolják a detektálás szögét és az ion által megtett utat is. Geometriai elmosódásnak is hívják.

4. *Straggling.* Erre nincs bevált magyar név, talán energiaelmosódásnak lehetne fordítani. Az effektus lényege, hogy az ion-anyag kölcsönhatás nem folytonos jelenség. A fékeződés az ionok atomokkal és elektronokkal való kölcsönhatásaként írható le, amely statisztikai folyamat. Ez azt jelenti, hogy két ion ugyanolyan hosszú úton nem teljesen egyenlő mennyiségű energiát veszít.

4. *Többszörös szórás.* Az ionok az anyagban haladva több kisszögű szórást szenvednek el. Ez azt jelenti, hogy a megtett út nagyobb, mint a két pont közötti egyenes szakasz hossza.

6. *Doppler-effektus.* A szóró centrumok – atomok – nem fixen rögzített pontban állnak. Az atomok hőmozgást végeznek, azaz az ion energiája a szóródás előtt az atomhoz rögzített koordináta-rendszerben változhat.

Kollégáinknak sikerült ezeket az effektusokat elméletileg leírni és kidolgozták, hogyan lehet ezen effektusok járulékát összegezni [9]. Az eredmények alapján készült el a DEPTH program, amely segítségével kiszámolhatóvá vált, hogy adott mérési elrendezés esetén mennyi a mérhető mélységfelbontás és hogyan függ a mélységtől. Ez a program nagyban segíti a kutatókat, hogy a mérésüket minél pontosabban megtervezhessék.

Nanotechnológiai alkalmazás

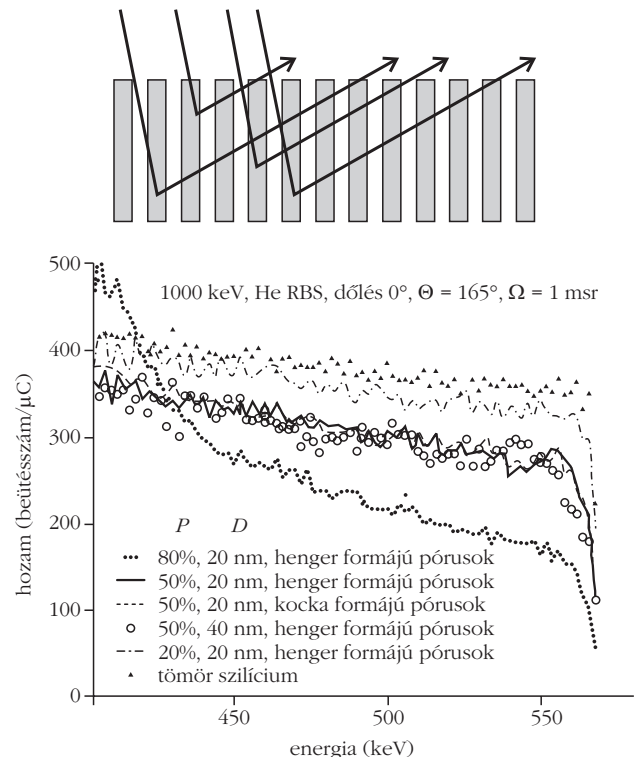
A Rutherford-visszaszórási technika kiválóan alkalmazható volt a mikroelektronikában. Az RBS érzékenysége (10^{13} – 10^{15} atom/cm²), analizálható mélységtartománya (0–1 μ m) és mélységfelbontó-képessége (20–50 nm standard módban és 5 nm optimalizált elrendezésben) megfelelt az akkor alkalmazott vékonyrétegek és implantált dózisosok analizálására. A csatornahatással kombinált mérések megadták a szükséges információt az adalékatomok rácshelyzetére, a kristályhibák nagyságára és eloszlására. Az alkalmazott nyaláb átmérője általában $1 \times 1 - 0,3 \times 0,3$ mm volt.

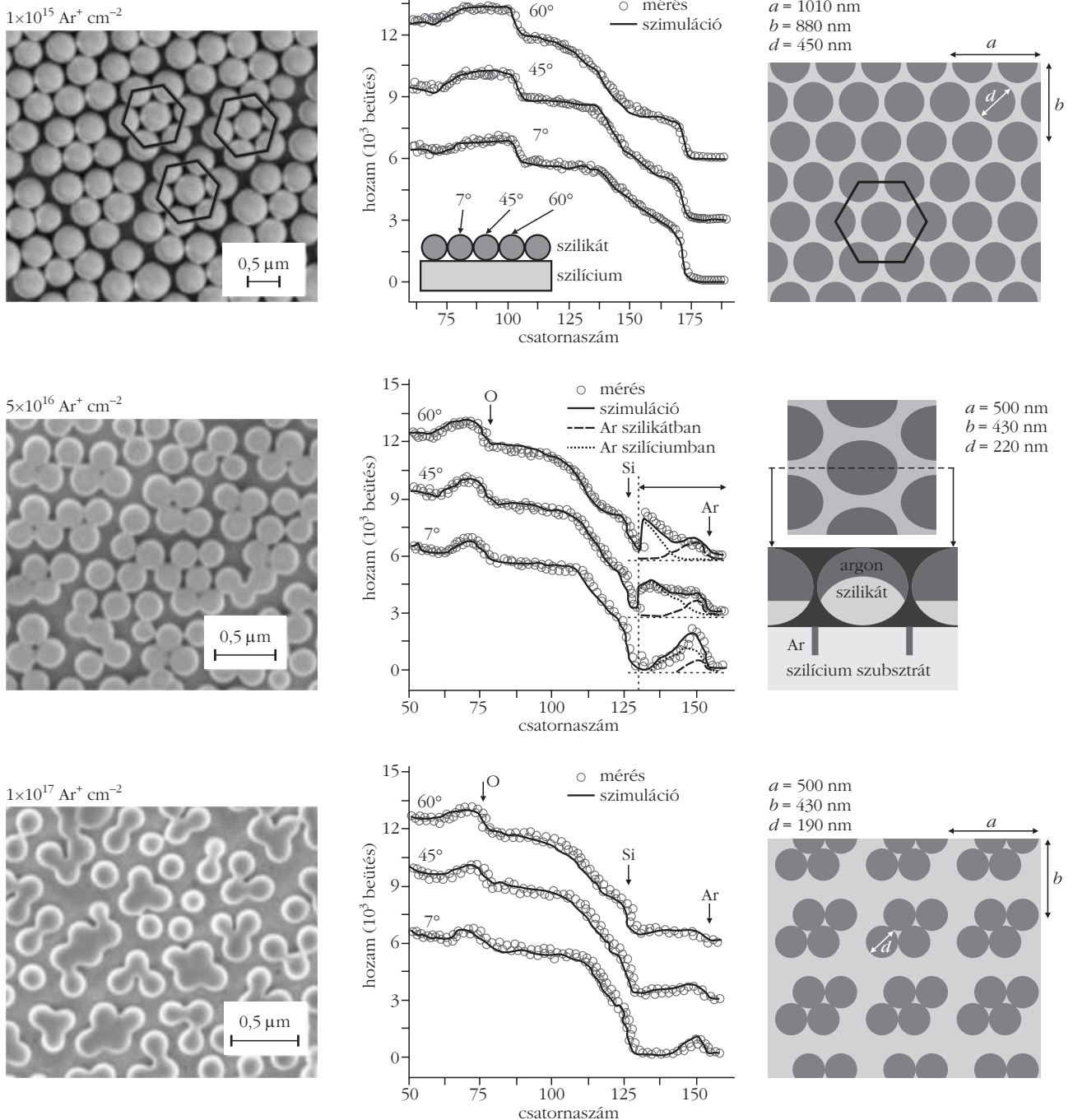
Mára azonban a mikroelektronikai elemek mérete 50 nm alá csökkent. Az implantáció jelentősége ugyan fennmaradt, de ma már nagyságrenddel kisebb dózisosokat és sokkal kisebb energiát használnak. Az elemek laterális mérete is nanométeres tartományba csökkent. Az elmúlt két évtizedben történtek próbálkozások az RBS alkalmazásának kiterjesztésére nanométer méretű elemekre, mint például a MEIS (Medium Energy Ion Scattering – közepes energiájú ionszórás),

vagy FIB (Focused Ion Beam – mikrométer alatti fókuszált ion nyaláb). Ezek azonban speciális és drága berendezések, a világon csak néhány laboratóriumban állnak rendelkezésre. A fókuszált nyalábok esetében további problémát jelent a nyalábtintenzitás. Mivel a szórás hatáskeresztmetszete adott, ezért ugyanolyan pontosságú méréshez ugyanakkora iondózsist kell alkalmazni, függetlenül a nyaláb méretétől. Ez azt jelenti, hogy fókuszált esetben a vizsgálandó folton a mintát ért sugárkárosodás, illetve a bevitt energia és töltés több nagyságrenddel nagyobb. Ez utóbbiak hő-, illetve töltés-sokkot okozhatnak, és módosíthatják a minta összetételét.

A kilencvenes évek elején csoportunk a porózus anyagok vizsgálatával foglalkozott. Ezek az anyagok általában mikrométer alatti üregeket vagy oszlopokat tartalmaznak. Felmerült a kérdés, meg tudjuk-e határozni az üregek méretét és az üregek falára lerakódott rétegek összetételét. A kérdésre szimulációval kerestük a választ. Kifejlesztettünk egy olyan programot (RBS-MAST), amely nanométer méretű elemeket tartalmazó minták RBS-spektrumát volt képes szimulálni [8]. A szimuláció megmutatta, hogy periodikus szerkezetű anyagokban a mérési geometria megfelelő megválasztásával a fenti kérdésekre választ tudunk adni. A 11. ábra bemutatja hogyan tudunk különbséget tenni a különböző porozitású, illetve különböző oszlopméretű anyagok között. Az eredményt kísérlettel igazoltuk oszlopos szerkezetű szilícium mintákon [8]. Megmutattuk, hogy az oszlopok falán levő oxidrétegek vastagsága is meghatározható.

11. ábra. Oszlopos szerkezetű porózus minta szimulált spektrumai különböző porozitás és oszlopméret esetén (P a porozitás, D a pórusok átmérője).



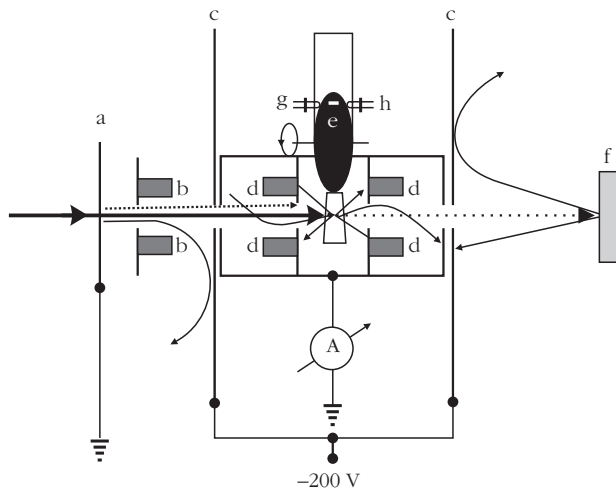


12. ábra. Argonnal különböző mértékben implantált nanométeres szilikát gömbök pásztázó elektronmikroszkópos képei balra, az RBS-MAST program nekik megfelelő cellamodelljei jobbra, valamint a szimulált (folytonos vonal) és a mért RBS-spektrumok (üres körök) középen.

További vizsgálatainkkal kimutattuk, hogy többféle beesési szög mellett végzett mérésekből meghatározható a nanométeres részecskék mérete is. A 12. ábra mutat egy példát. A feladat a következő volt: a nanogömb-litográfiában (NSL – nanosphere lithography) nanométer méretű kolloid részecskék önszerveződő rétegrendszerét használják maszkolásra, akár ionbesugárással kombinálva, rendezett mintázatok kialakítására. Azonban az ion-anyag kölcsönhatás miatt az ilyen méretű részecskék deformálódnak, sőt a hordozó anyagához „ragadhatnak”. Kérdésünk az volt, kimutatható-e a gömbök alak és méretváltozása, illetve

a besugárzott ionok eloszlása a gömbökben. Szilíciumlemez felületére nanométer méretű úgynevezett Ströber szilikát gömböket vittünk fel Langmuir–Blodgett (LB) technikával. A mintákat ezután 500 keV energiájú Ar ionokkal sugáztuk be. A mért és a szimulált spektrumokat a 12. ábra mutatja. Látható, hogy a gömbök méretét, az Ar atomok eloszlását igen pontosan meg tudtuk határozni [16].

Összefoglalva megállapíthatjuk, hogy az RBS ma is alkalmazható periodikus szerkezetű, nanométer méretű elemek analizésére az általunk kifejlesztett RBS-MAST program segítségével.



- | | |
|-------------------------|-------------------------|
| a) utolsó nyílábrés | — belépő nyaláb |
| b) d) állandó mágnes, | kilépő nyaláb |
| c) árnyékolás | szórt ion |
| e) nyalábszaggató lemez | — másodlagos elektronok |
| f) a mérendő minta | |
| g) LED | |
| h) fototranzisztor | |

13. ábra. Transzmissziós Faraday-kalitka elvi vázlata.

Hardverfejlesztés

A visszaszórásos spektrumok kiértékeléséhez pontosan ismerni kell az analizáló ionok számát, függetlenül a minták szerkezetétől, összetételétől, az alkalmazott geometriától. Az ionok számát a begyűjtött töltésből határozzuk meg. A pontos mérést megnehezíti, hogy az ionok nemcsak szóródnak a szilárd anyagok atomjain, hanem másodlagos elektronokat is keltenek. A mintát elhagyó elektronok száma függ az ion fajtájától, energiájától, a belépés szögétől, a minta összetételétől és egy ion akár több elektront is kelthet. A mérés során ezért gondoskodni kell arról, hogy az elektronok ne szóródjanak szét, hanem tereljük vissza a töltésmérő eszközbe. Ilyen eszköz a magfizikusok által már régóta használt Faraday-kalitka. A kalitka egy zárt doboz, amelynek egy szűk nyílása van csak, ahol az ion beléphet. Annak valószínűsége, hogy a szórt ionok, vagy a kilökött elektronok kijussanak a kalitkából igen csekély, ezért a kalitkába jutott töltések mérésével, kicsi hibával az ionok által hordozott töltéseket tudjuk megkapni. A módszer hátránya, hogy a mintát és a detektort is a kalitkában kellene elhelyezni úgy, hogy a mintát forgatni is tudjuk. Ha az egész vákuumkamrát tekintenénk egy Faraday-kalitkának, akkor is számolni kellene a szivárgó áramokkal.

Ennél jobb megoldást fejlesztett ki korán elhunyt kollégánk, *Pászti Ferenc*. Transzmissziós Faraday-kalitkát tervezett (13. ábra). A kalitkán két, egyvonalban elhelyezett lyuk található. Az egyikben belép az ion-nyaláb, a másikon kilép és eljut a vizsgálandó mintára. A kalitkában egy forgó lemez található, amely periodikusan elzárja a nyaláb útját. Amikor a nyalábút zárva van, a berendezés úgy működik, mint egy valódi Faraday-kalitka. Nyitott állapotban pedig

mérhető a mintáról szórt spektrum. A zárt és nyitott állapot időtartamának pontos beállításával – feltételezve, hogy a nyalábáram egy periódus alatt nem változik – pontosan meghatározható az ionok száma. Arról, hogy a mérőberendezés más elemeiben keletkező másodlagos elektronok ne jussanak a kalitkába, a be- és kilépő rések elé helyezett feszültség alatt álló „szupresszor” lemezek gondoskodnak. Ezzel a berendezéssel nagyobb, mint 99% pontossággal határozható meg az ionok száma [7]. A berendezést több országba is szállítottuk, ahol ma is használják.

Szoftverfejlesztés

Intézetünkben több RBS-szimulációs és kiértékelő programot fejlesztettünk, amelyek közül többet ma már a világ számos laboratóriumában használnak. A három legismertebb közülük a következő:

1. RBX: az egyik legkorábbi kiértékelő és szimulációs program (1984-től folyamatos a fejlesztése). A mai napig az egyetlen alkalmazás, amely képes csatornahatással kombinált spektrumok analitikus kiértékelésére és kristályhibák szimulációjára is [17].

2. DEPTH: Az RBS, NRA, ERDA mérések mélységfelbontásának igen pontos meghatározására kifejlesztett eszköz, amelyet ma már igen széles körben (néhány száz keV-es – több száz MeV-es könnyű és nehéz ionokra) alkalmaznak [9].

3. RBS-MAST: Pórusos anyagok RBS-spektrumának szimulálására kifejlesztett program. Ma már nanoméretű szemcsék és zárványok kimutatására szolgáló mérések kiértékelésére is alkalmazzák [8].

A világon alkalmazott RBS-szimulációs programokról jó áttekintést olvashatunk a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség (NAÜ) megrendelésére készült összefoglalóban [18].

Összefoglalás

Hazánk a Rutherford-visszaszórásos technika fejlesztésében kiemelkedő szerepet játszott. Köszönhető ez annak, hogy a KFKI-ban *Simonyi Károly* vezetésével az ötvenes években elkezdett gyorsítófejlesztések eredményeképpen a 70-es évekre rendelkezésre állt a megfelelő iongyorsító. A mag- és szilárdtest-fizikusok, valamint félvezető-kutatók között igen szoros együttműködés alakult ki. Az ionimplantációs eljárások fejlesztése, a vékonyrétegek fizikájának tanulmányozása inspirálta az RBS-módszer fejlesztését. A szűkös anyagok nem tették lehetővé drága berendezések vásárlását. Ezt innovációval kellett pótolni.

Köszönetnyilvánítás

Az itt felsorolt eredményeket a következő kutatók érték el: *Battistig Gábor*, *†Csepregi László*, *Demeter István*, *Fried Miklós*, *Gyulai József*, *Hajdu Csaba*,

Keszthelyi Lajos, Kótai Endre, Nguyen Quoc Khánh, Lohner Tivadar, †Manuaba Asbrama, Mezei Gábor, Nagy Tibor, †Pásztai Ferenc, Révész Péter, Szilágyi Edit, Szőkefalvi-Nagy Zoltán, Tunyogi Árpád, Varga László, Vizkelethy György, Zolnai Zsolt.

Külön köszönet illeti az EG2R Van de Graaff gyorsító tervezőit, építőit és üzemeltetőit. A gyorsítót teljes egészében Magyarországon tervezték és építették. Túl a második rekonstrukción a gyorsító ma is üzemképes és tudja a tervezési paramétereiket. A KFKI gyorsítóiról részletesebb információ olvasható a *Fizikai Szemle* 54. évfolyamában [19].

Irodalom

1. J. Gyulai, O. Meyer, J. W. Mayer, V. Rodríguez: Analysis of silicon nitride layers on silicon by backscattering and channeling effect measurements. *Appl. Phys. Lett.* 16 (1970) 232.
2. L. Keszthelyi, I. Demeter, G. Mezei, Z. Szőkefalvi-Nagy, L. Varga: Backscattering Investigations on Silicon. *ZfK* 236 (1972) 111.
3. G. Mezey, J. Gyulai, T. Nagy, E. Kótai, A. Manuaba: Enhanced Sensitivity of Oxygen Detection by the 3.05 MeV (α, α) Elastic Scattering. *Ion Beam Surface Layer Analysis 1* (1976) 303.
4. G. Mezey, E. Kótai, T. Lohner, T. Nagy, J. Gyulai, A. Manuaba: Improved Depth Resolution of Channeling Measurement in Rutherford Backscattering by Detector Tilt. *Nucl. Instr. and Methods* 149 (1978) 235.
5. E. Kótai, G. Mezey, F. Pásztai, T. Lohner, A. Manuaba, L. Pócs: Light Impurity Measurements by 2–4 MeV He Beam using Recoil Detection and Forward Scattering. *Proc. of the 2nd All-Union Conf. on Eng. Problems of Fusion Reactors* (1982) 235.
6. E. Szilágyi, F. Pásztai, A. Manuaba, C. Hajdu, E. Kótai: Cross section measurements of the $^1\text{H}(^4\text{He}, ^3\text{He})^1\text{H}$ elastic recoil reaction for ERD analysis. *Nucl. Instr. Meth. B* 43 (1989) 502.

7. F. Pásztai, A. Manuaba, C. Hajdu, A. A. Melo, M. F. DA Silva: Current measurement on MeV Energy ion beam. *Nucl. Instr. Meth. B* 47 (1990) 187.
8. Z. Hajnal, E. Szilágyi, F. Pásztai, G. Battistig: Channeling-like effects due to the macroscopic structure of porous silicon. *Nucl. Instr. Meth. B* 118 (1996) 617.
9. E. Szilágyi, F. Pásztai, G. Amsel: Theoretical approximations for depth resolution calculations in IBA methods. *Nucl. Instr. Meth. B* 100 (1995) 103.
10. E. Szilágyi: Energy spread in ion beam analysis. *Nucl. Instr. Meth. B* 161 (2000) 37.
11. E. Szilágyi, N. Q. Khánh, Z. E. Horváth, T. Lohner, G. Battistig, Z. Zolnai, E. Kótai, J. Gyulai: Ion Bombardment Induced Damage in Silicon Carbide Studied by Ion Beam Analytical Methods. *Mater. Sci. Forum* 353–356 (2001) 271.
12. J. R. Cameron: Elastic Scattering of Alpha-Particles by Oxygen. *Phys. Rev.* 90 (1953) 839.
13. Ye Feng, Zhluing Zhou, Yingyao Zhou, Guoqing Zhao: Cross sections for 165° backscattering of 2.0–9.0 MeV ^4He from carbon. *Nucl. Instr. Meth. B* 86 (1994) 225.
14. E. Kótai: Measurement of the stopping powers for channeled ions in ion implanted single crystal. *Nucl. Instr. Meth. B* 118 (1996) 43.
15. F. Pásztai, G. Mezey, E. Kótai, T. Lohner, A. Manuaba, J. Gyulai, L. Pócs: Surface impurity loss during MeV $^{14}\text{N}^+$ ion bombardment. *Nucl. Instr. Meth. B* 182–183 (1981) 283.
16. Z. Zolnai, A. Deák, N. Nagy, A. L. Tóth, E. Kótai, G. Battistig: A 3D-RBS study of irradiation-induced deformation and masking properties of ordered colloidal nanoparticulate masks. *Nucl. Instr. Meth. B* 268 (2010) 79.
17. E. Kótai: Computer Methods for Analysis and Simulation of RBS and ERDA spectra. *Nucl. Instr. Meth. B* 85 (1994) 588.
18. N. P. Barradas, K. Arstila, G. Battistig, M. Bianconi, N. Dytlewski, C. Jeynes, E. Kótai, G. Lulli, M. Mayer, E. Rauhala, E. Szilágyi, M. Thompson: International Atomic Energy Agency intercomparison of ion beam analysis software. *Nucl. Instr. Meth. B* 262 (2007) 281.
19. Kloppfer E.: Simonyi Károly és a magyar részecskegyorsítók. *Fizikai Szemle* 54 (2004) 204.

VEKTOROK PÁRHUZAMOS ELTOLÁSÁNAK SZEMLÉLTETÉSE – II. RÉSZ

A Foucault-inga és egyebek

Cikkünk első részében először általánosságban vizsgáltuk a vektorok párhuzamos eltolásának kérdését. Ezután egy érdekes antik eszköz, a kínai délirányt jelző kordé működését mutattuk be, amely a jelenséget fizikailag is illusztrálja: miközben a kordé adott felületen adott görbe mentén gurul, a ráerősített jelző kar „tartja az irányát”, pontosabban: párhuzamosan tolódik el. Cikkünk második részében néhány további illusztrációt mutatunk be arra, hogy a párhuzamos eltolás jelensége hol érhető tetten a természetben.

A Foucault-inga

A *Léon Foucault* által javasolt, és először a 19. század közepén elvégzett ingakísérlet a fizika leghíresebb

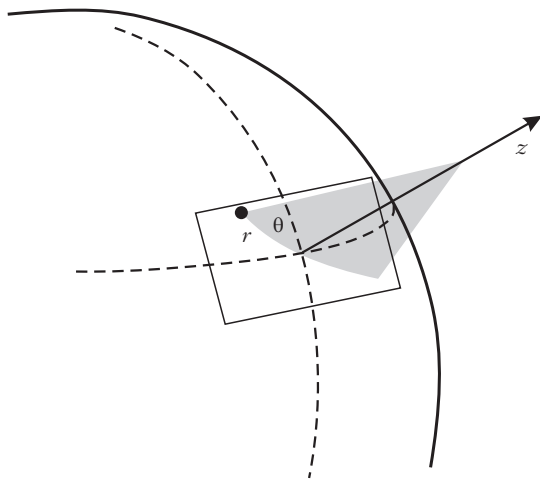
Bokor Nándor, BME Fizika Tanszék

Laczik Bálint, BME Gyártástudomány és -technológia Tanszék

vizsgálatai közé tartozik. A hosszú fonálra függesztett pontszerű tömeg lengési síkja elfordul a Földhöz rögzített vonatkoztatási rendszerhez képest, szemléltetve ezzel a Föld forgását.¹

Manapság is előfordul, különösen a fizikát népszerűsítő irodalomban, az a megfogalmazás, hogy a jelenség oka: a matematikai inga a Föld mozgásától függetlenül megőrzi lengési síkját a *globális inerciarendszerhez*, azaz az állócsillagokhoz rögzített vonatkoztatási rendszerhez képest. Ezen állítás képtelenségét egysze-

¹ Ha az ingakísérlettel célunk kifejezetten a Föld forgásának bizonyítása, akkor ne az Egyenlítőn állítsuk fel a kísérleti apparátust: ott ugyanis – mint látni fogjuk – az inga lengési síkja a mi nézőpontunkból, azaz a *Földhöz rögzített vonatkoztatási rendszerben* nem fordul el.



1. ábra

rű gondolat kísérlettel beláthatjuk: képzeljünk el egy ingát, amelyet az Egyenlítőnél függesztenek fel, és éjfélkor észak-dél irányban hoznak lengésbe. Ha az inga valóban megőrzi lengési síkját az állócsillagokhoz képest, akkor reggel 6-kor a kísérletet végzők feje felett, vízszintes (!) síkban kellene lengenie, ami nyilvánvalóan képtelenség. Valójában csak két olyan földrajzi hely van, ahol – a kezdeti kitérítés irányától függetlenül – az inga megőrzi lengési síkját az állócsillagokhoz képest: az Északi- és a Déli-sark.

Nem segít a helyzetben, hogy időnként még az olyan nagyszerű és precíz tankönyvek is félreérthetően fogalmaznak, mint *Budó Ágoston Mechanikája*: „a Föld nem lehet inerciarendszer, de (...) ilyenek tekinthető egy olyan rendszer, amelynek például a z-tengelye a Föld forgástengelye, az xy-síkot pedig a Föld középpontja és bizonyos állócsillagok határozzák meg; ebben a rendszerben ugyanis az inga lengési síkja nem fordul el” [1]. A zavarhoz – önhibáján kívül – valószínűleg maga Foucault is hozzájárult, hiszen nevezetes cikkében [2] szerepel az a félmondat, hogy „a lengési sík nem fordul el, hanem rögzített marad a térben”, ha azonban figyelmesen olvassuk el a bekezdést, rögtön kiderül, hogy itt egy olyan laboratóriumi kísérletről beszél, amikor egy forgó dobra helyezett fémrúd rezgését vizsgáljuk, és a fémrúd nyugalmi helyzete *egybeesik a dob forgástengelyével*. Ekkor – és analóg módon akkor, amikor a Foucault-inga az Északi- vagy a Déli-sarkon leng – valóban igaz a lengési (rezgési) sík állandósága a térben. Más szélességi körökön azonban nem, hiszen az ingára teljesülnie kell azon kényszerfeltételnek, hogy a lengési sík átmenjen a Föld középpontján.²

Az adott szélességi körön felállított Foucault-inga egy nap alatti szögelfordulását az alábbiakban a www.sciencebits.com/foucault honlapon található levezetés alapján tárgyaljuk.

Vizsgáljuk a fonál végére függesztett m tömegű tömegpont mozgását a Föld érintősíkjában (a tömegpont jó közelítéssel ebben a síkban mozog), a Föld-

höz rögzített vonatkoztatási rendszerben, (r, θ, z) hengerkoordinátákat használva. Az r koordináta a tömegpont távolsága az egyensúlyi helyzettől, θ a lengés szöghelyzete valamilyen kitüntetett irányhoz (például az északi irányhoz) képest, z pedig a függőleges (azaz a Föld középpontjától elfelé mutató) irány (1. ábra). A tömegpontra a nehézségi erő, a fonál húzóereje és a Coriolis-erő hat (a centrifugális erőt elhanyagoljuk).

A nehézségi erő és a fonálerő összetehető egy olyan rugalmas visszatérítő erővé, amely a Hooke-törvénynek engedelmessé a kitéréssel egyenesen arányos – ez lesz felelős a lengőmozgásért –, míg a Coriolis-erő a lengési sík oldalirányú elfordulását okozza. *Newton 2. törvénye* szerint:

$$m\ddot{\mathbf{r}} = -\frac{m\mathbf{g}}{l}\mathbf{r} - 2m\boldsymbol{\Omega} \times \dot{\mathbf{r}}, \quad (1)$$

ahol \mathbf{r} a tömegpont helyvektora, $\boldsymbol{\Omega}$ pedig a Föld forgási szögsebessége. Könnyű belátni, hogy a fenti mozgásegyenletben szereplő vektorok komponensei az (r, θ, z) hengerkoordináta-rendszerben, a Föld adott λ szélességi körén:

$$\begin{aligned} \mathbf{r} &= (r, 0, 0) \\ \dot{\mathbf{r}} &= (\dot{r}, r\dot{\theta}, 0) \\ \ddot{\mathbf{r}} &= (\ddot{r} - r\dot{\theta}^2, 2\dot{r}\dot{\theta} + r\ddot{\theta}, 0) \\ \boldsymbol{\Omega} &= (\Omega \cos\lambda \cos\theta, -\Omega \cos\lambda \sin\theta, \Omega \sin\lambda). \end{aligned} \quad (2)$$

Az előbbi komponensalakokat felhasználva és az (1)-ben szereplő vektori szorzatot kibontva a mozgásegyenlet θ -komponensére a következő egyenletet kapjuk:

$$m(2\dot{r}\dot{\theta} + r\ddot{\theta}) = 2m\dot{r}\Omega \sin\lambda. \quad (3)$$

A Foucault-ingára érvényes az *adiabatikus közelítés* (amely egyébként valamilyen formában rendszeresen felbukkan az ilyen típusú, úgynevezett geometriai fázissal kapcsolatos jelenségeknél): Az inga ω lengési körfrekvenciája (amely tipikusan \sim rad/s nagyságrendű) sokkal nagyobb, mint az a körfrekvencia, amellyel az inga felfüggesztési pontja körbehalad (ez ugyanis a Föld szögsebességével egyezik meg, azaz 2π rad/nap). Ráadásul a lengési sík körbefordulásának körfrekvenciája is, mint kísérleti tapasztalatból tudjuk, $\sim 2\pi$ rad/nap nagyságrendjébe esik.³

Ekkor – az inga lengésének, illetve a lengési sík elfordulásának sok nagyságrenddel eltérő periódusát figyelembe véve – a következő nagyságrendi becslések végezhetők:

$$\dot{r} \sim \omega r, \quad (4)$$

² Másféleképpen: az egyensúlyi helyzet – az elhanyagolható centrifugális erőktől eltekintve – függőleges legyen.

³ Más megfogalmazásban: az inga lengési síkja annyira lassan változik, hogy egy lengésen belül a tömegpont jó közelítéssel ugyanabban a síkban marad.

illetve

$$\dot{\theta} \sim \Omega \theta \quad \text{és} \quad \ddot{\theta} \sim \Omega^2 \theta, \quad (5)$$

így a (3) egyenlet bal oldalán szereplő két tag arányára a következő adódik:

$$\frac{r\dot{\theta}}{r\ddot{\theta}} \sim \frac{\omega r \Omega \theta}{r \Omega^2 \theta} = \frac{\omega}{\Omega} \gg 1, \quad (6)$$

vagyis a (3) egyenletben az $r\dot{\theta}$ tag elhanyagolható. A kapott közelítő egyenletből közvetlenül adódik az inga lengési síkjának elfordulási szögsebessége:

$$\dot{\theta} = \Omega \sin \lambda. \quad (7)$$

Mekkora Tidő alatt fordul el a lengési sík – *a Földhöz rögzített vonatkoztatási rendszerben!* – éppen annyit, hogy az inga visszatérni látszik eredeti orientációjához? Ez éppen a π elfordulási szöghöz tartozó időtartam, amely (7) alapján számolható:

$$\dot{\theta} = \frac{\pi}{T} = \Omega \sin \lambda = \frac{2\pi}{\text{nap}} \sin \lambda, \quad (8)$$

tehát

$$T = \frac{1 \text{ nap}}{2 \sin \lambda}. \quad (9)$$

Ellenőrzés: a (9) képletből a Déli- és Északi-sarkra $T = 12$ óra adódik, az Egyenlítőre pedig $T = \infty$ (nem fordul el a lengési sík), amint azt várjuk is.

Mint már megjegyeztük, a Foucault-féle ingakísérlet eredeti célja a Föld tengelyforgásának demonstrálása volt. Egyszerű aránypár felállításával könnyű kiszámítani, hogy *egy nap alatt* mekkora α szöggel fordul el a lengési sík a Földhöz rögzített vonatkoztatási rendszerben:

$$\frac{2T}{1 \text{ nap}} = \frac{2\pi}{\alpha}, \quad (10)$$

azaz (9) felhasználásával:

$$\alpha = 2\pi \sin \lambda. \quad (11)$$

Ez az eredeti kísérlet helyszínén, Párizsban naponta mintegy 271° -os elfordulást eredményezett.

Több, mint gyanús, hogy a (11) eredmény tökéletesen megegyezik azzal a – Gauss–Bonnet-tételből számolható – szögelfordulással, amely egy gömb adott λ szélességi körén párhuzamosan körbevitt vektorra adódik egy teljes kör megtétele után. Valóban, mint mechanikai megfontolásokból közvetlenül is megmutatható, a Foucault-inga lengési vonala *párhuzamos eltolást* szenved a Föld felületén az adott szélességi kör mentén. Annak természetesen nincs jelentősége, hogy ebben az esetben a vektort képviselő objektumot fizikailag nem mi hordozzuk körbe egy *álló* gömb felületén – mint a kordé esetében tettük, a Földet ugyanis annál a kísérletnél álló gömbnek tekinthettük –, hanem a Föld napi forgása teszi meg nekünk ezt a szívességet.

Mivel a Foucault-ingát *nem* a Gauss–Bonnet-tétel kvantitatív igazolására találták ki, így nem is kérhető számon rajta, hogy erre a célra kevésbé rugalmasan használható, mint a délirányt jelző kordé. Összefoglalhatjuk, melyek a Foucault-inga hátrányai a kordéval szemben (ha a Gauss–Bonnet-tétel demonstrálására akarjuk használni mindkettőt):

- A Foucault-inga csak egy *bizonyos típusú felületen* (nevezetesen a Földön, mint gömbfelületen), és annak is csak *nevezetes vonalain* (a szélességi körök) mentén végzi a párhuzamos eltolást.

- Egy-egy kísérletező kényelmesen csak *egyetlen görbén* végezhet mérést (azon a szélességi körön, amelyen tartózkodik), új kísérletekhez nagy távolságokat kell utaznia.

- A Gauss–Bonnet-tétel demonstrálásához (azaz az inga *zárt görbén* való végigviteléhez) szükséges kísérlet *egy teljes napot* igénybe vesz.

- Meg kell oldani, hogy az inga lengése a kísérlet 24 órája alatt *ne csillapodjon* számottevően.

Van viszont az ingának egy nagyon vonzó tulajdonsága: felépítésének végletes egyszerűsége (hasonlítsuk ezt össze a kordé bonyolult fogaskerék-rendszerével!). A fenti hátrányok közül is kiküszöbölhető néhány, mint azt az alább felsorolt szellemes javaslatok mutatják.

- A Foucault-inga csillapításmentes változata elkészíthető olyan módon, hogy a függőleges fonál végére rögzített vasgolyót egy alkalmasan beállított elektromágnes kényszeríti ingamozgásra [3]. Az ilyen állandó üzemű inga esetében nem szükséges a lengésidőt – és ezzel együtt a méretet – nagyra választani, így kompakt, hordozható Foucault-inga készíthető, amellyel folyamatos üzemmódban, akár hónapokon keresztül végezhető a mérések.

- A Foucault-inga működésének demonstrálására kicsinyített *makett* is készíthető. Itt nem a Föld forgásának a bemutatása a cél, hanem annak igazolása, hogy egy forgó asztalra (ez modellezi a forgó Földet) helyezett inga lengési síkja valóban a Gauss–Bonnet-tétel szerinti mértékben fordul el. E kísérlet egyik lehetséges változata az, amikor az „ingát” nem fonál végéhez rögzített tömegpont, hanem merev rúd alkotja [4]. A gravitáció által előidézett lengőmozgás szerepét a megpendített merev rúd rugalmas rezgése veszi át. Az elrendezés nagy előnye, hogy a forgó asztalra szerelt, felső végén befogott merev rúd tetszőleges mértékben megdönthető a függőlegeshez képest, ilyen módon tetszőleges szélességi kör mentén lezajló lengőmozgás kvantitatíven modellezhető. A merev rúd szabad vége ugyanis (jó közelítéssel, ha a gravitáció által okozott meghajlástól eltekintünk) a rögzített ferde pozícióhoz képest végez rezgőmozgásokat. További előny, hogy az adiabatikus feltétel már sokkal kisebb időskálán is teljesül: a rúd rezgésének frekvenciáját 10 Hz körüli értékre állítva [4] az asztal teljes körbefordulásának idejét akár néhány másodpercnyi rövidegűre is választhatjuk. Így az egy napos normál Foucault-kísérlet néhány másodperc alatt „kicsiben” lejátszható. A megpendített rúd gyors rezgése elmosódott síknak látszik, amelynek lassú elfordulása könny-

nyen megfigyelhető. Történeti érdekesség [2, 4], hogy e kísérleti elrendezés gondolata közvetlenül Foucault-ig nyúlik vissza: mielőtt ugyanis híres gravitációs ingakísérletét elvégezte, először egy egyik végén esztergapadba befogott merev rúd rezgésének vizsgálatával győződött meg arról, hogyan fordul el a rezgési/lengési sík egy forgó rendszerhez képest!

Parallelométer

A délirányt jelző kordén és a Foucault-ingán kívül más mechanikai eszközök is léteznek, amelyek párhuzamos eltolást valósítanak meg. Az egyik legegyszerűbb a nevében is erre a funkcióra utaló a parallelométer [5], amely nem más, mint egy talapzatra szerelt *súrlódásmentes* lendkerék (2. ábra).

Egy adott görbült felület vizsgálatakor gondoskodnunk kell róla, hogy a lendkerék mindenhol csak a felület érintősíkjában foroghasson el. Ezt a kényszerfeltételt úgy lehet egyszerűen kielégíteni, hogy a parallelométer talapzatát az adott felületen *csúsztatva* mozgadjuk (tehát nem emeljük el a felülettől), ügyelve arra, hogy a talpazathoz merőlegesen erősített forgástengely, amelyen a lendkerék elforoghat, mindvégig merőlegesen maradjon a felületre.⁴ A lendkereket *nem* hozzuk forgásba. Mivel a kiegyensúlyozott lendkerékre az eszköz eltolása közben nem hat forgatónyomaték, küllői párhuzamos eltolást szenvednek az adott felület adott görbéje mentén.

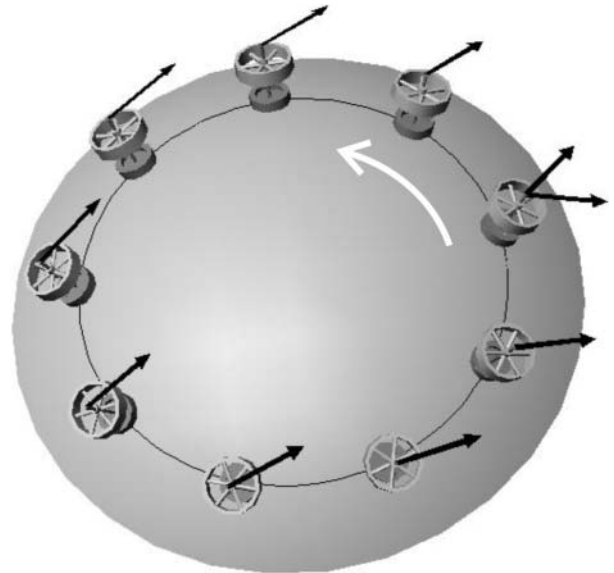
Összefoglaló megjegyzések és egyéb fizikai analógiák

Magasabb dimenziók

A Gauss-görcbület fogalma nagyszerűen bevált *felületek* görbültségének leírására. Szépsége, hogy a felület adott pontjában egyetlen számadattal képes kvantitatíven jellemezni a görbültség mértékét és jellegét (negatív, illetve pozitív). Hiányossága, hogy *definiálásához* külső nézőpont szükséges – elvégre a felületben élő laposlények világából nézve nem léteznek, csupán matematikai absztrakciók azok a merőleges síkok, amelyek a cikkünk előző részében felírt (6) egyenletben szereplő R_{\min} és R_{\max} értelmezéséhez szükségesek. Ezt a hiányosságot ellensúlyozza Gauss nevezetes tétele, a *Theorema Egregium*, amely kimondja, hogy a (6)-tal definiált K Gauss-görcbület *kiszámítása* kizárólag belső mérések segítségével is elvégezhető. Más szóval, létezik K -ra egy olyan képlet, amelyben *nem* az R_{\min} és R_{\max} „elvont” fogalmai szerepelnek, hanem csupa olyan mennyiség, amelyek szemléletes jelentéssel, mérhető fizikai tartalommal bírnak a laposlények számára.⁵

⁴ Ez analóg azzal a kényszerfeltétellel, hogy a Foucault-inga egyensúlyi helyzete mindenhol merőleges a Föld felületére.

⁵ A számítás meglehetősen bonyolult receptjét, azaz magát a Theorema Egregiumot itt nem részletezzük.



2. ábra

Kettőnél nagyobb dimenziószámú sokaság (például háromdimenziós terünk) esetén azonban alapvetőbb nehézségekbe ütközünk. Mint kiderül, a görbület adott pontbeli jellemzésére ekkor már nem alkalmas egyetlen szám. Természetesen továbbra is kényelmetlen már a kiindulás is: ha a (6) definíció Gauss-féle filozófiáját akarnánk akár háromdimenziós terünkre általánosítani, *négydimenziós* nézőpontot kellene felvennünk, amire – „háromdimenziós laposlényekként” – alkatilag képtelenek vagyunk.

A megoldás kulcsát a zseniális matematikus, Riemann találta meg. Legfontosabb gondolata: a görbületet olyan mennyiséggel kell jellemezni, amelyet – ellentétben a (6) képlet „filozófiájával” – már eleve belső nézőpontból lehet *definiálni*. Felismerte, hogy egy adott sokaság görbülete valóban jellemezhető egy olyan (pontról pontra más-más értékeket felvehető) többkomponensű mennyiséggel, egy *tenzorral*, amelynek már a definíciós képletében csakis a sokaság mérhető *belső* adatai szerepelnek, nem kell közben magasabb dimenziójú nézőpontra váltanunk.⁶

Szemléletünk a magasabb dimenziójú sokaságok esetén így is óhatatlanul nehézségekbe ütközik. A *párhuzamos eltolás* fogalma például már háromdimenziós görbült tér esetén sem olyan szemléletes, mint görbült felületen volt.⁷

Görcbült térídő

Elméletével Riemann nem csak a matematika új ágát indította el, hanem a fizika egyik nagy forradalmát is

⁶ A Riemann-féle elmélet felülről kompatibilis Gauss törekvéseivel: a görbületet leíró Riemann-tenzor ugyanis 2D felületek esetén egykomponensű mennyiséggé, skalárrá redukálódik, amelynek számértéke – konstans faktortól eltekintve – megegyezik a K Gauss-görcbülettel.

⁷ Itt csak annyit jegyzünk meg, hogy a párhuzamos eltolás definíciója magasabb dimenziójú esetekben legegyszerűbben egy algebrai egyenletrendszerrel adható meg, amelyben az úgynevezett Christoffel-szimbólumok szerepelnek.

elősegítette: kiderült ugyanis, hogy a Riemann-geometria ideális matematikai keretet nyújt a *gravitáció elméletének* formába öntéséhez. *Einstein* általános relativitáselméletének lényege, hogy a négydimenziós *téridő* egy olyan *görbült* sokaság, amelynek (1) görbületét a tömegek (pontosabban az adott téridőtartományban levő energia és impulzus) okozzák, és amelyben (2) a szabad tömegpontok a görbült sokaság „egyenesei” (geodetikusi) mentén mozognak.

A fenti (1) pontot átfogalmazva: a *téridő* görbületét minden „*téridő* pontban” (azaz eseménynél) egy olyan Riemann-tenzor írja le, amelyet az adott *téridő* pontbeli energia és az impulzus határoz meg.⁸ A (2) pontnál egy kicsit hosszabban időzzünk. A kérdés ugyanis az: mit nevezünk egy négydimenziós görbült *téridő*-ben geodetikusként?

Itt emlékeztetünk arra, hogy euklideszi síkon az egyenes definiálása kétféleképpen történhet:

- Az egyenes olyan vonal, amelynek érintővektora a vonal mentén *párhuzamos eltolást* szenved.
- Az egyenes olyan vonal, amely az adott két pontot összekötő vonalak között a *legrövidebb*.

Mindkét definíció egyszerűen átmenthető magasabb dimenziós számú, görbült *terek* esetére is. A görbült *téridőre* való általánosítás azonban nem triviális. Ráébredni, hogy a tér és az idő nem rendelkezik önálló, abszolút létezővel, csupán egy egybefüggő rendszer különböző „irányú” vetületei, már önmagában forradalmi gondolat (amely *Hermann Minkowski* nevéhez fűződik, és eleinte maga *Einstein* is idegenkedett tőle); nem lepődhetnénk meg tehát, ha ez a fajta sokaság kicsit másképp viselkedne, mint egy olyan, ahol például az összes „irány” térszerű.

Kiderül, hogy – a fenti kétféle definíció analógiájaként – a görbült *téridő* geodetikusainak a definiálása is kétféleképpen történhet:

- A geodetikus olyan világvonala, amelynek a kiinduló „pontban” (a kiinduló eseménykor) meghúzva érintővektorát, és a világvonala mentén *párhuzamosan eltoljuk*, az végig a világvonala érintője marad⁹ [6].
- (Tömegpontokra) a geodetikus olyan világvonala, amelyhez az adott két eseményt összekötő világvonala között a *leghosszabb sajátidő* tartozik. Más megfogalmazásban: ha adott pontból, adott időben több ikertestvért is útnak indítunk, azután egy későbbi időpontban ismét összehozzuk őket, akkor a randevű pillanatáig az az ikertestvér öregszik a *legtöbbet*, aki a két esemény között geodetikusan (azaz erőmentes állapotban, „szabadon esve”) mozgott. Ez az úgynevezett „maximális öregedés elve” [7].

Rövid kitérő: a relativitáselmélet egyik legnépszerűbb pedagógiai példázata az iker-paradoxon. Egyszerű megfogalmazásban: az űrállomáson maradt ikertestvér többet öregszik, mint az, aki oda-vissza

utat tesz egy távoli bolygó és az űrállomás között. A fentiekből viszont következik, hogy az „oda-vissza” szóval óvatosan kell bánni. Az eredeti változatban az „egy helyben maradt” ikertestvér végig egy *szabadon lebegő* (és elhanyagolható tömegű!) űrállomáson tartózkodik, azaz sík *téridőben*, erőmentes, szabad mozgást végezve. A maximális öregedés elve egyértelmű: *ő mozog geodetikusan* (szabadon, erőmentesen), tehát *ő* öregszik többet, mint utazó testvére (akit rakétája hajtóműve fékezési és gyorsulási manőverekre *kényszerít*). Ha azonban egy olyan változatot tekintünk, amelyben az „egy helyben maradt” ikertestvér például végig a *Föld felszínén* tartózkodik, míg testvére „oda-vissza” utat tesz meg egy felfelé elhajított, majd a Föld felszínére visszaeső űrkabinban, akkor itt *az utazó testvér mozog geodetikusan* (szabadesésben, erőmentesen), tehát *ő* öregszik többet, mint a Földön maradt testvére (akit a talaj nyomóereje *kényszerít* a Föld felszínén maradni).

Pörgettyű és geodetikus precesszió

Mi a legtökéletesebb, legmegbízhatóbb iránytű, amely minden körülmények között a földrajzi (nem a mágneses!) északi irányba mutat? A newtoni mechanika szerint, ha egy *pörgettyűre* a gravitációs tér forgatónyomatékokot fejt ki, a pörgettyű forgástengelye lassan elfordul (precesszál). Ha alkalmas felfüggesztéssel kiküszöböljük ezt a forgatónyomatékokot, akkor a pörgettyű megőrzi forgástengelyének irányát a térben. Egy ilyen eszközt (amelyet gyro compass-nak, pörgettyűs iránytűnek neveznek) például a Sarkcsillag irányába állítva olyan iránytűhöz jutunk, amely északi irányát mindvégig megtartja. Hogyan egyeztethető ez össze a Foucault-inga síkjának elfordulásával? A kulcs az, hogy a pörgettyű azért alkalmas iránytűnek, mert „háromdimenziós objektum” [8]: miután megpörgettük, orientációjának beállítására a térben nem szabadunk ki *kényszerfeltételt*. Az eredetileg északi irányúra beállított Foucault-inga azért nem lenne alkalmas iránytűnek (hiszen pontosan erről is szól a Foucault-kísérlet!), mert lengésére *kényszerfeltételt* szabunk: a lengő tömegpontnak a Föld érintősíkjában kell maradnia. Ugyanez igaz a délirányt jelző kordéra is: az irányt mutató nyíl nem fordulhat ki a Föld érintősíkjából. Félrevezető is a „délirányt jelző” elnevezés erre az egyébként zseniális találmányra: ha dél felé beállított nyíllal túl nagy területen tologatják, nem sokáig fogja tartani a helyes délirányt, a Földfelület görbültsége és a párhuzamos eltolás sajátosságai miatt (lásd korábban).¹⁰ Ebből a szempontból a Foucault-inga és a kordé is lényegileg „kétdimenziós objektumoknak” tekinthetők, amelyek a kétdimenziós Föld *felület* görbültségének feltérképezésére alkalmasak.

⁸ Hogy hogyan, arról az elmélet alapegyenlete, az (itt nem részletezett) *Einstein*-egyenlet ad számot.

⁹ Ez esetben tehát nem *eredményként* kapjuk meg, hogy geodetikus mentén eltolva egy vektor megtartja az irányát, hanem fordítva, a geodetikust így *definiáljuk*.

¹⁰ Egy példa a nagyságrend érzékeltetésére: a Földet sima gömbnek tekintve, a kordét a mai Kína határán körbetolva a kiindulási pontba, a nyíl teljes elfordulása a Gauss–Bonnet-tétel szerint $\delta = (\text{Kína területe})/(\text{a Föld sugara})^2 \approx 13^\circ$.

Vajon a kényszermentes pörgettyű, ez a „háromdimenziós objektum” nem alkalmas-e hasonló módon arra, hogy *háromdimenziós terünk* – illetve a *négydimenziós téridő* – görbülségére fényt derítsen? De igen: a „gyro compass”-t ugyanis csak a *newtoni* mechanika jósolja tökéletes iránytűnek; az általános relativitáselmélet szerint még egy szabadon lebegő, forgatónyomaték-mentes pörgettyű *sem* őrzi meg forgástengelyének irányát az állócsillagokhoz képest. Forgástengelye elfordulásának mértéke a pörgettyű által bejárt téridőtartomány görbülségére ad információt. A több évtizedes előkészület után néhány éve megvalósult GP-B (Gravity Probe – B) kísérlet speciálisan azt az esetet vizsgálta, milyen mértékben fordul el egy Föld körüli körpályára állított – erőmentesen, azaz geodetikusan mozgó – pörgettyű forgástengelyének iránya, a téridőnek a Föld által okozott görbülsége miatt. A jelenség neve *geodetikus precesszió*, hiszen a pörgettyű tömegközéppontja mindvégig geodetikusan mozog. Az elfordulás mértéke nagyon kicsi, a GP-B kísérletben választott 642 km-es keringési magasság esetén egy *év* alatt ~6,6 szögmásodperc¹¹ [9].

Érdekes kicsit tovább elidőzni a geodetikus precessziónál. A pörgettyű tömegközéppontja zárt görbét fut be a térben, egy teljes körbefordulás után mégsem ugyanabba az irányba mutat (az állócsillagokhoz képest). Vajon nem mond-e ez ellent a geodetikus tulajdonságairól korábban mondottaknak? Hiszen a pörgettyű tömegközéppontjának világvonal a *geodetikus* vonal a téridőben; márpedig egy geodetikusan párhuzamosan végigvitt vektor mindvégig megőrzi irányát a geodetikushoz képest. Sőt, tovább sarkíthatjuk a problémát: cikkünk előző részének *4. ábrája* azt mutatja, hogy ha *zárt* geodetikus görbén párhuzamos eltolással *visszaviszünk* egy vektort a kiindulási pontba, akkor *pontosan fedésbe kerül* a kiindulási vektorral. Miért nem ez történik (látszólag) a pörgettyű forgástengelyével? A választ a következő két megfontolás adja meg:

- A pörgettyű pályája ugyan zárt görbe a térben, de világvonala *nem zárt görbe a téridőben*. Nem várhatjuk automatikusan, hogy a (térbeli) kiindulási helyére visszatért pörgettyű forgástengelye a kiindulási helyzettel fedésbe kerüljön, hiszen a pörgettyű a téridőben *nem* tért vissza a kiindulási ponthoz, a visszatérési esemény és a kiindulási esemény nem „fedi egymást” a téridőben.
- A forgástengely a pörgettyű *geodetikus világvonala*hoz képest valóban megőrzi orientációját a téridőben. A pörgettyűt szállító, erőmentesen mozgó űrhajó utasa nem tapasztalna semmi rendelleneset: a forgástengely az erőmentesen lebegő űrhajó – mint térben lokalizált inerciarendszer – falának mindig ugyanarra a pontjára mutatna. Az űrhajó azonban *nem* erőmentesen mozog; szimmetriatengelyét egy alkalmas elektronika folytonosan abba az irányba

kényszeríti, amelyben az űrhajóra rögzített távcső a referenciaként szolgáló távoli állócsillagot mutatja. Ez az a referenciairány, amelyhez képest a forgástengely nem őrzi meg orientációját. A dolog kulcsa tehát, hogy maga a referenciairány – azaz az űrhajó szimmetriatengelye – *nem párhuzamosan* tolódik el a geodetikus világvonal mentén.

Egyéb példák

A természetben még sok olyan jelenség van, amelyek értelmezésére a vektorok párhuzamos eltolásáról leírtak nagyszerű keretet szolgáltatnak. Ezek közül itt csak néhányat említünk meg, részletesebb levezetések nélkül.

Nem csak görbült téridőben, hanem még sík téridőben is elfordul egy pörgettyű forgástengelye, feltéve hogy *görbevonali pályán* visszük vissza a kiindulási helyre. Ez a newtoni mechanikában nem magyarázható jelenség – amelynek neve Thomas-precesszió, és alapvetően az idődilatációval hozható kapcsolatba – nem tévesztendő össze a fent tárgyalt geodetikus precesszióval, hiszen itt (1) sík téridőben mozog a pörgettyű tömegközéppontja, és (2) nem geodetikus (erőmentes) világvonalon, hanem gyorsulva. A Thomas-precesszió egyik nevezetes megnyilvánulása az atommag körül keringő elektron spintengelyének lassú elfordulása, amelynek mértéke a speciális relativitáselmélet matematikai apparátusával könnyen kiszámolható¹² [10]. Részletezés nélkül megemlítjük, hogy a Thomas-precesszió a Foucault-ingához teljesen hasonló módon tárgyalható, csak a pörgettyűt leíró perdületvektor gömbfelület helyett forgási hiperboloid felületén mozog, a négyessebesség-térben [11].

Végül még egy példa, ezúttal az optika területéről. Tegyük fel, hogy egy üvegszálba lineárisan polarizált fényt csatolunk, és a szálát valamilyen módon elcsavarjuk, feltekerjük a térben, ügyelve arra, hogy a szálból kilépő fény a belépő fénnel párhuzamos irányban haladjon tovább. Ekkor a kilépő fény polarizációs iránya nem lesz ugyanaz, mint a bemenő felületen becsatolt fény polarizációja [12]. A szögelfordulás mértéke a következő megfontolásokból számolható: nincs semmilyen külső hatás, amely az üvegszálban haladó fénysugár polarizációs irányát megváltoztatná. A fény azonban transzverzális hullám, így a polarizációvektornak ki kell elégítenie azt a kényszerfeltételt, hogy iránya minden pontban merőleges a sebességvektorra. A fénysugár sebességvektora mindvégig az üvegszál tengelye irányába mutat, nagysága pedig állandó. Összefoglalva: ahogy a szál csavarodik, a sebességtérben a sebességvektor végpontja egy gömbfelületen mozog, és a kezdő- és végállapot párhuzamosága miatt zárt görbét ír le. Eközben a polarizációvektor mindvégig érintője ennek a gömbfelületnek, és párhuzamosan tolódik el ugyanezen zárt görbe men-

¹¹ A számadatból tehát látható, hogy a „gyro compass” minden *gyakorlati* célra nyugodtan tekinthető tökéletes iránytűnek.

¹² A Thomas-precesszió a Foucault-inga elfordulásához is ad járulékot, ez azonban kimutathatatlanul kicsi, egy nap alatt mintegy 10^{-6} szögmásodperc.

tén. Ha tehát pontosan ismerjük a szál csavarodását, a sebességvektor pályája nyomon követhető a sebességtérben, a polarizáció teljes szögelfordulása pedig a Gauss–Bonnet-tételből közvetlenül kiadódik.

Irodalom

1. Budó Á: *Mechanika*. Tankönyvkiadó, Budapest, 1965.
2. L. Foucault: Démonstration physique du mouvement de rotation de la Terre au moyen du pendule. *Compt. Rend.* 32 (1851) 135.
3. H. Kruglak, L. Oppliger, R. Pitet, S. Steele: A short Foucault pendulum for a hallway exhibit. *Am. J. Phys.* 46/4 (1978) 438.
4. F. W. Sears: Working model of a Foucault pendulum at intermediate latitudes. *Am. J. Phys.* 37/11 (1969) 1126.

5. A. G. Rojo, D. Garfinkle: The parallelometer: a mechanical device to study curvature. *Can. J. Phys.* 87 (2009) 615.
6. <http://www.hrasko.com/peter/full3.pdf>
7. E. F. Taylor, J. A. Wheeler: *Exploring Black Holes*. Addison Wesley Longman, Inc., 2000.
8. D. E. Liebscher: *Einstein's relativity and the geometries of the plane*. Wiley-VCH, 1999.
9. <http://einstein.stanford.edu/>
10. E. F. Taylor, J. A. Wheeler: *Téridőfizika*. Typotex, Budapest, 2006.
11. C. Criado, N. Alamo: Thomas rotation and Foucault pendulum under a simple unifying geometrical point of view. *Int. J. Non-Lin. Mech.* 44 (2009) 923.
12. A. Tomita, R. Chiao: Observation of Berry's topological phase by use of an optical fiber. *Phys. Rev. Lett.* 57 (1986) 937.

AZ ELSŐ SOLVAY-KONFERENCIA CENTENÁRIUMÁN – II.

Radnai Gyula

ELTE Anyagfizikai tanszék

Simonyi Károly A fizika kultúrtörténete című könyvében sok érdekes dokumentumot, fényképet közöl. Az egyik legérdekesebb ezek közül az, amelyik az első Solvay-konferencia résztvevőiről készült (1. kép). A fotót egy brüsszeli fényképész, bizonyos *Benjamin Couprie* készítette egy szerencsés pillanatban. *Eduardo Amaldi* (1908–1989) olasz fizikus, az 1970-es és 1973-as Solvay-konferencia elnöke szerint ez talán minden idők leghíresebb fényképe, amit fizikusokról készítettek. A helyet és az időpontot is jól ismerjük: Brüsszel, Hotel Metropole, 1911. október 30. – november 3. Itt és ekkor tartották az első Solvay-konferenciát.

Németországi résztvevők

Berlinből *Nernst* és *Planck* voltak *Solvay* tanácsadói, ők tekinthetők a konferencia tartalmi szervezőinek. Érthető, ha magukkal hozták közeli munkatársaikat is.

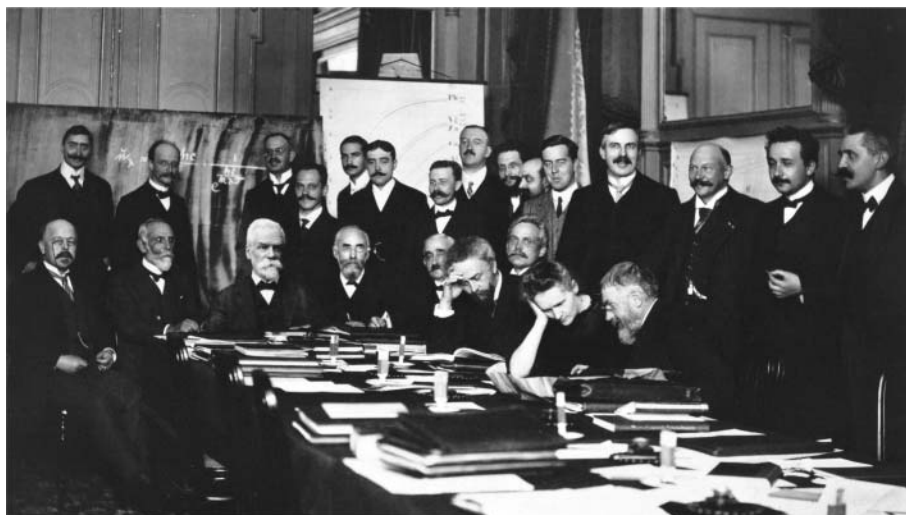
Nernst elhozta doktoranduszát, a 25 éves angol *Frederick Lindemann*t (2. kép), akit titkárként sikerült becsempésznie a konferenciára. Lindemann élt is a lehetőséggel: minden előadást végighallgatót, aktívan részt vett még a diskussziókban is, egyáltalán nem volt megilletődve. Érdeemes megemlítenünk, hogy bátor magatartásával tűnt ki később, a háborúk alatt is. Az első világháborúban kidolgozta a dugóhúzó-repülés elméletét

és technikáját, elméletének igazolására műrepülő bemutatókat tartott. A második világháború során Oxfordban a Clarendon hidegfizikai laboratóriumot vezette, s itt adott állást az Angliába menekült, üldözött európai tudósoknak, akik között ott volt *Francis Simon* (1893–1956), *Kurt Mendelssohn* (1906–1980) és a magyar *Kürti Miklós* (1908–1998) is. A nemdohányzó, absztinens és vegetáriánus agglegény kiválóan teniszezett és zongorázott, *Winston Churchill* pedig fő tudományos tanácsadónak választotta maga mellé a háborúban.



2. kép. Frederick Lindemann (1886–1957)

1. kép. Az első Solvay-konferencia résztvevői. Ülnek (balról jobbra): Nernst, Brillouin, Solvay, Lorentz, Warburg, Perrin, Wien, Mme Curie, Poincaré. Állnak (balról jobbra): Goldschmidt, Planck, Rubens, Sommerfeld, Lindemann, de Broglie, Knudsen, Hasenöhrl, Hostelet, Herzen, Jeans, Rutherford, Kamerlingh Onnes, Einstein, Langevin.



Planck két olyan kísérleti fizikust hozott Berlinből, akik meggyőzően tudtak érvelni az ő feketetest-sugárzás elmélete mellett.

Heinrich Rubens (1865–1922) 1900 és 1906 között Charlottenburgban, a berlini műszaki egyetemen volt fizikaprofesszor. Legfőképpen az ő mérései inspirálták Planckot a kvantumhipotézis bevezetésére. Rubens 1906-ban nyerte el a kísérleti fizika tanszéket a tudományegyetemen, s haláláig ő volt a Fizikai Intézet vezetője (3. kép). 1911-ben nála doktorált *Gustav Hertz* (1887–1975), a következő évben pedig Planckkal közös doktorandusza volt *Walter Schottky* (1886–1976).

Emil Warburg (1846–1931) Strassburg és Freiburg után 1906-tól Heinrich Rubens utóda lett Charlottenburgban. A hőszugárzáson kívül a gázok kinetikus elméletével, gázkiszülésekkel, elektromos vezetéssel, ferromágnességgel, fotokémiával foglalkozott (4. kép). Tanítványai közé sorolható *James Franck* (1882–1964) és *Robert Pohl* (1884–1976) is. (Lám a Franck–Hertz-kísérletben Warburg és Rubens tanári munkája is benne van.) Emil Warburg fia volt *Otto Warburg* (1883–1970), a később Nobel-díjjal kitüntetett biokémikus.

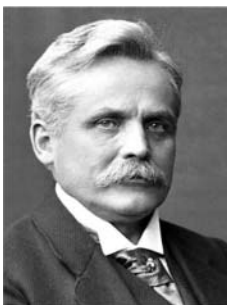
Würzburgból *Wilhelm Wien* (1864–1928) vett részt a konferencián (5. kép). Ő igazán sokat foglalkozott a feketetest-sugárzással. Mind elméleti, mind kísérleti szempontból lényeges eredményekre jutott. Fiatal korában *Hermann Helmholtz* (1821–1894) tanítványa és pártfogoltja volt, nála doktorált 1886-ban. 1900-ban örökölte meg Würzburgban *Conrad Röntgen* tanszékét. (Röntgen ugyanis Münchenbe ment át, majd amikor 1920-ban visszavonult, Münchenben is Wien került a helyére.) Wien még az 1890-es években empirikus és a Doppler-elvvel kombinált termodinamikai megfontolásokkal eljutott a „Wien-féle eltolódási törvényhez”, majd egy energiaeloszlási törvényt is felállított, amely szerint a sugárzás intenzitásának a frekvencia növekedésével exponenciálisan csökkennie kellett. A Rayleigh–Jeans-törvény a feketetest-sugárzás intenzitáseloszlásának egyik (nagy hullámhosszú) ágát, a Wien-törvény a másik (nagy frekvenciájú) ágát tudta jól közelíteni. E két törvény állt Planck rendelkezésére, amikor saját formuláját leve-



3. kép. Heinrich Rubens (1865–1922)



4. kép. Emil Warburg (1846–1931)



5. kép. Wilhelm Wien (1864–1928)

zette. A Solvay-konferencián Wien nem tartott külön előadást, de ekkor már Planck elméletét támogatta.

Münchenből a matematikailag kiválóan képzett elméleti fizikus, *Arnold Sommerfeld* (1868–1951) vett részt a konferencián. (Göttingenben néhány évig *Felix Klein* (1849–1925) asszisztense volt.) Münchenbe Röntgen támogatásával került 1906-ban, majd itt maradt 32 éven át. Magas színvonalú elméleti fizikai iskolát hozott létre, több mint harminc kiváló tanítványa közül hatan lettek később Nobel-díjasok. Ő nem, bár állítólag őt jelölték legtöbbször hiába erre a díjra. Matematikai tehetsége és tudása indokolta meghívását a konferenciára annak ellenére, hogy akkor még egyik megvitatandó területen se voltak igazán elismert eredményei (6. kép).



6. kép. Arnold Sommerfeld (1868–1951)

Résztevők Párizsból

Franciaországból egyedül Párizsból jöttek tudósok a konferenciára. Ez többé-kevésbé érthető: itt voltak az ország elit egyetemei, intézetei. Ilyen volt például a Collège de France, amelyet többek között a matematikai kutatások és általában az elméleti oktatás színvonalának emelése érdekében alapított 1530-ban az akkori francia király, és amely mind a mai napig a francia felsőoktatás egyik nevezetessége. „Tudósképző” intézmény, legtöbbször valamelyik egyetem elvégzése után jelentkeznek az itteni fizikai vagy kémiai laboratóriumokba a kutatni vágyó tudósjelöltek.

1900-tól volt itt az elméleti fizika professzora *Marcel Brillouin* (1854–1948). Foglalkozott a gázok kinetikus elméletével, áramlási jelenségekkel s még ezernyi más, elméletigényes fizikai témával (7. kép). Ügyes kísérletező is volt: megépítette az Eötvös-inga egy új változatát, amellyel az 1906-ban megnyitott Simplon-alagútban végzett méréseket, s amelyet az Eötvös-ingához hasonlóan olajlelőhelyek felkutatására használtak később. (Eötvös Loránd szándékosan nem szabadalmaztatta az ingát.) A gravitáció Solvay-t is nagyon érdekelt, fontos volt, hogy Marcel Brillouin részt vegyen a konferencián. Marcel Brillouin fia volt *Léon Brillouin* (1889–1969), az a fizikus, akiről a Brillouin-zónákat elnevezték a szilárdtestfizikában.

1904-ben lett a Collège de France fizika professzora *Paul Langevin* (1872–1946). Előtte, miután elvégezte az École Normale Supérieure nem éppen könnyű kurzusait, Cambridge-ben folytatott fizikai kutatásokat



7. kép. Marcel Brillouin (1854–1948)

J. J. Thomson irányításával. Itt ismerkedett meg a vele együtt ott „gyakornokoskodó” Rutherforddal, akivel jó barátok lettek. Visszatérvén Párizsba, Pierre Curie vezetésével készítette el doktori disszertációját mágnességtanból. Ennek 1902-ben történt sikeres megvédése után lett a Collège de France professzora. A mágnesség maradt fő kutatási területe, Brüsszelben is erről tartott előadást (8. kép).



8. kép. Paul Langevin (1872–1946)

Langevin vezetésével készült doktorátusára Maurice de Broglie (1875–1960) igencsak előkelő származású kísérleti fizikus, az elméleti fizikus Louis de Broglie (1892–1987) bátyja. 1908-ban doktorált, utána a család párizsi palotájában jól felszerelt laboratóriumot hozott létre, ahol röntgen szerkezetkutatással foglalkozott, kikísérletezte többek között a forgókristályos módszert. Langevin szervezte be a Solvay-konferenciára – akárcsak Nernst Lindemann –, mint a konferencia egyik titkárát. Később Langevin és de Broglie együtt állították össze a konferencia kiadványát (9. kép).



9. kép. Maurice de Broglie (1875–1960)

Jean Baptiste Perrin (1870–1942) azzal hívta fel magára a konferencia rendezőinek figyelmét, hogy rendkívül körültekintő és alapos mérésekkel igazolta Einstein Brown-mozgásra 1905-ben felállított elméletét. Ezek a mérések győzték meg Wilhelm Ostwald (1853–1932) német vegyészt, az energetika pápáját, hogy az anyag mégiscsak atomokból, molekulákból áll. Perrin mikroszkópi mérései igazolták kolloid oldatokban a „barometrikus magasságformulát”, amely a változó hőmérsékletű légkörben sohasem teljesülhet igazán. A Sorbonne fizikai kémiai tanszékén éppen 1910-ben kapta meg professzori ki nevezését (10. kép).



10. kép. Jean Baptiste Perrin (1870–1942)

Langevin és Perrin társaságába tartozott Marie Skłodowska Curie is. Miután Pierre Curie halála után átvette férje helyét a laboratórium élén, 1908-ban a Sorbonne professzorává nevezték ki. Közben magániskolát létesített Irène lánya és még néhány kolléga hasonló korú gyermeke számára, ahol ő tanította a fizikát, Langevin a matematikát, Perrin a kémiát. Meghívása a Nobel-díjas tudósoknak szólt. Eljött, részt vett a diszkussziókban, de nem tartott külön előadást.

Henri Poincaré (1854–1912) sem tartott külön előadást, de „naiv” matematikus kérdései, megjegyzései nagyban hozzájárultak a hatáskvantum fogalmának

tisztázásához. Pedig Nernst első javaslatában még nem is szerepelt Poincaré meghívása, csak pótlólag került rá sor. Igaz, hogy a relativitáselmélet szempontjából meghatározó eredményei voltak, de nem volt téma a relativitáselmélet a Solvay-konferencián. Érdemes megemlíteni a vele kapcsolatos magyar vonatkozásokat is: 1902-ben lett a kolozsvári egyetem tiszteletbeli doktora, és 1905-ben elsőnek kapta meg a Magyar Tudományos Akadémia Bolyai-díját. Mint ilyen, a következő, 1910. évi Bolyai-díjat odaítélő bizottság tagjaként Budapestre is ellátogatott (11. kép).



11. kép. Henri Poincaré (1854–1912)

Bécs, Prága, Budapest?

Friedrich Hasenöhr (1874–1915) a bécsi egyetemet képviselte (12. kép). Azok közé az elméleti fizikusok közé tartozott, akiket az elektromágneses sugárzashoz rendelhető tömeg problematikája foglalkoztatott. Ludwig Boltzmann (1844–1906) tanítványa volt, s az egyetem elvégzése után Leidenben járt egyéves ösztöndíjas tanulmányúton Hendrik Lorentznél és Heike Kamerlingh Onnesnél. Boltzmann tragikus halálát követően 1907-ben vette át Bécsben a fizikatanszéket. Számos kiváló tanítványt nevelt, közülük a leghíresebb Erwin Schrödinger (1887–1961) lett.



12. kép. Friedrich Hasenöhr (1874–1915)

Prágát, pontosabban az ottani Karl-Ferdinand (német) Egyetem fizika tanszékét Albert Einstein (1879–1955) képviselte (13. kép). A 19. század utolsó harmadában Ernst Mach (1838–1916) tette híressé ezt a tanszéket, ő azonban a 20. században már nem volt irányadó a fizikában. Annál inkább azzá vált Einstein! Svájci állampolgárként, szabadalmi hivatali tisztviselőként publikálta 1905-ben négy meghatározó jelentőségű tanulmányát a legnagyobb német fizikai folyóiratban, az *Annalen der Physik*-ben. A fényelektromos hatás kvantumelmélete, a Brown-mozgás statisztikus elmélete, a speciális relativitáselmélet és a tömeg-energia ekvivalencia elve tették „csodálatos évvé” 1905-öt, amelynek centenáriumát *A fizika éve*ként ünnepelte meg a világ 2005-ben. Az új gondolatok elismertetése persze nem ment gyorsan. Einstein csak 1908-ban jutott egyetemi



13. kép. Albert Einstein (1879–1955)

álláshoz Bernben, majd 1909-ben Zürichben, míg végül sikerrel pályázott a prágai professzori állásra, amelyet 1911 áprilisától tölthetett be. Akárhogy is, a titkárként résztvevő Lindemann után ő volt Brüsszelben a legfiatalabb fizikus.

És Budapest? Sajnos magyar tudóst nem hívtak meg az első Solvay-konferenciára. A későbbi fizikai Solvay-konferenciákon is összesen hat magyar, illetve magyar származású tudós vett részt: 1924-ben *Hevesy György* (1885–1966), 1948-ban *Marton László* (1901–1979) és *Teller Ede* (1908–2003), 1951-ben *Orován Egon* (1902–1989), 1961-ben és 1970-ben *Wigner Jenő* (1902–1995), 1998-ban pedig *Szépfalusy Péter* (1931–) (14. kép). Ezt az 1998-as konferenciát a komplex dinamikai rendszerekről és az irreverzibilitásról nem is Brüsszelben, hanem Japánban rendezték meg, így még értékeesebb, hogy magyar kutatót is meghívtak rá.

Ötvös Loránd (1848–1919), az akkor legismertebb magyar fizikus nem foglalkozott az első Solvay-konferenciára kitűzött témával. Akik még szóba jöhettek volna: a Maxwell-elmélettel vívódó *Fröblich Izidor* (1853–1931), az Einsteinnel egyidős és hasonlóan tehetséges *Zemplén Győző* (1879–1916), az eltolódási törvényt jóval Wien előtt megállapító *Kövesligethy Radó* (1862–1934), a Planck-formulát a csillagok hőmérsékletének becslésére használó *Harkányi Béla* (1869–1932), vagy Kolozsvárról *Farkas Gyula* (1847–1930), akinek a neve már ismert volt Európában. Csak éppen nem voltak „a tűz közelében”.

Gondoljunk meg: Göttingenből, Heidelbergből, Königsbergből, egy sor német egyetemi városból, Párizson kívül egyetlen francia városból vagy éppen egész Olaszországból, Spanyolországból, illetve Svédországból se hívtak meg senkit. A kimaradtak voltak többen, persze. Viszont a résztvevők között lezajló eszmecserek így is termékenyítően hatottak a fizika további fejlődésére. Elég megemlíteni, hogy ez volt az első és utolsó olyan konferencia, ahol Einstein és Poincaré találkozhattak egymással.

A konferencia programja

Sem a konferenciáról egy évvel később megjelent francia kiadvány [2], sem ennek 1914-ben megjelent német fordítása [3] nem közli a pontos napirendet, de az összesen 12 előadás valószínűleg az elhangzás sorrendjében került be ezekbe a kiadványokba.

Solvay nyitotta meg a konferenciát. Nem elégedett meg a formális megnyitással, filozófiai eszmefuttatás során fejtette ki nézeteit a tudomány helyzetéről. Utána Lorentz, majd Nernst mondott bevezetőt és kezdődhettek a szakmai előadások.

Az első napon került sorra két olyan előadás, amely a klasszikus fizika keretében igyekezett tárgyalni az új jelenségeket. Központi szerephez jutott az energia ekvipartíciójának tétele. Lorentz előadásának címe *Az energia egyenletes eloszlása tételének alkalmazása a sugárzásra*, Jeans előadásának címe pedig *A fájhbő tárgyalása Maxwell és Boltzmann kinetikus elmélete*



14. kép. Részlet az 1998-as Solvay-konferencián készült csoportképből. Ülnek: Ilya Prigogine (Brüsszel), Jean Solvay (Brüsszel), Linda Reichl (University of Texas, Austin). Állnak: O'Dae Kwon (Pohang), Szépfalusy Péter (Budapest), M. Namiki (Tokió), Luis J. Boya (Zaragoza).

szerint volt. A két előadás között olvasták fel *Lord Rayleigh* levelét, amelyet Nernstnek írt a konferenciára történő meghívása kapcsán. Ebben újra hangsúlyozta azokat a nehézségeket, amelyeket nem sikerült leküzdeni 1900-ban, amikor a sugárzási törvényt felállították. Ezt írta: „Lehet a mi sikertelenségünket Planck és iskolája javára írni, amely szerint a dinamika törvényei (a szokásos formában) nem alkalmazhatók a testek végső alkotórészeinek tárgyalására. Bevallom, én nem szeretem a nehézségek ilyen megoldását. Természetesen nem állítom, hogy az energiaelemek (vagyis a kvantumok) elmélete nem alkalmas következtetések levonására. Ez a módszer már eddig is érdekes konzekvenciákhoz vezetett azok kezében, akik hozzáértően alkalmazták. De nehéz számomra ezt a valóság igazi képének tekinteni.” Lord Rayleigh levelét is diszkusszió követte a konferencián, ugyanúgy, mint minden előadást. Lorentz előadásához először a franciák – Brillouin, Poincaré, Langevin – szóltak hozzá, majd Planck, Einstein és Wien fejtette ki véleményét. A Rayleigh levélhez szólt hozzá Mme Curie és Kamerlingh Onnes. Jeans előadása után szólaltak meg először az angolok: Rutherford és Lindemann, majd a franciák: Langevin és Poincaré, végül Wien, aki nemcsak azért aktivizálta magát a diszkussziókban, mert kitűnően beszélt franciául, de azért is, mert ezen a konferencián nem tartott önálló előadást.

A második nap lehetett a feketetest-sugárzásé. Először jöttek a kísérletekről, mérésekről szóló beszámolók. Warburg: *A Planck formula kísérleti vizsgálata üreghullámokra*, majd Rubens: *A Planck-féle sugárzási formula vizsgálata hosszabb hullámokra*. Őket követte Planck előadása: *A hőszugárzás törvénye és az elemi hatáskvantum hipotézise*. Planck feltette a kérdést: „Vajon van-e a hatáskvantumnak jelentése a vákuumban terjedő elektromágneses sugárzásra vonatkozólag is, vagy csak a sugárzás kibocsátásakor és elnyelésekor, az anyagban jut szerephez?” Ehhez rengetegen hozzászóltak, látszott, hogy ezt tartották a résztvevők a konferencia egyik fontos kérdésének. Elsőnek Einstein szólalt meg, majd még kétszer fel-

szólt a kialakult vitában. Őt az elnöklő Lorentz követte, akinek összesen tízszer kellett megszólalnia, hogy megfelelő mederben tartsa a vitát. Poincaré és Langevin is sokszor szólt fel, kétszer még Marie Curie is hozzászólt a vitához. A németek közül ismét Wien vitte a prímet, és ekkor szólt meg először Sommerfeld és Hasenöhrl.

A harmadik napon a gázok és folyadékok kinetikus modelljével kapcsolatos kísérleti és elméleti tapasztalatokról számolt be a téma két elismert szakértője: Knudsen és Perrin. *A kinetikus elmélet és az ideális gázok megfigyelt tulajdonságai* volt Knudsen előadásának címe, Perriné pedig *Bizonyítékok a molekulák tényleges létezésére*. Ez a cím is sejteti, milyen nehéz dolga lehetett Perrinnek, amikor Ostwaldot és híveit kellett meggyőznie arról, hogy tényleg vannak molekulák. Perrin ekkor már szinte sportot űzött abból, hányféle módon tudja megmérni az Avogadro-számot. Einstein, Langevin, Lindemann mindkét előadásához hozzászólt, Marie Curie csak Perrinéhez. Perrin hosszú előadása [2]-ben 98 oldalt tesz ki, [3]-ban csak 81-et. (Minden előadás körülbelül 20%-kal kevesebb oldalt igényelt a német kiadásban, mint a franciában.)

Nernst lehetett a fő előadó a negyedik napon. Előadásának címe: *A kvantumelmélet alkalmazása egy sor fizikai-kémiai problémára*. Nála is a szilárdtest fajhője volt a központi téma, de más problémákat is diszkutált, előkerült a termodinamika harmadik főtétele is. Az előadást követő diszkusszióban főleg Einstein és Poincaré tett fel kérdéseket. Egyszer-egyszer majdnem mindenki szóhoz jutott. A Nernst után következő Kamerlingh Onnes előadásán már kissé fáradt lehetett a hallgatóság, pedig az év egyik legnagyobb felfedezéséről számolt be az előadó a következő címmel: *Az elektromos ellenállásról*. A szupravezetés felfedezéséről volt szó, de erre vonatkozó kérdést már csak Langevin tett fel a felfedezőnek.

A zárónapon Sommerfeld tartotta a legkeményebb előadást *A hatáskvantum jelentősége nemperiodikus molekuláris fizikai folyamatokban* címmel. Ők ketten, Planck és Sommerfeld használták előadásukban a hatáskvantum kifejezést. Planck még hipotézisről beszélt, Sommerfeld azonban már kész ténynek vette a hatáskvantum létezését és a katód-, illetve béta-sugárzás által kiváltott röntgensugárzásra, illetve a gamma-sugárzásra alkalmazta. Einstein előadására is sor került ezen a napon, de előtte még Langevin beszélt: *A mágnesség kinetikus elmélete és a magnetonok* címmel. Láthatóan a „kinetikus elmélet” volt a kulcsszó a konferencián, a kvantumelmélet kifejezés még nem honosodott meg. Einstein is szokatlanul szerény címet adott záró előadásának: *A fajhő probléma jelen állásáról*. Mérési eredményeket és elméleti számításokat mutatott be. A megszabott idő kevésnek bizonyult, ezért a diszkussziót is azzal kezdte, hogy kiegészítette a saját előadásán elhangzottakat, csak ezután válaszolt Lorentz és Poincaré hozzá intézett kérdéseire. Mások is kérdeztek, de ők ketten érveltek a legtöbbit. A nap végére egyértelműen Einstein, Lorentz és Poincaré lettek az egész heti Solvay-konferencia kulcsfigurái.

És a folytatás...

Néhány héttel a konferencia után derült ki, hogy az 1911. évi Nobel-díjat fizikából Wilhelm Wien, kémiából Marie Sklodowska Curie kapta.

Két év múlva, 1913-ban tartották a második Solvay-konferenciát Brüsszelben. Ezen már részt vett és hosszú, meglehetősen konzervatív szellemű előadást tartott J. J. Thomson, de hiányzott Max Planck és Jean Baptiste Perrin. A többiek viszont mind, akik éltek, ott voltak! Ebben az évben kapott fizikai Nobel-díjat az akkor hatvan éves Kamerlingh Onnes. Az anyag szerkezete volt a konferencia témája, amit összesen harminc tudós vitatott meg. Az újak között volt az Einsteinnel egyidős *Max von Laue* (1879–1960) és az idősebb *William Bragg* (1862–1942) is, aki csak pár éve tért vissza Ausztráliából. Mindketten a röntgendiffrakció kutatásának úttörői voltak. Laue 1914-ben, a két Bragg (apa és fia) 1915-ben kaptak érte fizikai Nobel-díjat.

1914-ben, abban az évben, amikor az első Solvay-konferencia kiadványa németül megjelent, kitört az első világháború. Ez pedig éppen ellenkező hatással volt a kutatókra, mint amit Solvay kívánt, amiért a konferenciát létrehozta. Megosztotta őket, nemzetiségük szerint.

Lindemann a háború kitörésekor valahol Németországban teniszezett. Megfagyott körülötte a levegő, alig tudott megmenekülni az internálástól, mivel ellenséges ország állampolgára lett. Amikor sikerült hazavergődni, azonnal beállt a légierőhöz.

Einstein született pacifista volt. 1914-ben Plancknak sikerült elintéznie, hogy meghívja őt professzornak a Humboldt Egyetem. Einstein itt elmerült az általános relativitáselmélet kidolgozásában.

Langevin Párizsban egy ultrahanggal működő szonár kifejlesztésén dolgozott, a tengeralattjárók felderítésére. Marcel Brillouin fia, Léon, végigharcolta a világháborút, szerencsére megmenekült. Perrin maga is bevonult, a mérnöki hadtest tisztjeként szerelt le a háború végén. Mme Curie igazi francia hazafiként felajánlotta Nobel-érmét a francia hadsereg számára és több mentőautót szerelt fel saját készülékével a sebesült katonák vizsgálatára. Megtanult autót vezetni, s ha kellett, beült a mentőautó volánja mögé is.

Hasenöhrlt, aki hazafias lelkesedésből vonult be, már 1915-ben megölte egy gránát a fronton. Nernstnek mindkét fia elesett a háborúban. Planck idősebb fia esett el, a fiatalabb még megérte a második világháborút.

Mennyi nemes tett és mennyi tragédia! 1921-ben, a harmadik fizikus Solvay-konferenciára és 1922-ben, az első kémikus Solvay-konferenciára már egyetlen német tudóst se hívtak meg. *Vae victis!*

1911-ben, most 100 éve, még senki se érezte a hamarosan bekövetkező viláégés előszelét. Se a későbbi győzők, se a legyőzöttek. Talán ez is az első Solvay-konferencia egyik máig ható, manak szóló tanulsága.



2011. október 19–22-én Brüsszelben lesz a centenáriumi, 25. Solvay-konferencia. Bizonyára megemlékeznek majd a nevezetes elsőről. A kitűzött téma: *The Theory of the Quantum World* nem véletlenül emlé-

keztet az első konferencia címére, ami angolul így hangzott: *Radiation Theory and Quanta*. De mennyire más ma már a nézőpont!

A konferencia elnöke 1911-ben az 58 éves Hendrik Lorentz volt, aki akkor idős tudósnek számított. 2011-ben a 70 éves *David Gross* fog elnökölni, az ő mai megjelenése fiatalosabb, mint Lorentzé volt száz évvel ezelőtt. Berkeley-ben 2007-ben tartott előadása, amely az interneten is megtekinthető, igazán meggyőző bizonyíték erre, érdemes rákattintani: <http://www.youtube.com/watch?v=AM7SnUlw-DU>. Mindketten Nobel-díjasok, a két Nobel-díj között 102 év telt el. A meghívott résztvevők száma 2011-ben legalább kétszerese lesz az 1911-esnek – már a legutóbbi két konferencián is így volt. Azokra nagyjából minden második fizikus az Egyesült Államokból érkezett, s ez valószínűleg idén is így lesz. A legjobb és legdrágább amerikai egyetemek, kutatóhelyek ma már az egész világból magukhoz vonzzák a legjobb tudósokat, s ha

egy-egy helyen a tudósok száma meghalad bizonyos „kritikus tömeget”, beindul a láncreakció, felforrósodik a tudományos élet. Az amerikai tudomány magas színvonaláról tanúskodnak az utóbbi évtizedekben kiadott Nobel-díjak is.

Száz éve, az első Solvay-konferenciának még egyetlen amerikai résztvevője sem volt.

Irodalom

1. Simonyi Károly: *A fizika kultúrtörténete*. Gondolat Kiadó, Budapest, 1986.
2. *La Theorie du Rayonnement et les Quanta, Rapports et Discussions de la Reunion tenue a Bruxelles, du 30 Octobre au 3 Novembre 1911*. Publies par M. M. Langevin et M. de Broglie, Gauthier-Villars, Paris, 1912.
3. *Die Theorie der Strahlung und der Quanten, Verhandlungen auf einer von E. Solvay einberufenen Zusammenkunft (30. Oktober bis 3. November 1911), Mit einem Anhang über die Entwicklung der Quantentheorie vom Herbst 1911 bis zum Sommer 1913*, in deutscher Sprache herausgegeben von A. Eucken, Halle a. S., Druck und Verlag von Wilhelm Knapp, 1914.

A FIZIKA TANÍTÁSA

BÉKÉSY GYÖRGY FIZIKA EMLÉKVERSENY

Härtlein Károly
BME Fizikai Intézet

A verseny kiemelt témái a névadó munkásságából adódóan az akusztika, a fénytán és a villamosságtan. A verseny elméleti és kísérleti részből áll. A méréseknek kiemelt szerepet szánunk, ezért az első napon elméleti előadást és kísérleti bemutatót is tartunk. A versenyre elsősorban a téma iránt érdeklődő tanulók jelentkezését várjuk, a 9., 10. és 11. évfolyamokról.

A középiskolai tanulók 11. évfolyama számára 12. alkalommal meghirdetett Békésy György Fizika Emlékverseny ebben az évben is a megszokott feszes, de nem barátságtalan rend szerint zajlott le a meghirdetett és betartott alábbi program szerint.

Péntek május 20.

- 14 óra érkezés a Puskás Technikumba, regisztráció
- 14 óra 30 írásbeli feladatréz
- 17 óra 30 írásbeli vége
- 17 óra 30 és 18 óra között indulás a szálláshelyre (Táncsics kollégium)

Szombat május 21.

- 8 óra Puskás Technikumban az írásbeli eredmények ismertetése és a kísérlet megkezdése,
- 8 és 10 óra között a döntőbe nem jutottak számára *Tóth Pál*, a Fizibusz vezető tanára tartott előadást
- 10 óra gyakorlati feladatok véde
- 12 óra szünet
- 13 óra eredményhirdetés, feladatmegoldások ismertetése

Az írásbeli feladatok

1. feladat kitűző: *Nagy Márton*, Sopron

Egy mechanikai hullám egyik közegből a másik közegbe lép át. Melyek változnak meg az alábbi, hullámmozgást jellemző fizikai mennyiségek közül?

- a) periódusidő,
- b) hullámhossz,
- c) fázisshift,
- d) frekvencia,
- e) terjedési sebesség.

2. feladat kitűző: *Wiedemann László*, Budapest

Adott egy $U = 2000$ V feszültségre feltöltött, elszigetelt síkkondenzátor. Egyik lemeze rögzített, a másik vízszintes irányban, önmagával párhuzamosan és az első lemezre merőlegesen elmozdulhat. Ehhez vízszintesen egy D direkciós erejű finom rugó csatlakozik, amelynek másik vége rögzített. A lemez elmozdulása a rugó hosszának változását eredményezi. Kezdetben a rugó feszítetlen, a lemezek távolsága d , egy lemez felülete A és tömege m . Minden súrlódástól eltekintünk.

a) A rugóval kapcsolt lemez rögzítését feloldva mekkora lesz a lemezek maximális távolsága, ha feltöltés után a feszültségforrást a kondenzátorról lekapcsoljuk?

b) Milyen mozgást végez a szabad lemez?

c) Mennyi idő alatt következik be a mozgó lemez maximális elmozdulása?

A lemezek között működő merőleges vonzóerő:

$$F = \frac{1}{2} \epsilon E^2 A,$$

$$W = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}$$

ahol $\epsilon = 8,86 \cdot 10^{-12}$ As/Vm, E a lemezek közti homogén elektromos tér térerőssége, A egy lemez felülete.

Adatok: $d = 1$ cm, $A = 100$ cm², $D = 0,1$ N/m, a mozgó lemez tömege $m = 10$ g.

3. feladat kitűző: Kotek László, Pécs

Nem hullámzó, mély tóban egy pontszerű fényforrás halad függőlegesen lefelé $v = 0,8$ m/s sebességgel. A víz törésmutatója $n = 4/3$. Mekkora sebességgel mozog vízszintes irányba a víz felszínén lévő fényfolt határa?

4. feladat kitűző: Härtlein Károly, Budapest

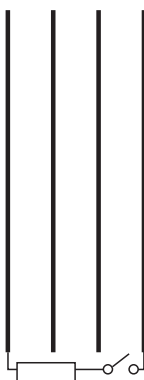
Az európai szabvány szerint működő videokamerák másodpercenként 25 képet rögzítenek. Milyen fordulatszámoknál látszik állónak annak a fűrógépnek a tokmánya, amelyik három pofával szorítja meg a befogott csigafűrőt?

5. feladat kitűző: Kotek László, Pécs

Négy darab azonos felületű, egymással szemben lévő, párhuzamos fémlamezt az ábrán látható módon elhelyeztünk, a középső fémlamezeknek $+Q$ és $-Q$ töltést adtunk, a szélső fémlamezek pedig töltetlenek. A lemezek azonos távolságra vannak egymástól, ez a távolság a lemezek méreteihez képest kicsi.

a) Mennyi töltés halad át a fogyasztón, ha a kapcsolót zárjuk?

b) Mekkora hő fejlődött a fogyasztón, ha ismert, hogy két szomszédos fémlamezből kialakított síkkondenzátor kapacitása C ?



Ami nem állt a diákok rendelkezésére

Ami a versenyen nem állt a diákok rendelkezésére, itt egy-egy lehetséges megoldás is megtekinthető.

A 2. feladat megoldása

A lemezek vonzása következtében a rugóval kapcsolt lemez elmozdul. Mivel a kondenzátor töltése változatlan marad, azért bármely helyzetben az E térerősség változatlan. Ez három összefüggésből következik:

$$Q = CU, \quad C = \epsilon \frac{A}{d-x}, \quad \text{és} \quad E = \frac{U}{d-x}.$$

Ezekből

$$Q = \epsilon AE.$$

Tehát az E térerősség a pillanatnyi lemeztávolságtól független állandó. Mivel a lemez elmozdulásával a kondenzátor kapacitása növekszik (csökken a lemezek távolsága), a kondenzátor energiája a

képlet alapján csökken, ezért a lemezek között működő vonzóerő munkája a kondenzátor energiájából táplálkozik:

$$\frac{1}{2} \epsilon E^2 A x_{\max} = \frac{1}{2} D x_{\max}^2,$$

tehát

$$x_{\max} = \frac{\epsilon E^2 A}{D}.$$

A mozgásra nézve azt állítjuk, hogy a lemez harmonikus rezgőmozgást végez. Ennek belátására írjuk fel bármely t időre nézve a mozgásegyenletet:

$$m a = F - D x, \quad \text{kiemelve:} \quad m a = -D \left(x - \frac{F}{D} \right).$$

Bevezetve az

$$y = x - \frac{F}{D}$$

új változót, az előbbi mozgásegyenlet y -ban harmonikus rezgőmozgást ír le eltolt egyensúlyi helyzettel:

$$a = -\frac{D}{m} y.$$

Ezek szerint

$$\omega^2 = \frac{D}{m}$$

körfrekvenciájú harmonikus rezgést végez a rugóhoz kötött lemez. A legnagyobb kitérést fél periódus alatt éri el a lemez az indulástól számítva.

A képletekbe való behelyettesítés után a legnagyobb kitérés $x_{\max} = 3,5$ cm, $\omega = 10$ s⁻¹, $T/2 = 0,314$ s.

A legnagyobb kitérés úgy is számítható, hogy felírjuk a munkatételt, vagy az energiamegmaradás törvényét a rugóból és a mozgó lemezből álló rendszerre.

Más megfontolás: mozgás közben a térerő munkája által folyton cserélődik az energia a rugó potenciális és a kondenzátor elektrosztatikai energiája között.

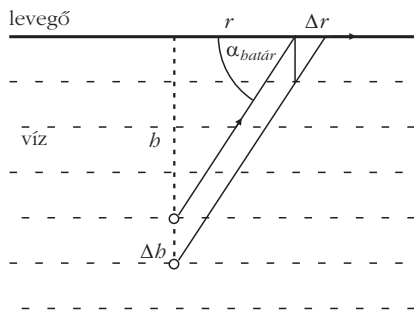
A 3. feladat megoldása

Legyen a fényforrás b távolságra a víz felszínétől! Ebben a pillanatban a víz felszínén egy kör alakú fényfolt van. A kör r sugarát a teljes visszaverődés $\alpha_{\text{batár}}$ határszögének ismeretében határozhatjuk meg.

$$\frac{\sin \alpha_{\text{batár}}}{\sin 90^\circ} = \frac{1}{n}, \quad \rightarrow \quad \sin \alpha_{\text{batár}} = \frac{1}{n}.$$

Innen a kör sugara:

$$r = b \operatorname{tg} \alpha_{\text{batár}} = b \frac{\sin \alpha_{\text{batár}}}{\sqrt{1 - (\sin \alpha_{\text{batár}})^2}}.$$



Az $\alpha_{batár}$ szögre kapott kifejezést behelyettesítve:

$$r = b \frac{\frac{1}{n}}{\sqrt{1 - \left(\frac{1}{n}\right)^2}} = b \frac{1}{\sqrt{n^2 - 1}}$$

Legyen a fényfolt határának sebessége u ! Tegyük fel, hogy a fényforrás Δt idő alatt Δb -val mozdul el, azaz v sebességére igaz, hogy $v = \Delta b / \Delta t$. Eközben a kör sugara r -ről $r + \Delta r$ értékre növekszik. A háromszögek hasonlóságából:

$$\frac{r}{b} = \frac{\Delta r}{\Delta b}, \quad \rightarrow \Delta r = \frac{r}{b} \Delta b.$$

A keresett u sebesség:

$$u = \frac{\Delta r}{\Delta t} = \frac{r}{b} \frac{\Delta b}{\Delta t} = \frac{r}{b} v.$$

A kör r sugarára kapott kifejezést behelyettesítve:

$$u = \frac{v}{\sqrt{n^2 - 1}} = 0,91 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

A 4. feladat megoldása

A megoldáshoz ismerni kell a stroboszkopikus hatást, megoldásként nem egy fordulatszámot kapunk, hanem egy sorozatot. A legalacsonyabb fordulatszám, amelyenél állónak látszik a fűrógép tokmánya:

$$n = \frac{\frac{1}{3} \text{ fordulat}}{\frac{1}{25} \text{ s}} = \frac{25}{3} \frac{1}{\text{s}}.$$

E fordulat egész számú többszöröse is megoldások.

Az 5. feladat megoldása

a) 1. megoldás. A kapcsoló zárása után legyen az 1. számú lemez töltése $-q$, ekkor a 4. számú lemez töltése $+q$, és q töltés halad át a fogyasztón a kapcsoló zárása után. A q töltés abból a feltételből határozható meg, hogy az 1. számú lemez és 4. számú lemez között a potenciálkülönbség zérus. Határozzuk meg az egyes töltött lemezek által létrehozott térerősségeket! Legyen a Q töltésű lemez által keltett mezőt jellemző térerősség E_0 , a q töltésű által keltetté pedig E_1 , ahol:

$$E_0 = \frac{1}{2} \frac{1}{\epsilon_0} \frac{Q}{A} \quad \text{és} \quad E_1 = \frac{1}{2} \frac{1}{\epsilon_0} \frac{q}{A}.$$

Kihasználva, hogy az 1. számú lemez és 4. számú lemez között a potenciálkülönbség zérus:

$$-2 E_1 d + 2 E_0 d - 2 E_1 d - 2 E_1 d = 0$$

$$\rightarrow E_1 = \frac{1}{3} E_0,$$

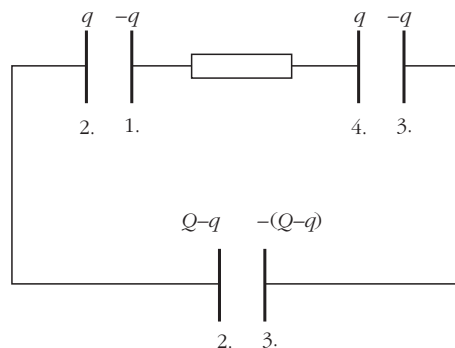
innen és a térerősségek kifejezéséből:

$$\frac{1}{2} \frac{1}{\epsilon_0} \frac{q}{A} = \frac{1}{3} \frac{1}{2} \frac{1}{\epsilon_0} \frac{Q}{A},$$

amiből a fogyasztón áthaladó töltés:

$$q = \frac{1}{3} Q.$$

a) 2. megoldás. Rajzoljuk át a kapcsolást, figyelembe véve, hogy a 2. számú lemez és 3. számú lemez két kondenzátor alkotásában vesz részt!



Használjuk fel a töltésmegmaradást, továbbá azt, hogy zárt hurokban a feszültségek előjeles összege zérus, azaz

$$\frac{q}{C} + \frac{q}{C} - \frac{Q-q}{C} = 0,$$

amiből a keresett töltés:

$$q = \frac{Q}{3}.$$

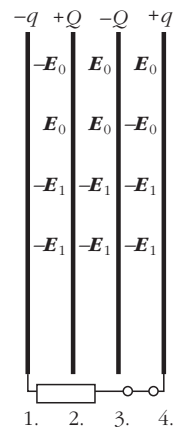
b) A ΔW fejlődő hő a rendszer kezdeti W_1 és végállapotbeli W_2 energiáinak különbsége adja.

$$W_1 = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C},$$

$$W_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{2}{3} \frac{Q}{C} \right)^2 + 2 \frac{1}{2} \left(\frac{1}{3} \frac{Q}{C} \right)^2 = \frac{1}{3} \frac{Q^2}{C}.$$

A fejlődött hő:

$$\Delta W = W_1 - W_2 = \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{3} \right) \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{6} \frac{Q^2}{C}.$$



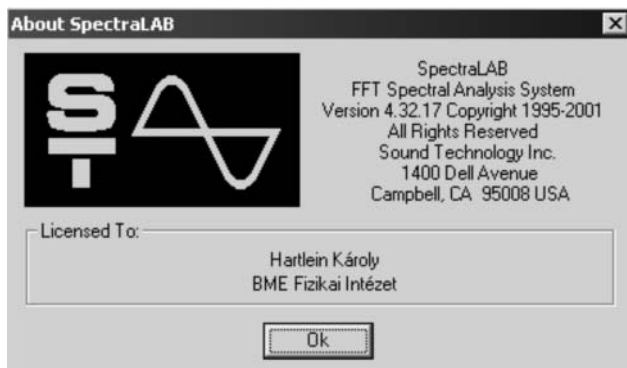
Kísérleti feladat

kitűző: Hartlein Károly, Budapest

Az asztalon található rudak segítségével határozd meg a longitudinálisan terjedő hullám terjedési sebességét alumíniumban!

Eszközök:

- 2 darab különböző hosszúságú 10 mm átmérőjű alumínium pálcá,
- mérőszalag,
- számítógép mikrofonnal,
- spektrumanalizáló szoftver (SpectraLab).



A pálcák több féle módon hozhatók rezgésbe. Ennek megfelelően álló hullámok keletkeznek, amelyek frekvenciája függ a rúd geometriai méretétől, és az anyagminőségtől. Más és más hangon fog megszólalni ugyanaz a pálcá, ha longitudinális vagy transzverzális, esetleg csavarási állóhullámot gerjesztünk. A számítógépen futtatható egy program (SpectraLab), amely segítségével hangfrekvenciás tartományban lehet frekvenciát mérni. A spektrumanalizáló szoftver valós idejű hanganalízist, frekvencia- és intenzitásmérést tesz lehetővé. Elindításakor az alapbeállítások segítségével a függőleges tengelyen a hang erősségét, a vízszintes tengelyen a frekvenciát lehet leolvasni.

Ezen kívül a számítógép desktopján (asztal) található egy film, amelyben megtekintheted az alumínium pálcá „énekeltetésének” módját. Itt leírásokat is találhatsz a pálcákon kialakuló állóhullámokról.

Az egyik kézzel hüvelyk- és mutatóujj-jal kell tartani a pálcát. A másik kéz mutató- és hüvelykujját kell gyanaporrall bekenni. Ezzel a kézzel – hosszanti irányban dörzsölve – kell rezgésbe hozni a pálcát.

A rendelkezésre álló idő 1 óra 50 perc. A mérés elvégzése után a zsűri, a kísérőtanárok és a döntőbe nem jutott diákok előtt, kiselőadás formájában kell ismertetni a mérést!

A mérés során bármilyen könyv és számológép használható! Jó munkát!

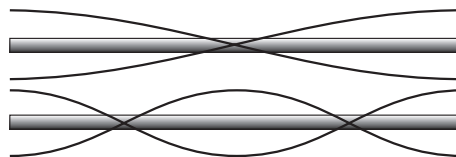
Megoldás

A mérés elvégzéséhez a versenyen szokásos módon segítségként további információkat találhattak a versenyzők. Filmeket, amelyek a megszólaltatást mutatták be, és mivel nem törzsanyag a pálcák rezgései és a rajtuk kialakuló állóhullám, erről leírást. (<http://jedlik.phy.bme.hu/bekesy2011>)

Egy 500 és egy 750 mm hosszú pálcá állt rendelkezésre. A pálcá rezgésbe hozásával hallható hangot gerjesztünk, amelynek frekvenciáját kell megmérni. Ezen kívül meg kell mérni a pálcá hosszát, így már csak a jól ismert

$$v = f_1 \lambda_1$$

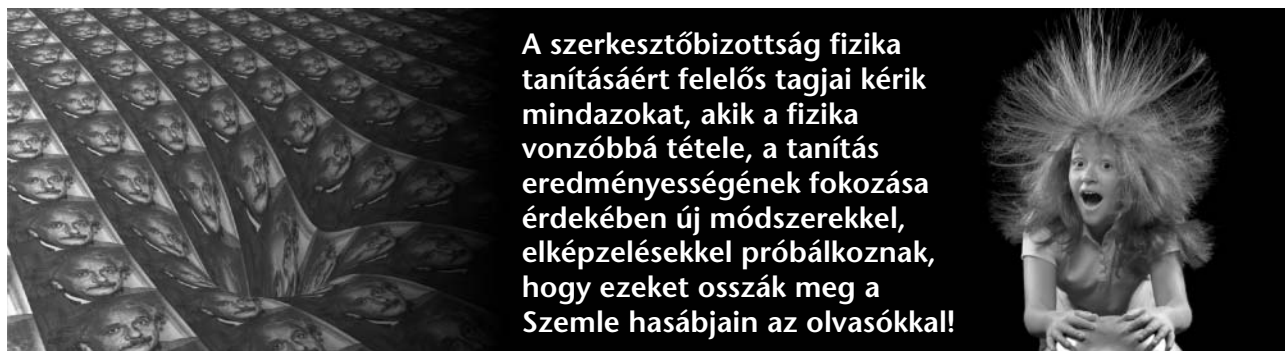
képletbe – f_1 a mért frekvencia, λ_1 az állóhullám hullámhossza – kell a mért adatokat behelyettesíteni.



A pálcá megszólaltatása akkor lesz sikeres, ha tartó kezünkkel a csomópontot fogjuk, és gerjesztő kezünkkel a duzzadó helyet gerjesztjük. Mindkét pálcán az alapl móduson kívül az első felharmonikust is meg lehetett szólaltatni.



Az eredményhirdetésnél kiderült, hogy az első helyet *Broda Balázs*, a miskolci Földes Ferenc Gimnázium tanulója, *Gregánné Hursán Zsuzsanna* és *Zámborszky Ferenc* tanítványa szerezte meg, míg *Sápi András*, a hódmezővásárhelyi Bethlen Gábor Református Gimnázium tanulója, *Nagy Tibor* tanítványa lett a második és *Pölöskei Péter Zsolt*, a szigetszentmiklósi Batthyány Kázmér Gimnázium tanulója, *Jubász Róbert* tanítványa a harmadik helyet érdemelte ki.



A szerkesztőbizottság fizika tanításáért felelős tagjai kéri mindazokat, akik a fizika vonzóbbá tételé, a tanítás eredményességének fokozása érdekében új módszerekkel, elképzelésekkel próbálkoznak, hogy ezeket osszák meg a Szemle hasábjain az olvasókkal!

EÖTVÖS-VERSENY 2011

2011. október 14-én, pénteken délután 3 órától este 8 óráig rendez meg az Eötvös Loránd Fizikai Társulat az idei Eötvös-versenyt.

Azok a diákok vehetnek részt ezen a versenyen, akik vagy az idén (2011-ben) fejezték be középiskolai tanulmányaikat, vagy most is középiskolai tanulók. Nemcsak magyar állampolgárságú versenyzők indulhatnak, hanem Magyarországon tanuló külföldi diákok, valamint külföldön tanuló, de magyarul értő és beszélő diákok is, ha 2011-ben érettségiztek, vagy jelenleg is középiskolai tanulók.

A megoldásokat magyar nyelven kell elkészíteni; a rendelkezésre álló idő 300 perc. Minden segédeszköz használható, de mobiltelefont és laptopot a versenyre bevinni tilos!

Előzetesen jelentkezni nem kell, elegendő egy személyazonosság igazolására szolgáló okmánnyal (személyi igazolvány, fényképes diákigazolvány vagy útlevelel) pontosan megjelenni az alábbi helyszínek valamelyikén:

Budapest: ELTE TTK, XI. ker. Pázmány Péter sétány 1/C. Déli tömb, földszint 0-804 (Lóczy Lajos terem).

Békéscsaba: Belvárosi Általános Iskola és Gimnázium, Haán Lajos utca 2-4.

Debrecen: Fazekas Mihály Gimnázium, Hatvan utca 44.

Eger: Dobó István Gimnázium, Széchenyi István utca 19.

Győr: MTESZ Székház, Szent István út 5.

Kecskemét: Katona József Gimnázium, Dózsa György út 3.

Miskolc: Miskolci Egyetem, Egyetemváros, A/2 ép. 3. em. Fizika tanszék.

Nagykanizsa: Batthyány Lajos Gimnázium, Rozgonyi út 23.

Nyíregyháza: Krúdy Gyula Gimnázium, Epreskert utca 64.

Pécs: PTE Fizikai Intézet, Ifjúság útja 6., A/8 terem.

Szeged: Szegedi Egyetem, Tisza Lajos körút 84-86. II. em. Elméleti fizika tanszék.

Szekszárd: Garay János Gimnázium, Szent István tér 7-9.

Székesfehérvár: Lánzos Kornél Gimnázium, Budai út 43.

Szombathely: Savaria Közlekedési Szakképző Iskola, Hadnagy utca 1.

Veszprém: Pannon Egyetem, Wartha Vince utca 1., N 245-ös terem.

Kérjük fizikatanár kollégáinkat, bátorítsák legjobb diákjaikat a versenyen való részvételre! Számos példa van arra, hogy az Eötvös-versenyen történő helytállás, az itteni sikeres szereplés indított el egy diákot későbbi sikeres életpályáján.

Mindegyik versenyzőnek eredményes munkát kívánunk!

Versenyszervezőség

NYILATKOZAT

A fiatalok reáliák iránti érdeklődése az anyaországban és az egész Kárpát-medencében drámaian csökken, érdeklődő diákok hiányában a középiskolai tanítás és a szakmai felsőoktatás színvonala süllyed. Magyarország gazdasági felemelkedése elképzelhetetlen műszaki és természettudományos szakemberek nélkül, ezért e terület oktatása – az általános iskolától a felsőoktatásig – *nemzetstratégiai* feladat, amire kiemelt figyelmet kell fordítani. A kedvező változások csak a gyakorló szaktanárok, egyetemi oktatók és az oktatási kormányzat összehangolt közös erőfeszítésétől remélhetők.

A feladatok és megoldási javaslatok

– *A fiatalok motiválása a reál szakterületek felé.* A mai információáradatban az iskolai oktatás mellett fontos, hogy az egyetemek és a kutatóintézetek

2011. augusztus 23–25. között az ELTE Természettudományi Oktatásmódszertani Centruma és az Info Park Alapítvány *A Természettudomány tanítása korszerűen és vonzón* címmel nemzetközi szemináriumot szervezett magyar nyelven tanító tanárok számára (honlapja: <http://termtudtan.extra.hu>). A konferencia végén rendezett fórum résztvevői fogadták el a fenti nyilatkozatot.

vonzó témákkal, a szakmai karrier lehetőségét is bemutatva nyissanak a középiskolás diákok felé. Nagy szükség lenne a média, legalább a közszolgálati televízió és az internetes fórumok támogatására: természettudományos ismeretterjesztő műsorokra, nagy nyilvánosságot biztosító tv-vetélkedőkre, versenyekre, fiatal szakemberek sikeres karrierjének nyilvános bemutatására, az egész kárpát-medencei magyarság szintjén. Szükség lenne természettudományos irányultságú, interaktív internetes fórumokra. Mindez szponzorokat és állami támogatást kíván.

– *Reál tantervű osztályok indítása* a természettudományos képzés középiskolai megerősítésének fontos eszköze. Ehhez feltétlenül szükséges az oktatási kormányzat támogatása, a szükséges kerettanterv kidolgozása. A humán és az általános osztályok természettudományos oktatásának az általános műveltséget kell szolgáltatnia, amihez hozzá tartozik az egy természettudományos tárgyból kötelezően megkövetelt érettségi is.

– *Az emelt szintű szaktárgyi érettségi* legyen feltétele legalább a kutató-egyetemekre történő felvételnek. Így a felvételi szűrés szerepét is ellátó emelt szintű érettségi követelményrendszerének átdolgozásában a

középiskolai szaktanárok és az egyetemi oktatók együtt vegyenek részt. Az országos szintű tanulmányi versenyeken eredményesen szereplő diákok kapjanak számottevő többletpontot az egyetemi felvételi rendszerben. Javasoljuk minden természettudományos tárgyban kárpát-medencei verseny szervezését.

– *A szakköri rendszer újraélesztése* az érdeklődő tehetséges diákokkal való szervezett foglalkozás, a tehetség gondozás javításának feltétele. A szakköröknek már az általános iskolában kiemelt szerepük van.

– A természettudományok tanításához elengedhetetlenül hozzá tartozik a jelenségbemutató, kísérletezés, mérés. *Az ezekre fordított felkészülési idő legyen része a tanárok kötelező óraterhelésének.*

– Támogatjuk a tanártovábbképzések egyetemi gondozásba helyezését és fontosnak tartjuk a szaktudományi és módszertani témák hangsúlyos megjelenését, a doktori képzéseket is beleértve.

– A Konferencia résztvevői támogatják a kormányzat által tervezett *tanári életpályamodell*t és szorgalmazzák mielőbbi bevezetését, de elengedhetetlennek tartják a tervezetben szereplő anyagi elismerés egyidejű bevezetését is.

– *A „mester-tanár” kategóriába* automatikusan kerüljenek be azok a pedagógusok, akiknek legalább öt

tanítványa már több mint három éve a tanári pályán van és őt ismeri el „mesterének”.

– *A tanárképzés kiemelését a Bologna-rendszerből,* és a szaktudományos képzés súlyának növekedését támogatjuk. A természettudományos tárgyak esetén fontosnak tartjuk, hogy a kutatói diplomát szerzők – rövid ráképzés után – tanári képesítést szerezhessenek.

– *Szakkollégium* létrehozását javasoljuk, (az egykori Eötvös Kollégium mintájára) speciálisan a leendő tanárookra szabott, az egyetemi képzést kiegészítő tantervi programmal. A kollégiumi tagság – a hallgató teljesítményét mérlegre téve – félévente kerüljön meghosszabbításra.

– *Célzott ösztöndíjat* javasolunk a hiányszakokon, a tanárszakos hallgatók számára (felvételi eredményük alapján akár már az első félévtől), állami, kari forrásból, és/vagy társadalmi szervezettől.

– A Konferencia résztvevői fontosnak tartják, hogy az oktatási kormányzat speciális ösztöndíjakkal, továbbképzésekkel segítse a határokon túl, magyar nyelven reáltárgyakat tanító pedagógusokat, és a tanárképzésben résztvevő oktatókat. Különös figyelmet igényelnek azok a területek, ahol magyar nyelvű tanárképzés nincsen.

Budapest, 2011. augusztus 25.

AZ ATOMOKTÓL A CSILLAGOKIG

Fizikai előadássorozat az ELTE TTK-n

Idén szeptembertől folytatódik az immár 7. éve tartó *Az atomoktól a csillagokig* címmel középiskolásoknak szóló ismeretterjesztő előadássorozat a fizika frontvonalába tartozó fizikai érdekességekről, újdonságokról az ELTE TTK Fizikai Intézetében.

Az előadássorozattal kapcsolatos részletes információk, az egyes előadások témái megtalálhatók a <http://www.atomcsill.elte.hu> internetes honlapon. Ugyanitt fellelhetők az elhangzott és a közeljövőben tervezett előadások címei, előadói, az előadások rövid ismertetői, sőt minden, a sorozat kezdete óta elhangzott előadás anyaga, köztük a legtöbb előadás videófelvétele is letölthető.

A 2011–2012. év előadásai

2011. szeptember 29. *Dávid Gyula* (ELTE TTK, Atomfizikai Tanszék): *A kvarkoktól az atomerőműig – kirándulás a nukleáris völgybe*

Október 13. *Barnaföldi Gergely* (MTA KFKI Rézszecke- és Magfizikai Kutatóintézet): *Kincskeresés kozmikus müonokkal*

Október 27. *Cserti József* (ELTE TTK, Komplex Rendszerek Fizikája Tanszék): *Abol a hullámok karamboloznak*

November 10. *Böthe Csaba* (fizikus, a Magyar Telekom igazgatója): *Fizika az üzleti életben*

November 24. *Major Péter* (Mediso Kft. – Mediso Medical Imaging Systems): *Pozitron-emissziós tomográf (PET) – mire való és hogyan működik?*

December 8. *Szirmai Gergely* (MTA Szilárdtestfizikai és Optikai Kutatóintézet): *Kvantumszimulátorok*
2012. január 19. *Dávid Gyula* (ELTE TTK, Atomfizikai Tanszék): *A lehűléstől forrósodó téglá – avagy a csillagok termodinamikája*

Február 2. *Pályi András* (ELTE TTK, Anyagfizikai Tanszék): *Nanoelektromechanikai rendszerek*

Február 16. *Dobrik Gergely* (MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet): *Grafén nanoszerkezetek*

Március 1. *Sasvári László* (ELTE TTK, Komplex Rendszerek Fizikája Tanszék): *A kvantumfolyadékok csodái – a szuperfolyékony hélium*

Március 22. *Éber Nándor* (MTA Szilárdtestfizikai és Optikai Kutatóintézet): *Folyadékkristályok – szépek és hasznosak*

Április 12. *Koniorczyk Máttyás* (Pécsi Tudományegyetem, Fizikai Informatika Tanszék): *A rész és a másik rész – kvantum párok távkapcsolatai*

Április 26. *Bagoly Zsolt* (ELTE TTK, Komplex Rendszerek Fizikája Tanszék): *A gamma-kitörések rejtélyei*
Minden érdeklődőt szívesen látunk. Az előadások látogatása ingyenes.

Cserti József, a rendezvény szervezője

AZ EÖTVÖS TÁRSULAT 2011. ÉVI KÜLDÖTTKÖZGYŰLÉSE

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat éves Küldöttközgyűlését 2011. május 21-én tartotta az ELTE TTK Eötvös-termében (Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A).

A napirend előtti előadást tartott *Lux Iván* (Országos Atomenergia Hivatal főigazgató-helyettese, a Nukleáris Biztonsági Igazgatóság vezetője) *A fukusimai reaktor-baleset* címmel, az ismert aktualitású eseményekről.

Miután meggyőződött arról, hogy a küldöttközgyűlés határozatképes, – a 97 küldöttből 59 megjelent – *Sólyom Jenő* levezető elnök megnyitotta a Küldöttközgyűlést, köszöntötte a küldötteket, a meghívottakat, az elnökséget, valamint a Társulat érdeklődő tagjait. Röviden ismertette a napirendi pontokat.

Mindenekelőtt megemlékeztünk az elnökség elhunyt tagjairól, *Horváth Zalán* elnökről és *Kollár János* megválasztott elnökről, valamint az elhunyt tiszteleti tagokról, *Toró Tiborról* és *Deutsch Gyuláról*.

Ez után került sor – a közgyűlés egyhangú egyetértésével – a Szavazatszámlláló Bizottság felkérésére (*Szabó György, Szénási Istvánné, Tichy Géza*).

Ezt követően tartotta meg *Kádár György* főtitkári beszámolóját.

A Közgyűlés elé terjesztette a Társulat Közhasznúsági jelentésének tartalmi beszámolóját, majd Gazdálkodási és számviteli beszámolóját, valamint a 2011. évi költségvetési tervet.

A tartalmi beszámolóban a közhasznú tevékenységek hivatalos csoportosítása szerint a következő témakörökben végzett társulati munkáról számolt be:

- tudományos tevékenység, kutatás;
- nevelés és oktatás, képességfejlesztés, ismeretterjesztés;
- kulturális tevékenység, kulturális örökség megővése, környezetvédelem;
- az euroatlanti integráció elősegítése.

Ennek keretében ismertette a Társulat szakcsoportjainak és területi csoportjainak széleskörű, szakmai tekintetben kiemelkedően igényes rendezvényeit.

Gazdálkodási és számviteli beszámoló:

Sajnos költségvetési támogatás – hasonlóan az előző évhez – nem volt a 2010-es évre sem. Vagyonunk 227 eFt-tal nőtt. Ezután következett a mérleg ismertetése, és az eredménykimutatás a 2010-es évről. Mindezek részletezése megtalálható a *Fizikai Szemle* 2011/7–8 számában, az ELFT 2010. évről szóló közhasznúsági jelentésében.

Tartalmi beszámoló a közhasznú tevékenységről:

A részletes beszámoló szintén megtalálható az előbb említett közhasznúsági jelentésben, ezért itt csak vázlatosan foglaljuk össze.

– Szakcsoportok programjai (például: Sugárvédelmi továbbképző, Szkeptikus konferencia, Közép- és Általános Iskolai Fizikatanári Ankét, elméleti fizikai iskolák stb.)

– Tudományos tevékenységek, kutatások (például: Fizikus Vándorgyűlés Pécsen, Marx György emlékülés, CERN-látogatás, Science on Stage stb.)

– Nevelés és oktatás, képességfejlesztés (például: Középiszkolai Fizikatanári Ankét – Miskolc, Általános Iskolai Fizikatanári Ankét – Eger, CERN – Genf, Tanulmányi versenyek – Eötvös, Öveges, Mikola, Szilárd Leó, vitafórum a felsőoktatási és közoktatási törvény módosításáról stb.)

– Ismeretterjesztés: ezen a téren jelentős volt a területi csoportok tevékenysége (például: Baranya megyei *Kis esti fizika* elnevezésű rendezvény, Debreceni Fizikusnapok, Fejér megyei ismeretterjesztő előadások). Fizibusz – vándorló fizikai kísérletek. Atomoktól a csillagokig – előadássorozat középiskolásoknak. A *Fizikai Szemle* önálló megjelentetése mellett a KöMaL előállításában is részt veszünk, de ez utóbbi főként a MATFUND Alapítvány feladata.

– Kulturális tevékenységek (például: Természettudományi kultúra terjesztése stb.)

– Kulturális örökség megővése keretében Eötvös Loránd emléktáblájának és sírjának koszorúzása.

– Euroatlanti integráció elősegítése: Az EPS munkájában *Nagy Dénes Lajos*, a CERN-ben *Sükösd Csaba*, a Science on Stage-ben *Kovács Ádám* és Sükösd Csaba képviseli a Társulatot. A Science on Stage 2011. április 16–19. között zajlott le Koppenhágában.

2010. évi pénzügyi beszámoló és 2011. évi költségvetési terv:

A 2010-es eredmény: 227 eFt (a tervezett 61 eFt helyett). Ez az összeg a mérlegben tőkeváltozásként került átvezetésre. Ez a növekedés jelentős javulás az előző évi 2367 eFt csökkenéssel összehasonlítva. Az eredménykimutatás részletezése megtalálható a *Fizikai Szemle* 2011/7–8 számában, az ELFT 2010. évről szóló közhasznúsági jelentésében.

A 2011-es tervezett eredmény: –12 eFt.

A társulat anyagi helyzete sajnos továbbra is aggasztó. Az 1989. évi állapotot tükröző induló tőkéhez (7,6 MFt) képest 3,1 MFt-ra csökkent a vagyonunk. Az MTESZ a csőd szélén van, ezért a Társulat titkársága októberben a KFKI telephelyre költözött. Sajnos a támogatások is csökkentek. Az NKTH-nál a kormányváltást után gondok merültek fel. A befogadott pályázatokat nem bíralták el, és nem folyósították a támogatást, így a Társulat sok pénztől elesett. Ezen okok miatt a CERN-i út szállásköltségét és az EPS tagdíját

nem tudta kifizetni az ELFT. Pozitívum viszont, hogy a MOL rengeteget áldoz a tehetségnevelésre, és a Társulatot is támogatja. 2010-ben 3,5 milliót adtak, ami nagy segítség volt. Meg kell még említeni az Innovációs Szövetségen keresztül a Knorr-Bremsét, amely az ankétokat támogatja, valamint a Paksi Atomerőművet és az Ericssont, mint támogatókat.

Kádár György végül összefoglalta négyéves főtítkári ciklusának legfontosabb tapasztalatait, megköszönve a négy évig élvezett bizalmat. Megrendülten emlékezett meg elhunytjainkról: a tavaly megválasztott elnöki várományos Kollár Jánosról, rendes hivatali idejét töltő elnökünkről, Horváth Zalánról, továbbá a Társulat két elhunyt tiszteleti tagjáról, Toró Tibor temesvári és Deutsch Gyula leuveni magyar fizikaprofesszorokról.

Ezt követően került sor a felügyelőbizottság jelentésére. *Ádám Péter* megállapította, hogy a 2010-es év eltért a tervtől. Ennek fő oka a pályázati pénzek hiánya volt. A főkönyv vezetése naprakész, a könyvelés jó. Hiány nem keletkezett. A *Fizikai Szemle* egyenlege negatív. A működési költségek csökkentek a KFKI-ba való költözéssel. Az elnökségi üléseket havonta megtartották a nyári szünet kivételével, ezekről emlékeztetők készültek. Biztos bevétel a tagdíjakból származik, a bizonytalan pedig a konferenciákból. Kérte, hogy aki tudja, támogassa a Társulatot! A beszámolót és a tervet elfogadásra javasolta. A vezetőségnek a gazdálkodást és a stratégiát feltétlenül át kellene gondolnia!

Szavazásra került sor, aminek eredményeképpen:

- Közhasznúsági jelentés elfogadva.
- 2011. évi költségvetési terv elfogadva.
- Felügyelőbizottság jelentése elfogadva.

Ezután eseti határozathozatal következett az ELFT elnökének megválasztásáról.

Sólyom Jenő elmondta, hogy az alapszabály szerint kétévenként van tisztújító közgyűlés. A Társulat tavaly választotta meg Kollár Jánost elnöknek, aki 2011-ben kezdte volna meg elnöki munkáját. A következő ciklusra megválasztott elnök halálával előállt rendkívüli helyzetre vonatkozóan a jelenlegi alapszabály nem tartalmaz rendelkezést. Azért, hogy az Eötvös Loránd Fizikai Társulat ne maradjon egy évig, a következő közgyűlésig elnök nélkül, a Társulat közgyűlése a mai napon a következő határozatot hozza:

A megválasztott elnök halála miatt előállt rendkívüli helyzetben az Eötvös Loránd Fizikai Társulat 2011. május 21-i közgyűlése a tisztújítással együtt új elnököt is választ, és annak 2 évre szóló mandátuma a többi tisztségviselővel együtt a mai nappal, megválasztásával kezdődik. Az eseti határozatot a közgyűlés egyhangúlag elfogadta.

Ezt követően Sükösd Csaba vázolta a stratégiai bizottság javaslatát a közgyűlésnek. A bizottság tagjai: *Ádám Péter*, *Kádár György*, *Nagy Dénes Lajos*, *Sükösd Csaba* és *Szatmáry Zoltán*. Egy stratégiai tervet dolgoztak ki, amely letölthető az ELFT honlapjáról. Ez egy munkaanyag, most nem kell konszenzusra jutni vele, hanem – alapos megvitatás után – a következő közgyűlésen kellene elfogadni. A stratégiai terv céljai:

1. Az ELFT küldetésének, jövőképeinek, célkitűzéseinek és szerepvállalásának megállapítása.

2. Az ELFT közép- és hosszú távú célkitűzéseire szükséges tevékenységek és prioritások meghatározása.

3. Akciók, programok és projektek azonosítása az ELFT prioritásainak megfelelően.

4. Az ELFT különféle szervei és testületei illetőségének és felelősségének azonosítása az ELFT stratégiai tervének végrehajtásában.

5. Pénzügyi irányelvek és javaslatok kidolgozása az ELFT stratégiai terv végrehajtásához.

Az anyaghoz a helyszínen többen hozzászóltak.

Ezután *Woynarovich Ferenc* terjesztett elő javaslatot az ELFT Alapszabályának módosítására:

- Elnökségi létszám bővítése 10 főről 12 főre.
- Egy tényleges főtítkárhelyettesi poszt legyen.
- Az alelnöki és főtítkárhelyettesi posztok közötti különbség megszüntetése.
- Négy éves ciklus lenne, újválaszthatósági korlát megszüntetése.
- A Felügyelőbizottság és Jelölőbizottság munkája is négy évre szóljon.
- Áttérés olyan rendszerre, hogy ne legyen minden évben választás.

Akinek ezzel kapcsolatban javaslata van, az küldje el az elnökségnek, és az elnökség azt a következő közgyűlésig megtárgyalja. A helyszínen nem volt hozzászólás.

Kádár György elmondta, hogy az Eötvös-éremből évente egy darabot szokott átadni a Társulat. Idén kivételesen kettőt adnánk át. Horváth Zalánt még életében terjesztették elő Eötvös-éremre, *Kiss Árpádot* pedig még korábban. *Patkós András* az éremmel kapcsolatban a titkos szavazás mellőzését kéri a posztumusz díj miatt. A közgyűlés ezt elfogadta. Kádár György átadta az Eötvös-érmet Horváth Zalán fiának, *Horváth Dánielnek*.

A Társulati tiszteleti tagságra kettő javaslat érkezett: *Kövesi-Domokos Zsuzsa* (baltimore-i Johns Hopkins Egyetem emerita professzora) és *Joachim Burgdörfer* (Bécsi Műszaki Egyetem, Osztrák Tudományos Akadémia).

Az elhangzottakról való vitát követően Kádár György az elnökség nevében visszaadta a közgyűlésnek a megbízatást és a következő 4 évhez sok sikert kívánt.

Ezek után *Patkós András* ismertette a Jelölőbizottság (*Heiner Zsuzsa*, *Kiss Gyula*, *Krasznaborkay Attila*, *Patkós András* és *Zsúdel László*) előterjesztését az új tisztségviselők megválasztásáról. Ismertette továbbá az egyes jelöltek életrajzát.

A 14 szakcsoportból 12-től érkezett javaslat. A területi csoportoknál rosszabb a helyzet, ott 5-től jött válasz. Az elnökséggel folyamatos konzultációt tartottak.

Elnöknek *Kroó Norbert* professzort jelölték, aki az MTA rendes tagja, az SZFKI-ban kutató, és 1958-tól az ELFT tagja.

Főtítkárnak *Kürti Jenő* professzort javasolták, aki az ELTE-n oktató, a Biológiai Fizika Tanszék vezetője, 1978-tól tagja a Társulatnak. Kutatási területe a molekulafizika, spektroszkópia.

A közgyűlés a két jelöltet elfogadta, újabb személyeket nem javasoltak.

Alelnök jelöltek: *Csákány Antalné, Kamarás Katalin, Moróné Tapody Éva*, Nagy Dénes Lajos, *Zagyvai Péter*. A felsorolt jelöltek közül 3 főt kell választani.

Főtitkárhelyettes jelöltek: *Cserti József, Kádár György, Kirsch Éva*, Krasznahorkay Attila, *Ősz György*. A felsoroltakból 4 főt kell megválasztani.

A jelölteket elfogadták, új személyeket nem javasoltak.

Felügyelő Bizottság: az alapszabály értelmében új bizottság választása szükséges, jelöltek: *Fábián Margit* (SZFKI), Kovách Ádám (ATOMKI), *Lobner Tivadar* (MFA), *Mester András* (miskolci tanár), *Ujfalussy Balázs* (SZFKI). Elnöküket maguk közül fogják majd megválasztani.

Jelölőbizottság: itt nem feltétlenül kellene teljesen újat választani. Elnökét a közgyűlés jelöli ki, erre Sólyom Jenőt (SZFKI) javasolják. További jelöltek: *Heiner Zsuzsa* (SZBK), *Lévainé Kovács Róza* (karcagi tanár), *Timár János* (ATOMKI), *Zsúdel László* (miskolci tanár).

A Jelölőbizottság előterjesztését vita majd szavazás követte. A küldöttgázolmányok leadásakor minden résztvevő megkapta a szavazólapokat, ezzel szavazhattak. A szünet ideje alatt a Szavazatszámoló Bizottság összesítette az eredményeket.

A folytatódó közgyűlésen először Mester András, a díjbizottság egyik tagja átadta a társulati díjakat. A tudományos díjak közül 2011-ben a Budó Ágoston-díj *Gyürky György*nek, a Detre László-díj *Kiss László*nak,

a Jánossy Lajos-díj *László András*nak, a Schmid Rezső-díj *Czigány Zsolt*nak, a Selényi Pál-díj *Sobler Dorottya*nak és a Szalay Sándor-díj *Tárkányi Ferenc*nek került kiosztásra. Az Eötvös-plakettet *Király Péterné, Kőrösi Magda* és *Szalay Istvánné* kapták. A Prométheusz-éremet *Zimányi Magdolna* kapta. A 2011-es Eötvös-éremet a Társulat Horváth Zalánnak (posztumusz) és Kiss Árpádnak ítélte oda.

Ezt követően Sólyom Jenő kihirdette a tisztségviselőkre és tiszteleti tagokra vonatkozó szavazás eredményét:

Elnök: Kroó Norbert – 57 igen szavazat.

Főtitkár: Kürti Jenő – 57 igen szavazat.

Alelnökök: Moróné Tapody Éva (47 igen), Nagy Dénes Lajos (44 igen), Zagyvai Péter (31 igen).

Főtitkárhelyettesek: Kirsch Éva (47 igen), Cserti József (46 igen), Kádár György (42 igen), Krasznahorkay Attila (42 igen).

Tiszteleti tagok: Kövesi-Domokos Zsuzsa (55 igen), Joachim Burgdörfer (50 igen).

Felügyelő Bizottság: 59–58 igen szavazattal a jelölteket megválasztották.

Jelölőbizottság: 57–56 igen szavazattal a jelölteket megválasztották. Elnöke Sólyom Jenő lett.

A zárszóban az új elnök és a főtitkár megköszönték a bizalmat, és kifejezték reményüket, hogy eleget tudnak tenni az elvárásoknak. Kroó Norbert elmondta, hogy az ember közösségben tud igazán kibontakozni, és a Társulat is egy ilyen közösség, amely 120 éve áll már fenn. A jövőre nézve jó közös munkát kívánt, megköszönte a részvételt és bezárta az ülést.

FÉNYSEBESSÉGNÉL GYORSABB NEUTRÍNÓK?

A svájci CERN atommagkutató központban szeptember 23-án tartott szemináriumon az OPERA együttműködés képviselői kiálltak korábbi, meglepő állításuk mellett, miszerint a neutrínók a fénynél nagyobb sebességgel is mozoghatnak. A kijelentés alapja egyszerű: a CERN részecskegyorsítójából származó neutrínók az olaszországi Gran Sasso hegység barlangjában lévő laboratóriumba 60 nanoszekundummal hamarabb érkeztek meg, mint a fény. Ez három egyszerű mérésen alapszik: a két laboratórium közti távolság, a neutrínók svájci indulása, valamint olaszországi detektálása időpontjának meghatározásán. Ténylegesen azonban az időpontoknak, valamint a távolságnak megfelelő pontosságú mérése, amely lehetővé teszi nanoszekundum nagyságrendű időkülönbség megbízható meghatározását, rendkívül nehéz feladat.

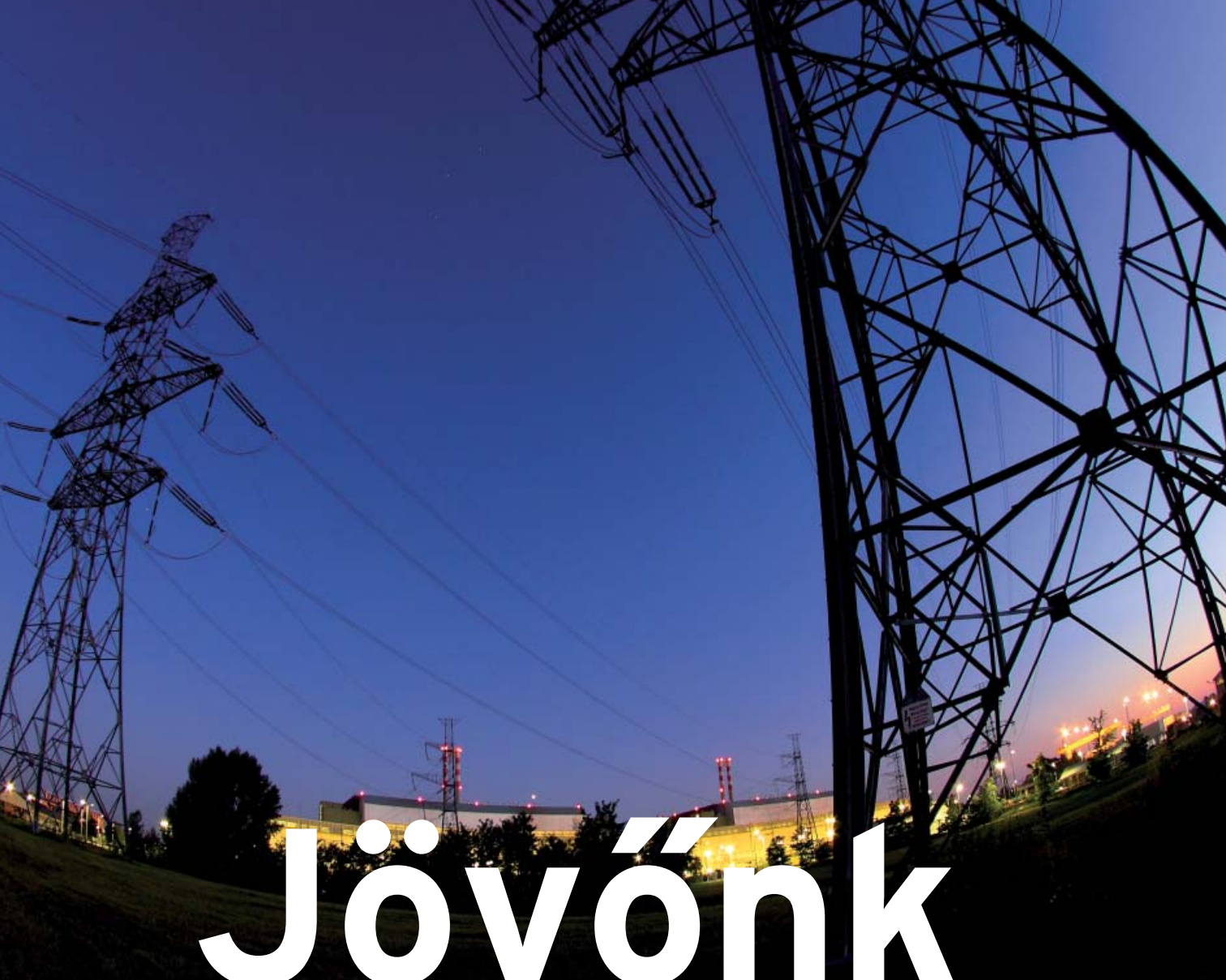
A Gran Sasso hegység 1400 méter mélységben lévő barlangjában az OPERA (Oscillation Project with Emulsion-tRacking Apparatus) együttműködés detektora a mérésnél képes kiküszöbölni a kozmikus sugárzás zajkeltő hatását, azonban földrajzi helyzetének pontos meghatározása nehéz feladat marad. A kutatók ezért a barlang felett elhaladó 10 km hosszúságú autópályá-

szakasz forgalmát egy hétre leállítva a végpontok helyzetét GPS-műszerekkel határozták meg. A CERN neutrínóforrásának pozíciója ismeretében aztán háromszögeléssel kiszámították a neutrínók által befutott távolságot, amely 730 534,61 méter ± 20 cm-nek adódott.

A neutrínók indulásának és érkezésének időpontját cézium órákkal határozták meg, amelyek mérési pontatlansága 1 másodperc 30 millió év alatt, ami az időkülönbség-mérés pontosságát 1 nanoszekundumra állítja be. A biztonság kedvéért az együttműködés kutatói független svájci és német metrológus kutatócsoportok együttműködésével ellenőrzik a méréseket.

A kutatók egy része, köztük *Samuel Ting*, az MIT Nobel-díjas professzora elismerését fejezte ki a „szép kísérletért”. Azonban csak az idő dönti el, hogy az eredmények kiállják-e további vizsgálatok próbáját, és sikerül-e azokat független mérésekkel reprodukálni. Továbbá kételyek vannak a neutrínók CERN-beli indulási időpontjának mérésével kapcsolatban. Ugyanis a CERN-ben nincs neutrínódetektor elhelyezve, így azok indulási időpontját az őket keltő protonnyaláb adataiból kell extrapolálni.

(<http://www.newscientist.com/>)



Jövönk energiája



paksi atomerőmű

www.atomeromu.hu



ISSN 0015325-7

11009
9770015325009