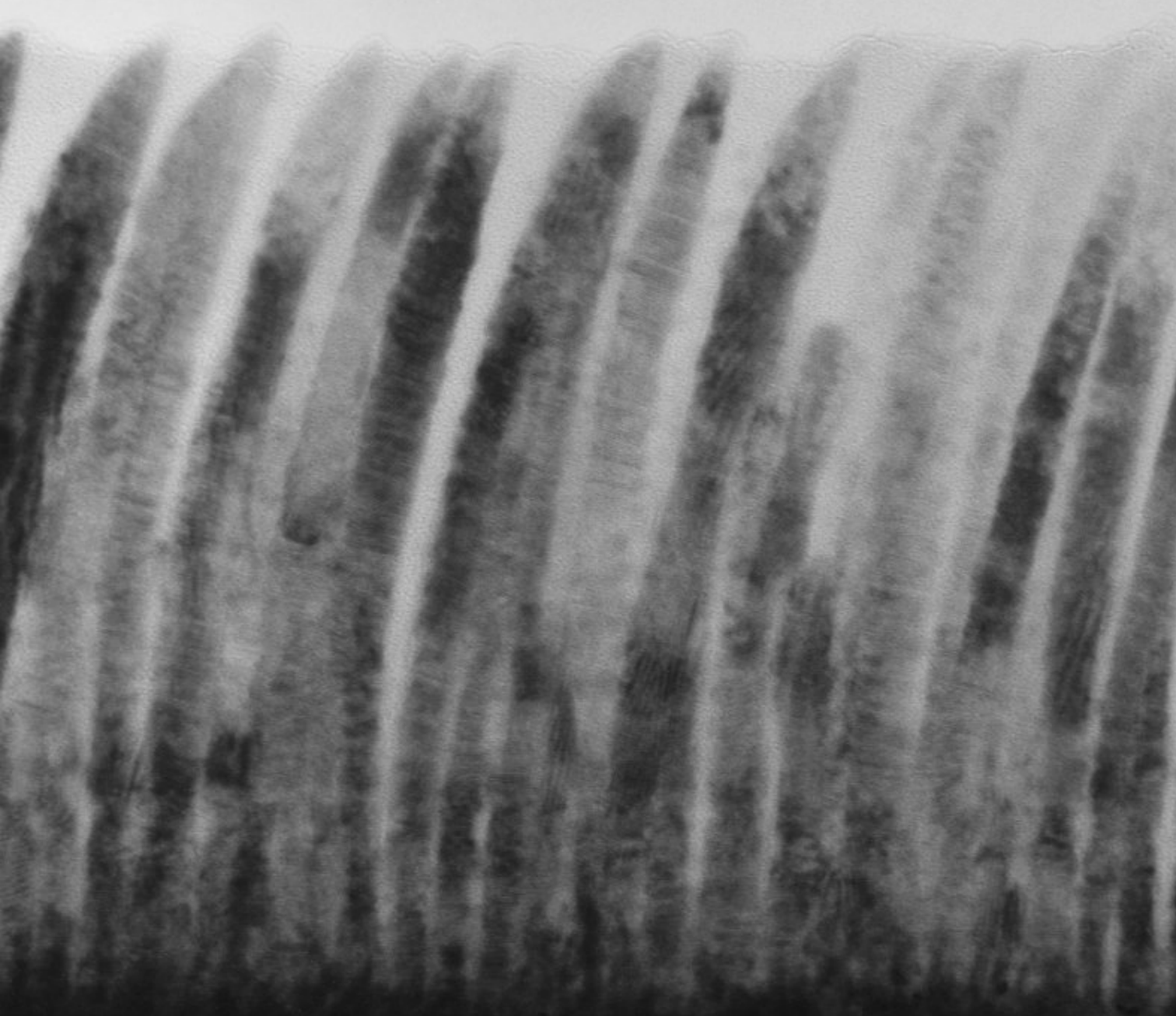


fizikai szemle



2007/2

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

Főszerkesztő:

Németh Judit

Szerkesztőbizottság:

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

Szerkesztő:

Tóth Kálmán

Műszaki szerkesztő:

Kármán Tamás

A folyóirat e-mailcíme:

szerkesztok@fizikaiszemle.hu

A lapba szánt írásokat erre a címre kérjük.

A folyóirat honlapja:

<http://www.fizikaiszemle.hu>

A címlapon:

**MgO hordozóra (ZrN puffer-réteggel)
növesztett AlInN nanofű
transzmissziós
elektronmikroszkóppal készített
átnézeti képe.
A fűszálak vastagsága jellemzően
10–20 nm, hosszuk 300 nm.**

TARTALOM

<i>Kroó Norbert:</i> Fényes új világ: egy új típusú fény és alkalmazásai	37
<i>Kollár János:</i> Fémek felületi struktúráinak kvantummechanikája	42
<i>Horváth Dezső:</i> Szimmetriák és sértésük a részecskék világában – a paritásértés 50 éve	47
<i>Balázs Béla Árpád:</i> A fizikusok tovatűnő szent grálja: a „világképlet”	51
<i>Borbély Éva:</i> A számítógépek építésének fizikai korlátai	54
Keszthelyi Lajos 80 éves (<i>Ormos Pál, Szőkefalvi-Nagy Zoltán</i>)	57
Ferenczi díj, 2006 (<i>Osváth Zoltán, Radnóczy György Zoltán</i>)	59
<i>Radnai Gyula:</i> Wigner Jenő iskolás éve	62
Szerzőink figyelmébe	72
A FIZIKA TANÍTÁSA	
Jubileumi Középiskolai Fizikatanári Anket és Eszközbemutató (<i>Mester András</i>)	67
KÖNYVESPOLC	68
HÍREK – ESEMÉNYEK	69
MINDENTUDÁS AZ ISKOLÁBAN	
Nanotudomány, nanotechnológia (<i>Gyulai József</i>)	71

N. Kroó: A new type of light and its application

J. Kollár: Quantum mechanics of metal surface structures

D. Horváth: Symmetries and their violation in the world of particles

B.A. Balázs: The fugitive “world formula” of physicists

E. Borbély: The physical limits to the building of computers

Academician L. Keszthelyi's 80th anniversary (*P. Ormos, Z. Szőkefalvi-Nagy*)

The Ferenczi Reward 2006 (*Z. Osváth, G.Z. Radnóczy*)

J. Radnai: E. Wigner's years at School

TEACHING PHYSICS

The Jubilee Meeting and Equipment Display of secondary school physics teachers (*A. Mester*)

BOOKS, EVENTS

SCIENCE IN BITS FOR THE SCHOOL

Nanoscience, nanotechnology (*J. Gyulai*)

N. Kroó: Eine neue Lichtart und ihre Anwendungen

J. Kollár: Quantenmechanik der Oberflächenstruktur von Metallen

D. Horváth: Symmetrien und ihre Verletzung in der Welt der Elementarteilchen

B.A. Balázs: Die unauffindbare „Weltformel“ der Physiker

E. Borbély: Die physikalischen Grenzen der Entwicklung von Rechnern

Academician L. Keszthelyi zum 80. Geburtstag (*P. Ormos, Z. Szőkefalvi-Nagy*)

Der Ferenczi-Preis 2006 (*Z. Osváth, G.Z. Radnóczy*)

J. Radnai: E. Wigners Schuljahre

PHYSIKUNTERRICHT

Jubiläums-Landestreffen und Instrumentenschau der ungarische

Mittelschul-Physiklehrer (*A. Mester*)

BÜCHER, EREIGNISSE

WISSENSWERTES FÜR DIE SCHULE

Nanowissenschaft, Nanotechnologie (*J. Gyulai*)

Н. Кроо: Новый вид света и его применения

Я. Коллар: Квантовая механика поверхностных структур металлов

Д. Хорват: Симметрии и их нарушение в мире элементарных частиц

Б.А. Балаж: Неуловимая «мировая формула» физиков

Э. Борбелы: Физические пределы развития компьютеров

Академику Л. Кестхели 80 лет (*П. Ормош, З. Сёкефалви-Надь*)

Премия им. Ференци 2006 (*З. Ошват, Д.З. Радночи*)

Й. Раднаи: Школьные годы Э. Вигнера

ОБУЧЕНИЕ ФИЗИКЕ

Юбилейное съезд и выставка приборов учителей физики (*А. Меустер*)

КНИГИ, ПРОИСХОДЯЩИЕ СОБЫТИЯ

НАУЧНЫЕ ОБЗОРЫ ДЛЯ ШКОЛ

Нанонаука, нанотехнология (*Й. Дьюлаи*)

Szerkesztőség: 1027 Budapest, II. Fő utca 68. Eötvös Loránd Fizikai Társulat. Telefon/fax: (1) 201-8682

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

Kiadja az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, felelős: Németh Judit főszerkesztő.

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

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

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

Megjelenik havonta, egyes szám ára: 750.- Ft + postaköltség.

HU ISSN 0015-3257

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

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

LVII. évfolyam

2. szám

2007. február

FÉNYES ÚJ VILÁG: EGY ÚJTÍPUSÚ FÉNY ÉS ALKALMAZÁSAI

Kroó Norbert

MTA Szilárdtestfizikai és Optikai Kutatóintézet

A világról szerzett információink jelentős hányadát elektromágneses sugárzás, ezen belül fény, különösen látható fény segítségével szerezzük. A fény szóródik a megfigyelt tárgyon, és amikor ezt a fényt egy lencsével – akár a szemlencsével, akár egy mikroszkóppal – összegyűjtjük, kialakul az a kép, amelyet látunk. A megfigyelő ilyenkor a tárgytól a fényhullám hosszához képest messze van. Ezt nevezzük az optikában *távoli térnek*. Az elektromágneses sugárzásnak azonban olyan komponense is van, amelyik a megvilágított tárgyhoz tapad. Ez a tér a tárgytól távolodva exponenciálisan csökkenő térerősségű. Ezt a térkomponenst, amely a szemünkben vagy a mikroszkópban kialakult képhez nem járul hozzá, az optikában *közei térnek* nevezzük. Ennek a közei térnek egy speciális formája hozható létre fémek felületén, amelyet *felületi plazmonoknak* nevezünk. Ebben a cikkben a felületi plazmonok tulajdonságait és lehetséges alkalmazásait szeretném taglalni.

A felületiplazmon-oszcillációk és közelítér-mikroszkópia

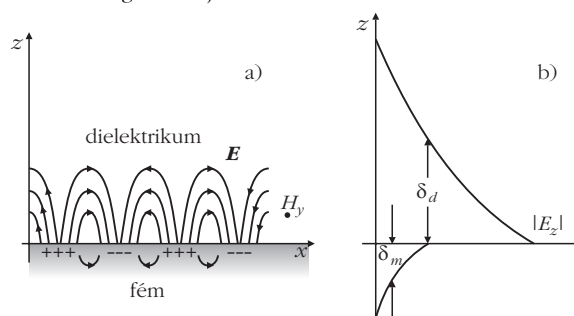
A felületiplazmon-polaritonok (röviden felületi plazmonok) egy fém felületén gerjesztett elektronsűrűség-oszcillációból és a hozzá csatolt, a felületre merőleges elektromos vektorú elektromágneses térből állnak, és a fém–vákuum (dielektrikum) határfelület mentén, ahhoz kötődve terjednek (1.a ábra). Ezt az elektromágneses teret a Maxwell-egyenletek írják le. A jelenség kialakulásához a következő feltételeknek kell teljesülniük.

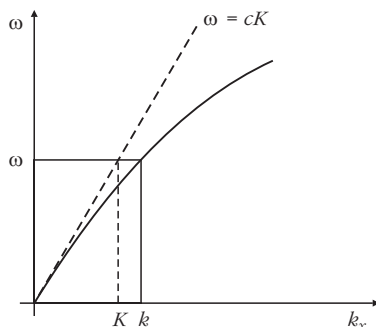
- A dielektrikum dielektromos állandójának valós, pozitív értékűnek kell lennie.
- A fém dielektromos állandója komplex, valós tagjának negatívnak kell lennie és olyan abszolút értékűnek, amely nagyobb, mint a képzetes rész. Ez számos fémre, például az aranyra és az ezüstre, teljesül.

A fém dielektromos állandójának képzetes része határozza meg, hogy milyen gyorsan cseng le a plazmonoszcilláció, miközben energiája hővé alakul. Ezért az a jó, ha az imaginárius komponens kicsiny. Ekkor – például fénnel gerjesztve a plazmonokat – éles rezonanciagörbét kaphatunk, a maximum közelében közel 100%-os gerjedési hatásfokkal. Ebből a szempontból az ezüst a legjobb anyag, de az arany sem rossz.

A gerjesztett hullám a fém felülete mentén terjed (1.a ábra), de a felületre merőlegesen nem. Ilyen módon a távoli térben nem mérhető. Ezért a megszokott módon, azaz képalkotás céljából nem használható. Nagyon fontos megállapítás, hogy az úgynevezett diffrakciós limit a felületi plazmonokra nem érvényes. A diffrakciós limit azt jelenti, hogy a hullámhossznál valamivel kisebb távolságra lévő pontokat optikai úton nem lehet felbontani. A diffrakciós limit hiánya, azaz a felbontóképesség korlátatlansága egy sor lehetséges alkalmazást tesz lehetővé.

1. ábra. Fémfelületen gerjesztett felületi plazmonok $\mathbf{E}$ elektromos térerősségének változása a felület irányában (a ábra) és a felületre merőleges irányban (b ábra). A fémfelülettől távolodva a plazmonok elektromos tere exponenciálisan csökken. A mágneses tér a határfelületen folyamatosan megy át. δ_m a szkinmélység, δ_d a csökkenő térerősség állandója.





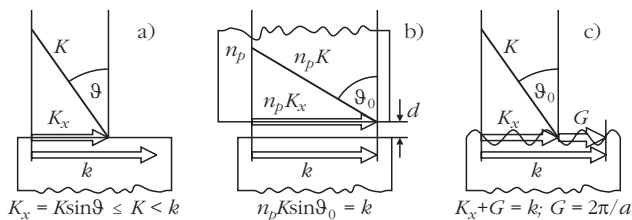
2. *ábra.* Felületi plazmonok diszperziós görbéje (a frekvencia és a hullámszám függvényében) összehasonlítva a fény (szaggatott egyenes) diszperziós összefüggésével (a fény sebessége vákuumban). A fény hullámzáma (K) mindig kisebb az azonos energiájú felületi plazmon hullámszámánál (k).

Az elmúlt években rendkívül sok vizsgálat folyt a felületi plazmonok tulajdonságainak tisztázása és gyakorlati alkalmazásának céljából, többek között nálunk is. Meghatároztuk a felületi plazmonok diszperziós összefüggését, amely a hullám impulzusa vagy hullámhossza és energiája közötti összefüggést jelenti, és értékes, érdekes alkalmazásokat ismerhettünk meg az integrált optika területén.

A kutatások során olyan módszerek fejlődtek ki, amelyek lehetővé teszik a hullámhossznál finomabb szerkezetek vizsgálatát, új lehetőségeket teremtve a plazmonok előállításának területén, illetve tulajdonságaik vizsgálatában. De esély van arra is, hogy új fotónikus eszközöket hozzunk létre a hullámhossznál kisebb mérettartományokban. Ezek számos területen, így például a számítástechnikában, egyes orvosi alkalmazásokban, vagy a nanoméretű rendszerek mikroszkópiájában kecsegtetnek fontos, új alkalmazási lehetőségekkel.

A felületi plazmonokat p-polarizált fénnel (a felületre merőleges elektromos terű fénnel) lehet gerjesztetni, de mivel diszperziós összefüggésük eltér a fény diszperziós összefüggésétől, speciális technikákat kell alkalmaznunk. Amint ugyanis a 2. ábrán láthatjuk, adott energiánál a fény impulzusa nagyobb, vagyis hullámhossza kisebb, mint a megfelelő felületi plazmon esetén. A hiányzó impulzust valahogyan pótolni kell.

Két általánosan elterjedt módszert ismerünk erre a célra. Az egyik az, hogy a fényt egynél nagyobb törésmutatójú anyagon, például üvegprizmán keresztül bocsátjuk a fém felületére. Ismeretes, hogy ilyen prizma-ban a fény impulzusa a törésmutató mértékével meg-növekszik, ezért így lehetőséget lehet találni arra, hogy a felületi plazmonokkal párhuzamos vetülete – amint a *3.b ábrán* látható – megegyezzek a felületi plazmon impulzusával az adott energiánál. Ilyen módon az energia- és az impulzusmegmaradás törvé-nye a fény és a plazmon között teljesülhet. Ebben az esetben rezonanciaszerű gerjesztést tapasztalhatunk. A másik lehetőség a hiányzó impulzus pótlására, hogy azt egy rács segítségével biztosítsuk. A fény impulzus-vektorának a felületi plazmon impulzusával párhuzam-os komponenséhez hozzáadva a rács „reciprokrács-

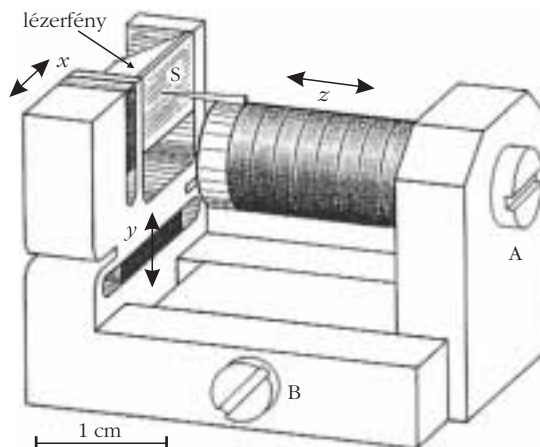


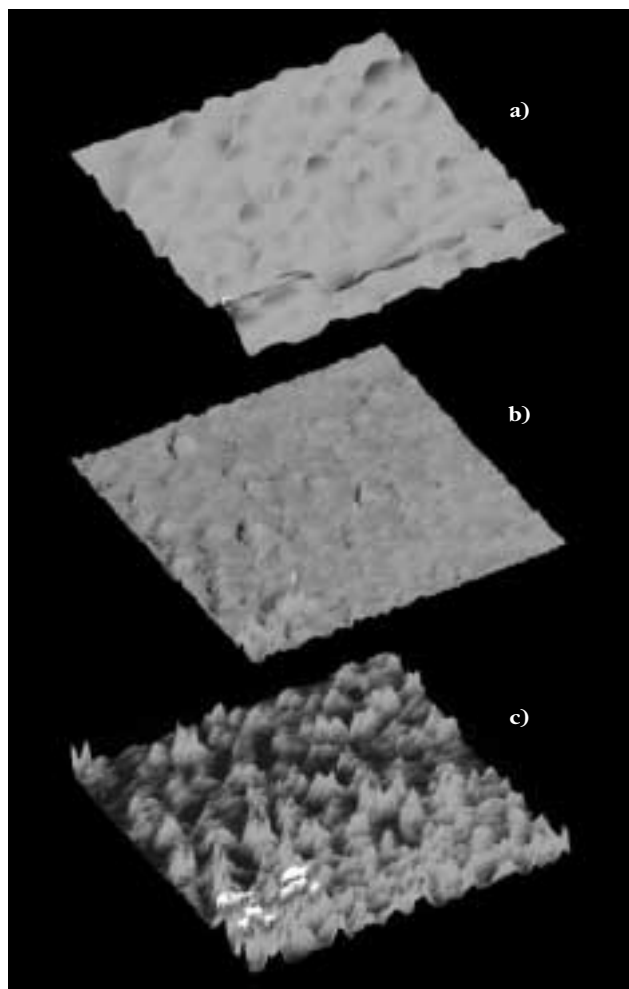
3. *ábra*. Fény és felületi plazmonok csatolása. Vákuumból jövő fény nem tud plazmonokat gerjeszteni, mert az impulzusmegmaradási törvény nem teljesül ($K_x < k$), (a *ábra*). Az impulzusmegmaradási törvény teljesülése vagy a fény üvegen keresztül vezetésével (n_p , a törésmutató) (b *ábra*), vagy egy G , „hullámszáma” rács segítségével érhető el (c *ábra*). K a fény hullámszáma, k pedig az azonos energiájú felületi plazmoné.

vektorát”, vagyis „kváziimpulzusát”, ismét teljesíthető az impulzusmegmaradás törvénye, és rezonanciaszerű gerjesztést lehet létrehozni (3.c ábra).

Vizsgáljunk meg egy konkrét esetet. A fényt úgynevezett csillapított totálreflexióes geometriában egy prizmán keresztül bocsátjuk a fémfelületre, például mikroszkópobjektívvel fókuszálva, és az egész rendszert – prizma + a felületén lévő vékony fémréteg egy pásztázó alagútmikroszkópba (STM) helyezzük. Ez azt jelenti, hogy a felületi plazmonokat hátulról, a prizma oldaláról, az STM tűjével szemben gerjesztjük, ahogyan az a 4. ábrán látható. Alkalmazhatunk például egy félvezető lézert, mondjuk 670 nanométeres hullámhosszal, és ennek fényét megszagghatjuk mondjuk 50 mikroszekundumos impulzusokat bocsátva tipikusan 2 kHz-es frekvenciával a mintára. Ha a pásztázó mikroszkóp tűjét a felületen meanderes mozgással végigvezetjük, képet alkothatunk. Helyezzünk képzeletben a fém felületére egy koordináta-rendszert. Az x , y tengelyek legyenek a fém felületével azonos síkban, a z tengely pedig legyen erre merőleges. A mikroszkópban az xy síkbeli mozgatót a tárgy mozgásávalval érjük el, a felületre merőleges mozgatót pedig egy piezokerámiával, amelyre a pásztázó alagútmikroszkóp tűjét erősítjük. Ha ennek a piezokerámiának a feszültsége arányos a kerámia elmozdulásával, akkor a feszültség változtatásával

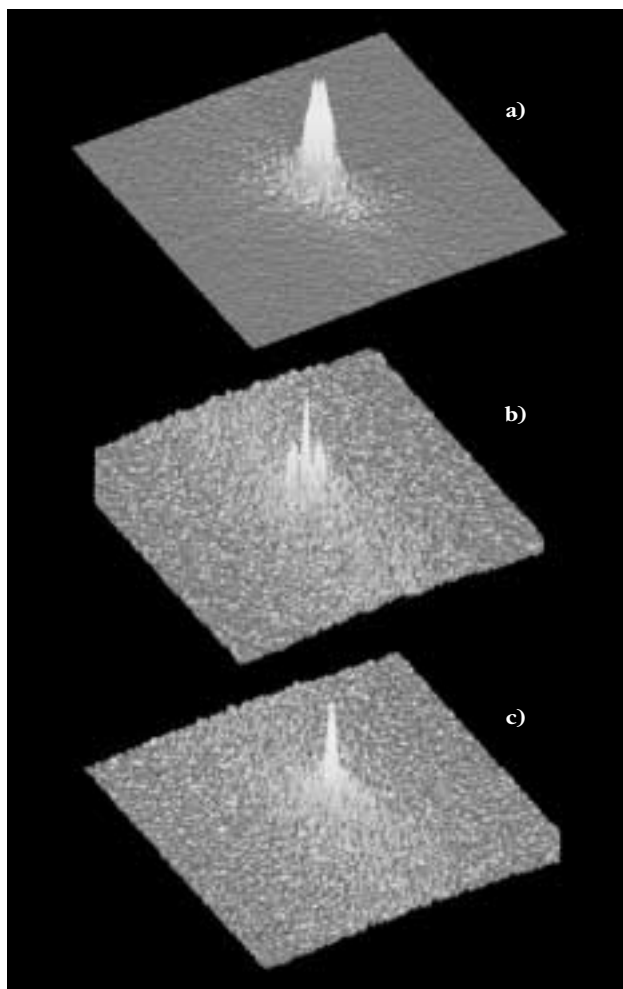
4. *ábra.* Pásztázó alagútmikroszkóp, melyben közeli teret keltünk felületi plazmonok gerjesztésével, áttetsző fémrétegen, lézerfény üvegprizmán keresztüli becsatolásával.





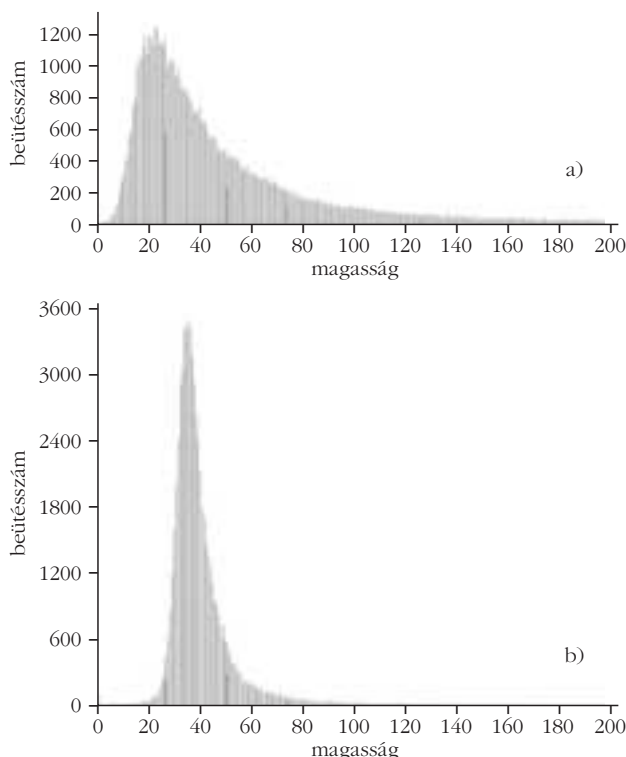
5. ábra. Az alagútmikroszkóppal egyidejűleg felvett 200×200 nanométeres topográf (a), felületi plazmon (b) és termikus (c) kép.

(úgy, hogy a mikroszkóp áramát állandónak tartjuk) feltérképezhetjük a felületet. Ez lesz a vizsgált felület topográfiai képe. Ugyanakkor azonban a lézerfény által keltett felületi plazmonok terét is letapogathatjuk. A tér változásával arányosan ugyanis megváltozik a pásztázó elektronmikroszkópon keresztül folyó alagútáram, és ezt a választ is pontról-pontra feltérképezhetjük. Ilyen módon egyidejűleg kialakul a plazmonkép is. A felületi plazmonok viszont elhalnak a felületen, és felmelegítik azt. Ezért a pásztázó elektronmikroszkóp fémtűje és a fém felülete között hőmérsékletkülönbség jön létre, és ha a két fém különböző anyag, akkor termofeszültség is keletkezik. Emellett a felület lokálisan is felmelegszik az elhaló felületi plazmonok miatt, ezért a felület z-irányban kitágul. Ez a két utóbbi hatás együtt egy úgynevezett termikus képet eredményez, amelyet akkor regisztrálhatunk, amikor a lézert már kikapcsoltuk, vagyis a felületi plazmonok – hiszen ezeknek igen rövid az élettartamuk (100 femtoszekundum nagyságrendű) – már nem léteznek a felületen. Tehát a pásztázó alagútmikroszkóp segítségével egyidejűleg három képet is rögzíthetünk, mégpedig egy topográfiai, egy felületi plazmon- és egy termikus képet (5. ábra). Ez a felületfizikában természetesen egy sor vizsgálatot tesz



6. ábra. Az 5. ábra képeinek Fourier-transzformáltjai.

lehetővé, ugyanakkor módot nyújt annak tisztázására is, hogy milyen módon viselkednek a felületi plazmonok nanoszerkezetekben. Érdekes megjegyezni, hogy a leírt mikroszkóppal optimális esetben 1 nanométert megközelítő felbontóképességet sikerült elérnünk a plazmonokat látható fény segítségével gerjesztve, ami nyilvánvalóan bizonyítja, hogy ebben a speciális esetben sem érvényes a diffrakciós korlát. Szemmel látható, hogy a három kép lényegesen eltér egymástól, noha – a felület finomstruktúrájára jellemző – hasonló tulajdonságaik is vannak. Ha ezeket a képeket Fourier-transzformáljuk, akkor még jobban látszik a lényeges eltérés a három kép között. Különösen érdemes megfigyelni a felületiplazmon-kép Fourier-transzformáltját (6. ábra). A 6.b képen hét kiemelkedő mellékcúscot látunk. Ha megvizsgáljuk a mellékcúscok helyét, kiderül, hogy pontosan azon a helyen vannak, ahol a felületi plazmonok diszperziós görbéje alapján lenniük kell. Ez önmagában a klasszikus fizika törvényei szerint természetes lehetne. De ha az alkalmazott lézerteljesítmény mellett egyidejűleg megnézzük az alkalmazott plazmonsűrűséget, akkor azt látjuk – a plazmonok rövid élettartama miatt –, hogy a mérendő térben csak 0,1 vagy annál kevesebb plazmon tartózkodik. Nyilvánvaló tehát, hogy ezek a plazmoncsúcsok a plazmonoknak önmagukkal

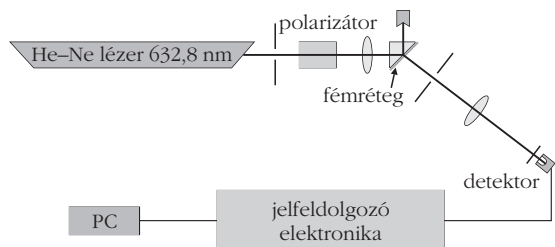


7. ábra. A felületi plazmon és termikus képek statisztikus analízise. A termikus kép (a ábra) Boltzmann-, a felületi plazmon kép (b ábra) pedig Poisson- (sub-Poisson-) eloszlást mutat.

való interferenciájából származnak. Ez máris felveti a gyanút, hogy netán e plazmonok nemklasszikus tulajdonságokkal rendelkeznek. Ezért elvégeztük a megfigyelt képek statisztikai analízisét, vagyis megvizsgáltuk a felületi plazmonok által produkált tér intenzitásának eloszlását, összehasonlítva a termikus kép ugyanilyen eloszlásával.

A 7. ábrán látható, hogy a termikus kép z -tengely irányú amplitúdóinak eloszlása, vagyis a termikus kép maga Boltzmann-eloszlást mutat, mint ahogyan annak lennie is kell. Ugyanakkor a felületi plazmonkép Gauss-eloszlást (a Poisson-eloszlás határesetét) mutat, és ráadásul lényegesen keskenyebb, mint a Poisson-eloszlás. Ez akkor tapasztalható, hogyha egy nemklasszikus rendszerben úgynevezett squeezing, vagyis „összenyomási” effektus lép fel. Így egyre inkább megerősödik az a következtetés, hogy a felületi plazmonok nemklasszikus tulajdonságokat is mutatnak. Ez a megfigyelés különösen azért meglepő, mert egy-egy plazmonhullámban 10^{10} nagyságrendű elektron vesz részt.

8. ábra. Elrendezés lézersugárral gerjesztett felületi plazmonok bomlásával előálló fény statisztikus analízis vizsgálatára.

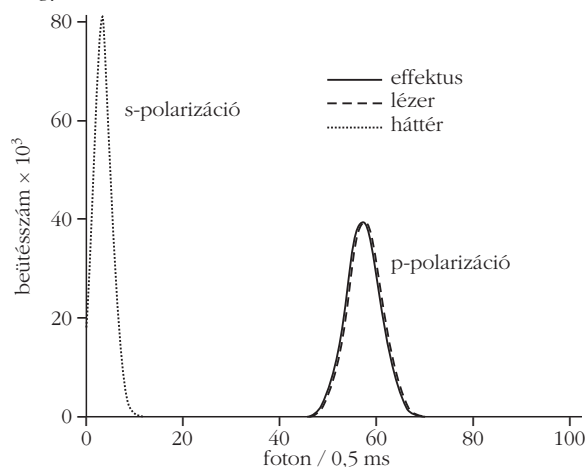


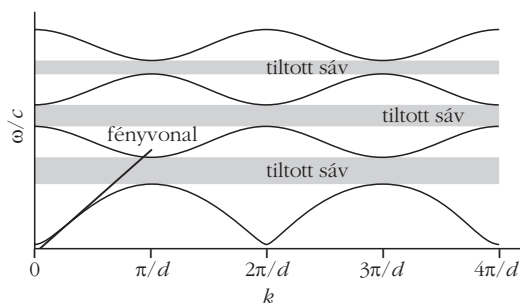
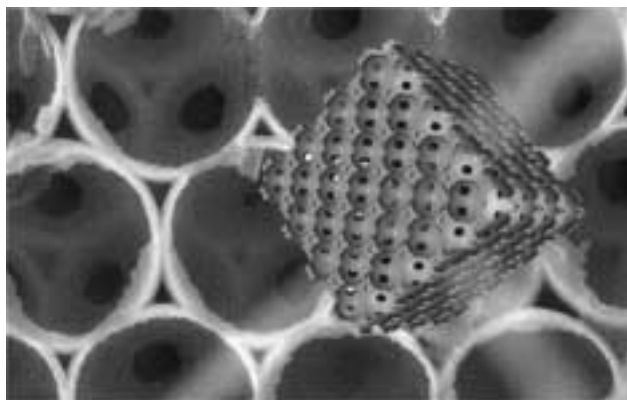
A mérések jellege miatt ezekben az eloszlásokban időben átlagolt statisztikus eloszlást látunk. Felmerül ezért annak igénye, hogy megnézzük a felületi plazmonok jelenek időbeli statisztikáját is, térben integrálva. Ilyen mérés viszonylag egyszerűen elvégezhető a 8. ábrán látható geometria szerint. A felületi plazmonokat itt is prizmán keresztül gerjesztjük, akárcsak a pásztázó alagútmikroszkóp esetében, azonban most térben integráljuk a megfigyelt jelet, és az időbeli eloszlást mérjük.

A 9. ábrán jól látható, hogy a felületi plazmonok fénné váló visszaalakítása során ezek statisztikus eloszlása pontosan ugyanolyan, mint a gerjesztő lézerfény fotonjaié. Ez koherens állapotnak felel meg, mivel a gerjesztés lézerrel történt, és a lézer koherens fényforrás. E megállapításból egy érdekes következtetés vonható le. A gerjesztő fény minden fotonja egy-egy felületi plazmonhullámot gerjeszt. Ezek a hullámok egy-egy fotonná bomlanak el. De az elbomló foton statisztikája ugyanaz, mint a gerjesztő fotonoké, vagyis a plazmonhullám ezt a koherens állapotnak megfelelő statisztikus eloszlást megtartotta. Ez újabb bizonyítéka a felületi plazmonok nemklasszikus tulajdonságának. A 9. ábra szerinti mérésben egy 5 milliwattos lézert használtunk, és a gerjesztést ugyanolyan geometriában végeztük el, mint a pásztázó elektronmikroszkóp esetében. A detektor egy lavina-félvezetődioda volt, és egy igen nagy felbontóképeségű elektronikus rendszerrel gyűjtöttük össze a detektor impulzusait. A kapott eredmény nem nevezhető triviális megfigyelésnek, hiszen minden lézerfoton egy felületi plazmont gerjeszt a fémfelületen, és ez utóbbi egy mezoszkopikus rendszer. És noha a felületi plazmon energiája ugyanaz, mint a gerjesztő fotoné, a hullámhossza rövidebb.

Érdeemes megemlíteni, hogy E. Altevischer vezetésével egy holland kutatócsoport elvégzett egy érdekes kísérletet. $\hbar\omega$ energiájú fotonokat két $\frac{1}{2}\hbar\omega$ energiájú fotonná hasítottak egy nemlineáris kristály segítségével. Ismeretes, hogy az így keletkező két foton egymással

9. ábra. Lézerfény és az általa gerjesztett plazmonok bomlásával keletkező fény statisztikus tulajdonságainak összehasonlítása. A két fénysugár tulajdonságai megegyeznek, a két statisztikus eloszlás fedi egymást.





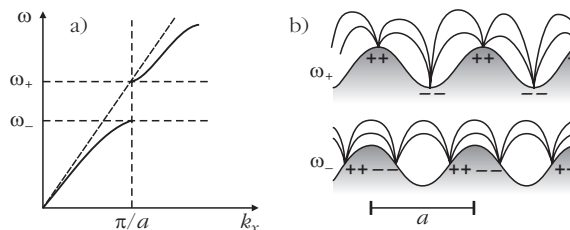
10. ábra. Háromdimenziós fotonikus kristály. A sávszerkezetben tiltott sávok hozhatók létre.

kvantummechanikailag összekapcsolt állapotban van. A két foton mindegyikével felületi plazmonokat keltettek. Ezek újra fénné alakultak vissza, s a keletkezett fotonokat egymással koincidenciába hozták. Azt találták a kísérlet során, hogy abban az esetben, ha a felületi plazmonokon keresztül átalakított fotonok koincidencia tulajdonságait vizsgálják, ugyanazt az eredményt kapják, mint akkor, ha ezt felületi plazmonok nélkül tették volna meg. A kísérlet azt bizonyítja, hogy ez az összekapcsolt állapot a felületi plazmonokon keresztüli fotonkibocsátás esetében is megmarad, vagyis ugyanazt állítja, mint amit a mi kísérleteink is. A felületi plazmonok a nemklasszikus tulajdonságok megőrzőként használhatók. Ezért remény van arra, hogy a kvantuminformatikában, a kvantum-számítástechnikában a felületi plazmonoknak is szerepük lesz.

Fény egy csipen

A félvezető elektronika alapja, hogy alkalmas félvezető anyagokban, mint például a szilíciumban, egy tiltott energiasáv van a vezetési elektronok számára. Tehát van egy olyan energiasáv, amelyben elektron nem tartózkodhat. Felmerül a kérdés, hogy lehetséges-e olyan anyagot létrehozni, amelyben ugyanilyen tiltott sáv keletkezhet a fotonok számára. A válasz pozitív. Az ilyen tulajdonságú anyagot metaanyagnak hívjuk, mert a természetben nem nagyon létezik és *fotonikus kristálynak* nevezzük. Ez egy olyan kristályszerű szerkezet, amelyben a rácsparaméter a fény hullámhosszának nagyságrendjébe esik.

Ezt mutatja a 10. ábra. Tiltott energiasáv létrehozható akár két-, akár háromdimenziós struktúrákban.

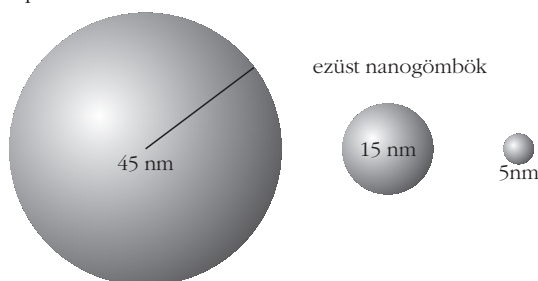


11. ábra. Tiltott sáv rácson gerjesztett felületi plazmonok spektrumában. A diszperziós görbe a félvezetőkéhoz hasonlóan felhasad a Brillouin-zóna határán (a ábra), mivel itt aszimmetrikus (ω_+) és szimmetrikus (ω_-) módus lehetséges, és a kettő energiája eltér (b ábra).

Ezeket a fotonikus kristályokat már ma is széleskörűen alkalmazzák. Amiért azonban mégsem vonzó lehetőség ilyen módon például egy fotoncsipet létrehozni, annak oka pontosan a hullámhosszhatár. A diffrakciós limit miatt ugyanis a fény hullámhosszánál lényegesen kisebb struktúrák ilyen tulajdonságokkal nem valósíthatók meg. Felmerül a kérdés, hogy az általunk eddig vizsgált újfajta fény, vagyis a felületi plazmonok esetén nem lehetséges-e ez, vagyis: létrehozható-e olyan integrált „áramkör” ahol az elektronok szerepét a fotonok veszik át? Kiderül, hogy lehetséges. Ha ugyanis a felületi plazmonokat egy optikai rácson hozzuk létre, akkor található olyan geometria, amelyben a felületi plazmonok diszperziós görbéiben ugyanolyan törés lép föl, mint a félvezetők esetében, vagyis tiltott sáv hozható létre (11. ábra). Létrejön egy olyan energiatartomány, amelyben a felületi plazmonok a felületen nem terjedhetnek. Ez a helyzet pontosan akkor valósul meg, amikor az optikai rács állandója (a) a felületi plazmonok hullámhosszával egyezik meg. Mindebből az is következik, hogy a felületi plazmonok felhasználásával optikai tranzisztort is létrehozhatunk. Létrehozhatunk továbbá hullámvezetőt is, tehát olyan vezetéket, amely a felületi plazmonokat vezeti a fém felületén, mégpedig akár nanométer felbontású struktúrák formájában.

Arra is lehetőségünk van, hogy felületi plazmon lencsével – 12. ábra – ezeket a plazmonokat akár 1 nanométeres méretre összefókuszáljuk. Ha belemennénk a részletekbe, kiderülne, hogy minden olyan optikai elem létrehozható felületi plazmonok segítségével, ami ahhoz szükséges, hogy egy teljesen optikai elven működő – tehát csak fotonokat használó – csipet hozzunk létre. Ezek az elemek már léteznek, és meggyőződésem, hogy 10–15 év múlva az ilyen felületi plazmonok felhasználásával készített csipek az elektronikus csipek

12. ábra. Nanométerű fénygömbök (lyukak) segítségével létrehozható a plazmonokat fókuszáló nanolencse.



versenytársai lehetnek, sőt, le is körözhetik azokat, hiszen a fény lényegesen gyorsabban terjed, mint az áram. Ezért azt is reméljük, hogy nem lesz szükség arra egy információtovábbító rendszerben, hogy egy optikai szálon érkező információt árammá alakítsunk, majd ezt feldolgozva egy elektronikus csip segítségével, az információ továbbviteléhez visszaalakítsuk fénné, melyet optikai szálon továbbítunk. Ez olcsóbbá is teheti az információtechnológiai rendszereket. Véleményem szerint ez a lehetőség potenciálisan egy olyan jelentős paradigmaváltást eredményezhet, mint amikor az elektroncsövekről tranzisztorokra tértünk át. A felületi plazmonok nem-klasszikus tulajdonságai pedig azt a lehetőséget is magukban hordozzák, hogy a kvantuminformáció feldolgozásban ugyancsak ilyen eszközöket használjunk.

Összefoglalásképpen azt mondhatjuk, hogy a felületi plazmonok új típusú fénynek tekinthetők. Ez az új típusú fény olyan potenciális lehetőségeket rejt magában,

amelyek az alkalmazások igen széles spektrumát tehetik lehetővé, kezdve a közelítér-mikroszkópiától a teljesen optikai elven működő integrált „áramkörökig”, a kvantuminformáció feldolgozásban és még egy sor más területen. Mindez nemcsak azért lehetséges, mert a felületi plazmonokra nem érvényes a diffrakciós limit, hanem azért is, mert ezen túl még óriási elektromos térrel is rendelkeznek, több nagyságrenddel nagyobb, mint a gerjesztő fotonok tere. Ez azért áll elő, mert a gerjesztő fotonok energiája a felülethez kötve „kis térre” koncentrálódik. Ebben az óriási térben egy sor fizikai folyamat, például a Raman-szórás, sok nagyságrenddel (egyes esetekben 10^{12} – 10^{15} -szörösen) felerősödik, ami egyetlen molekula Raman-szórásának detektálását is lehetővé teheti. De ez az óriási tér élő szervezetek, például sejtek befolyásolására is alkalmas, ami például az orvosi alkalmazásokban (pl. rákterápia) adhat új eszközöket a kezünkbe. Az új lehetőségek részletezése azonban már túlmutat a jelenlegi írás keretein.

FÉMEK FELÜLETI STRUKTÚRAINAK KVANTUMMECHANIKÁJA

Kollár János
MTA SZFKI

Az anyagok felületét olyan ablaknak tekinthetjük, amelyen keresztül megismerhetjük az anyag belsejének fizikai és kémiai tulajdonságait, az anyag és környezete között lejátszó reakciók mechanizmusát. Egy megfelelően előkészített, adott kémiai összetételű fémfelület gátolhat vagy elősegíthet különböző kémiai reakciókat. Egy megfelelően kialakított kristályos mikroszerkezet lényegesen javíthatja a fémfelületek tribológiai tulajdonságait. Ugyanakkor az elektronikai ipari technológiák hihetetlenül gyors fejlődése, a méretek rohamos csökkenése is egyre inkább nélkülözhetlenné teszi az anyagok felületi tulajdonságainak pontos, kvantummechanikai leírását, az ott zajló folyamatok atomi szintű megértését.

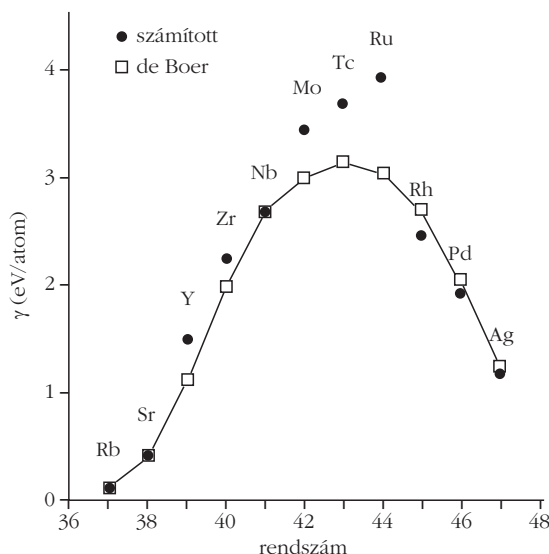
A felületfizikában az olyan alapvető fontosságú fizikai mennyiségek, mint a felületi energia, felületi feszültség, vagy a különböző felületi alakzatok, felületi lépcsők képződési energiája csak nagy bizonytalansággal mérhető. A felületi energia kísérleti értékei például többnyire fémolvadékcseppek felületi feszültségének méréséből, majd $T = 0$ K-re extrapolált értékéből származnak. Az így kapott értékek bizonytalansága meglehetősen nagy, és természetesen csak izotróp kristályokra vonatkoznak. Ezért e mennyiségek pontos értékeinek meghatározásában a kvantummechanikai számítási módszerek szerepe megnő. Az elmúlt években ezek közül kiemelkedő szerepet játszott a *sűrűségfüggő elmélet*, amely a bonyolult, sok atomot tartalmazó rendszerek leírásában szinte egyeduralkodóvá vált.

A sűrűségfüggő elmélet megalapozása *Hohenberg* és *Kohn* nevéhez fűződik [1]. (Az elmélet meg-

alapozásáért Walter Kohn 1998-ban Nobel-díjat kapott.) Lényege, hogy egy külső térben mozgó elektronrendszer alapállapotú energiáját az elektronsűrűség egyértelműen meghatározza. Így az alapállapotú energia az elektronsűrűség funkcionálja (függvénye), amelyre variációs elv érvényesül: a ténylegesen megvalósuló elektronsűrűség az alapállapotú energiafunkcionált minimalizálja. A funkcionál pontos alakját nem ismerjük, de különböző pontosságú közelítéseit igen. A variációs elv alkalmazása a gyakorlati számításokban egy-elektron Schrödinger-egyenletek megoldására vezet, melyekben az elektronok közötti kicserélődési és korrelációs kölcsönhatást leíró, sűrűségfüggő effektív potenciál lép fel. Ez lehetővé teszi az egyenletek önkonzisztens megoldását, mivel az egyenletek megoldása után, az adott számú elektronállapot feltöltésével kapott elektronsűrűségnek meg kell egyeznie az effektív potenciál számításánál használt elektronsűrűséggel. A módszer segítségével meghatározhatjuk a rendszer teljes energiáját az atomok különböző elrendeződése esetén, így a felületi energiát, vagy a felületi feszültséget is.

A felületi energia

Felületi energiának (γ) nevezzük egy adott kristálytani irányban egységnyi felület létrehozásához szükséges többlet-szabadenergiát. Bármely egyensúlyi rendszerre a felületi energia mindig pozitív, hiszen negatív felületi energia spontán felületképződéshez,



1. ábra. 4d sorozatbeli fémek felületi energiái (eV/atom)

az anyag széteséséhez vezetne. Az 1. ábrán példaként összehasonlítjuk a 4d sorozat elemeinek „szoros illeszkedésű” felületeire számított felületi energiákat [2] de Boer és munkatársai mérési eredményeivel [3]. A számított értékek az elemek alapállapotú kristályszerkezetének legszorosabb illeszkedésű felületeire vonatkoznak, míg a kísérleti értékek olvadákcseppek felületi feszültségének $T = 0$ K-re extrapolált, mért értékei. A legtöbb fém esetén igen jó az egyezés a számított és mért értékek között, de molibdén, technécium és ruténium esetén lényeges eltéréseket tapasztalunk. Ennek fő oka, hogy a mérések izotróp anyagra, míg a számítások a kristály egy adott irányú felületére vonatkoznak. Az átmeneti fémek felületi energiái – a kohéziós energiához hasonlóan – jellegzetes, parabolikus rendszámfüggést mutatnak, a sorozat közepe körül maximálisak (*Friedel-parabola*). Ezt a viselkedést az energiasávok kialakulásának közismert fizikai képe alapján érthetjük meg, miszerint a sorozat elején az atomi szintnél alacsonyabb energiájú, „kötő” elektronpályák töltődnek fel, majd a sorozat közepétől kezdődően az atomi szintnél magasabb energiájú, „lazító” pályák. A felületi ener-

gia mintegy ötöde a kohéziós energiának. Ezt a felületi koordinációs szám (legközelebbi szomszédok száma) csökkenésével magyarázhatjuk meg, ami a sávszélesség csökkenéséhez vezet.

A felületi energia anizotrópiája

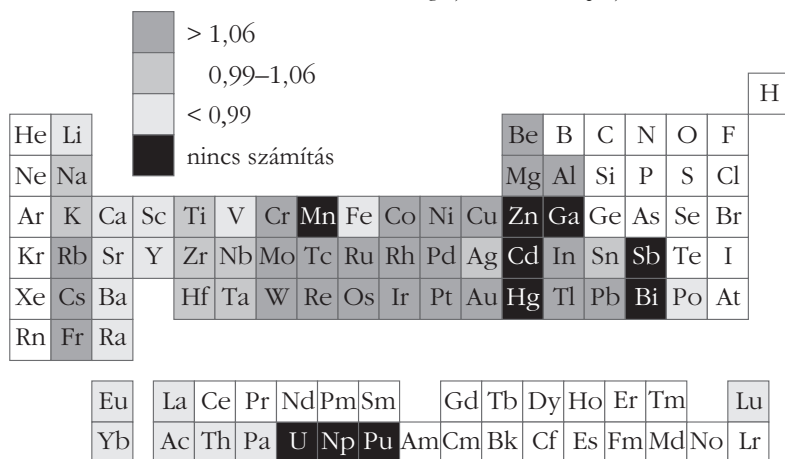
A felületi energia kristályos anyagok esetében irányfüggő. Általában azt várjuk, hogy a legszorosabban pakolt felület (lapcentrált szerkezetnél az (111), tércentrálnál az (110), hexagonális szoros illeszkedésű szerkezetnél pedig a (0001) Miller-indexű felület) a legalacsonyabb energiájú, de ez nincs mindig így. A felületi energia anizotrópiáját jellemezhetjük az alacsony indexű felületek felületi energiáinak hányadosával, így lapcentrált (fcc) esetben a $\gamma_{100}/\gamma_{111}$, tércentrálnál (bcc) a $\gamma_{100}/\gamma_{110}$ mennyiséggel, míg hexagonális szoros illeszkedésű szerkezetnél (hcp) a $\gamma_{10\bar{1}0}/\gamma_{0001}$ mennyiség átlagával. Izotróp esetben a fenti anizotrópia-faktor nyilvánvalóan egységnyi, és értéke annál inkább eltér egytől, minél anizotrópabb a felületi energia.

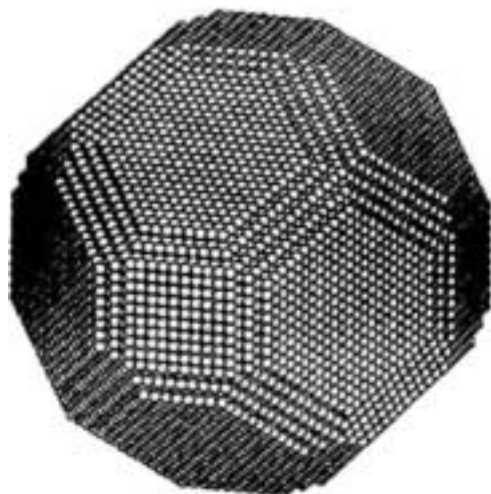
Eredményeinket a periódusos rendszerben található legtöbb fémre a 2. ábrán összegeztük. A fémes kötés természetétől függően három csoportot különböztethetünk meg. Az első csoportba tartoznak azok a fémek, amelyekben az atomok viszonylag távol vannak egymástól és a kötési elektronok nagyrészt az atomok körül helyezkednek el, az intersticiális tartományok járuléka a felületi energiához elhanyagolható. Ebben az esetben az atomonkénti felületi energia jó közelítéssel állandó, és a felületi energiasűrűség (γ) az egységnyi felületen lévő atomok számának csökkenésével csökken. E fémeknél az anizotrópia-faktor kisebb egynél: ide tartoznak a könnyű alkáli, és alkáli földfémek, valamint az átmeneti fém-sorozatok első elemei.

A második csoportban a kötési elektronoknak egy lényeges hányada egyenletesen oszlik el az intersticiális tartományban, itt a felületi energia csak kevésbé függ a felület orientációjától. Ez a viselkedés jellemző a titán- és vanádium-csoport elemekre.

A harmadik csoportba azok a fémek tartoznak, amelyekben a fémes kötés erősen kovalens jellegű, itt a kötési elektronok lényeges hányada halmozódik fel az atomok közötti tartományban. A fémes kötés kovalens jellege abban nyilvánul meg, hogy a felületi energiát első közelítésben az határozza meg, hogy egy adott irányú felület létrehozásához hány legközelebbi szomszéd kötést kell elvágnunk. Az átmeneti fém-sorozatok közepén és végén elhelyezkedő elemek, valamint a p-fémek jellemezhetők ezzel az erős anizotrópiával. A tércentrált szerkezetű vas mágneses alapállapota következtében anomális viselkedést mutat. A mágneses energiajárulék erősen csökkenti az (100) felület felületi energiáját a legszorosabb illeszkedésű (110) felületéhez képest.

2. ábra. Fémek felületi energiájának anizotrópiája





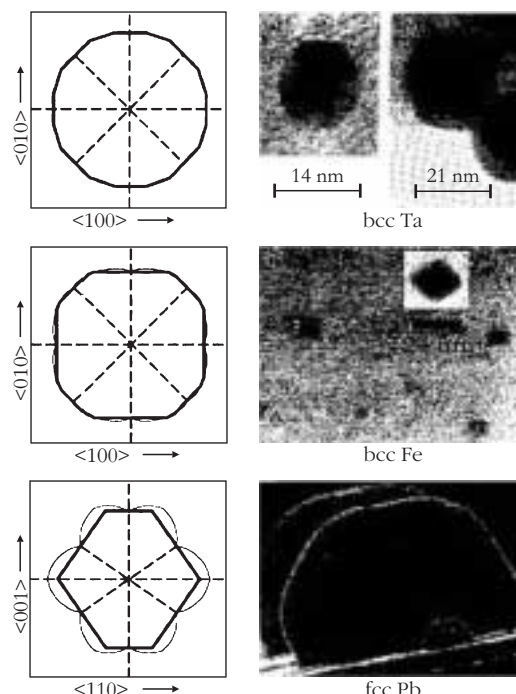
3. ábra. Nb-nanorészecske egyensúlyi alakja

Nanométerű kristályok egyensúlyi alakja

A nanométerű egykristályok egy adott hőmérsékleten olyan egyensúlyi alakot vesznek fel, amely a felületi szabadenergiájukat minimalizálja, ezért $T = 0$ K hőmérsékleten az egykristályok egyensúlyi alakját a nanométerek tartományában a felületi energia $\gamma(n)$ irányfüggése teljes egészében meghatározza. Emiatt gyenge anizotrópiánál az átmeneti fém-sorozatok elején az egyensúlyi alak gömb, míg a sorozatok közepén és végén, valamint a p-fémeknél komplex poliéder.

A felületi energiát minimalizáló egyensúlyi alakot az úgynevezett Wulff-szerkesztéssel [4] határozhatjuk meg, ami feltételezi a $\gamma(n)$ függvény ismeretét. Ennél a geometriai minimalizálási eljárásnál egy adott pont körül felmérjük a felületi energia $\gamma(n)$ értékeit, majd a végpontokban a sugárra merőleges síkokat fektetünk. A síkok burkoló poliédere lesz a felületi energiát minimalizáló egyensúlyi alak. Erre mutatunk példát a 3. ábrán bcc nióbiumra.

A nanométerű fém-részecskéknél a kvantummechanika első elveiből számolt egyensúlyi alakjára mutatunk néhány példát a 4. ábrán. Látható, hogy általában esetén, ahol a felületi energia közel izotróp irányfüggést mutat, a nanorészecske közelítőleg gömb alakú. A jóval erősebb anizotrópiát mutató vas és ólom esetében az egyensúlyi részecskealak metszete négyzet-, illetve hatszög alakú, a megfigyelésekkel jó egyezésben.

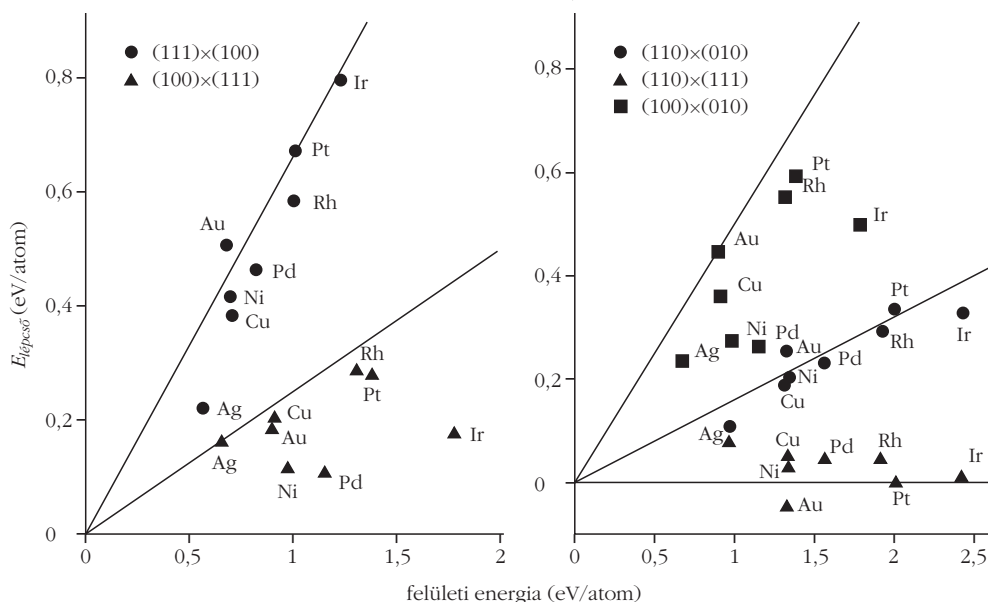


4. ábra. Nanorészecskék egyensúlyi alakja

Felületi lépcsők és szigetek

A fémfelületeken kialakuló geometriai alakzatok közül az egyik leggyakoribb az egy- vagy többatomos felületi lépcső. Az egyatomos felületi lépcsők képződési energiáját a felületi rekonstrukció alapmennyiségének tekinthetjük. Sajnos a lépcsők képződési energiájának közvetlen mérése nem kivitelezhető, és az alacsony hőmérsékleti adatok legtöbb esetben a felületi szabadenergia magas hőmérsékleten mért irányfüggésének $T = 0$ K-re extrapolált értékeiből származnak. Ezért a lépcsők képződési energiájának pontos, kvantummechanikai számítása alapvető fontosságú.

5. ábra. Felületi lépcsők energiája fcc szerkezetre



Egy tökéletes (hkl) Miller-indexű felületen kialakuló ($h'k'l'$) indexű lappal határolt egyatomos lépcsőt az egységnyi hosszúságra jutó β többlet-szabadenergiával, vagy az egy atomra jutó $E_{\text{lépcső}} = \beta d$ képződési energiával jellemezhetjük (d az atomok távolsága a lépcső éle mentén). A lépcsőt a $(hkl) \times (h'k'l')$ szimbólummal jelöljük. A számítások részleteinek ismertetésétől ismét eltekintve, csak az eredményeket mutatjuk be néhány felületi lépcsőre az 5. ábrán lapcentrált szerkezetű, a 6. ábrán tércentrált szerkezetű átmeneti és nemesfém esetében [5]. A lépcsőképződési energiákat a „lépcsőterasz”-nak, azaz a (hkl) indexű felület felületi energiájának függvényében ábrázoltuk. Egy csak legközelebbi szomszédokat tartalmazó kötésmodellben ugyanis a lépcsőképződési energia a felületi energiával egyenesen arányos, az egyenes meredeksége pedig csak a felület geometriájától függ (attól, hogy hány elsőszomszédkötést vágunk el a lépcső létrehozásakor). Legnagyobb képződési energiája annak a lépcsőnek van, ahol a legnagyobb az atomok távolsága a lépcső éle mentén, és a terasz a legszorosabb illeszkedésű felületnek felel meg (lapcentrált köbös esetben az $(111) \times (100)$, tércentrált esetben az $(110) \times (001)$ lépcső). Az 5. ábráról látható, hogy a lépcsőképződési energiák lapcentrált köbös szerkezetnél általában jól követik az egyeneseket, ami azt tükrözi, hogy csupán legközelebbi szomszéd párkölcsönhatással a felület energetikája jól leírható. Nem ez a helyzet tércentrált köbös felületi lépcsők esetén, ahol a második szomszéd kölcsönhatások szerepe megnő, bár itt is világosan megfigyelhető a kapcsolat a lépcsők képződési energiája és a felületi energia között.

A lépcsőképződési energia anizotrópiája meghatározza a felületen képződő szigetek egyensúlyi alakját. A lapcentrált köbös (100) felületen az ábrák alapján az anizotrópiára azt kapjuk, hogy $\beta_{(110) \times (010)} / \beta_{(100) \times (111)} =$

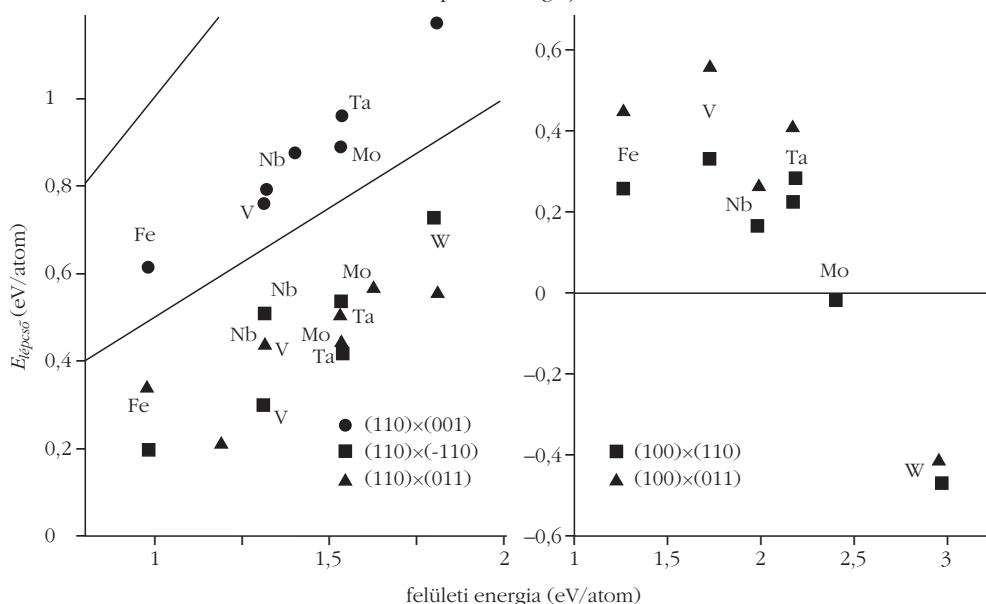
1,1–1,9. A kétdimenziós Wulff-szerkesztés segítségével ennek alapján azt várjuk, hogy a képződő szigetek négyzetesek lesznek, az (110) iránnyal párhuzamos oldalakkal (ha az arány $2^{1/2}$ -nél nagyobb, az egyensúlyi alak szabályos négyzet, különben nyolcszög). Ezt alátámasztják a kísérleti megfigyelések, melyek azt mutatják, hogy az Ag (100) felületen nagy valószínűséggel $(100) \times (111)$ lépcsők képződése figyelhető meg [6], Ir (100) esetén pedig a szigetek megfigyelt egyensúlyi alakja négyzet (110) irányú oldalakkal [7]. Az fcc (110) felületen a legtöbb átmeneti fémre $\beta_{(110) \times (010)} \approx \beta_{(110) \times (111)}$ és $\beta_{(110) \times (111)} / \beta_{(110) \times (010)} \approx 1$. Ezért azt várjuk, hogy az esetlegesen képződő szigetek az (110) iránnyal párhuzamos, hosszú élekkel rendelkeznek.

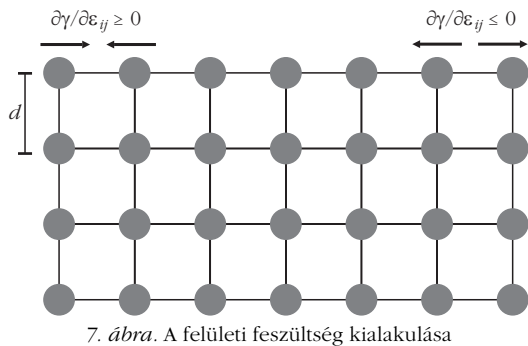
A bcc (110) szerkezetnél a lépcsőképződési energia anizotrópiájára a két fő irányban azt találtuk, hogy a $\beta_{(110) \times (001)} / \beta_{(110) \times (110)}$ arány 1,1 és 1,7 közé esik a vas kivételével, ahol ez az arány 2,2. Ezért valószínűtlen, hogy vas (110) felületen $(110) \times (001)$ típusú lépcsők képződjenek. A kétdimenziós Wulff-szerkesztés alapján az jósolható, hogy az (110) felületen V, Nb és Ta esetében kissé deformált nyolcszög alakú szigetek képződhetnek. A bcc (100) felületeken – Mo és W kivételével – nyolcszög alakú szigetek képződése várható.

A felületi és lépcsőképződési energiák alapján következtethetünk egyes felületek stabilitására, illetve instabilitására, rekonstrukciójára is. Az fcc (110) és bcc (100) felületeken az atomok viszonylag ritkán helyezkednek el. Ha ezeken a felületeken hozunk létre olyan lépcsőket, ahol a legkisebb az atomok távolsága az élek mentén (mint az fcc $(110) \times (111)$, vagy a bcc $(100) \times (110)$ és $(100) \times (011)$ lépcsőknél), akkor a lépcsők létrehozásához nem vágunk el többlet elsőszomszédkötéseket, azaz ezeknek az energiája elsőszomszéd-közelítésben nulla. Ez látható az 5. és 6. ábrákon.

Ezekben az esetekben a lépcsőképződési energiák általában kicsik, és értéküket a második, harmad stb. kölcsönhatások szabják meg. Az ábrákról látható, hogy Pt és Au, valamint a Mo és W esetében a lépcsőképződési energia negatív, ami a felület instabilitására, spontán felületi rekonstrukcióra utal. Ez összhangban van a Pt és Au (110) felületén megfigyelt „sorhiány” rekonstrukcióval [8] (missing row reconstruction), vagy a W (100) felületén megfigyelt 2×2 -es felületi rekonstrukcióval [9].

6. ábra. Felületi lépcsők energiája bcc szerkezetre





7. ábra. A felületi feszültség kialakulása

Felületi feszültség és relaxáció

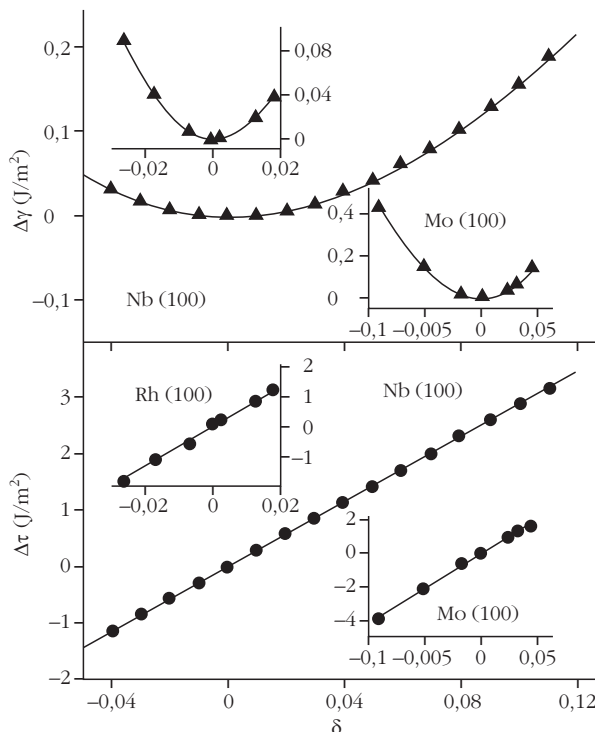
Az előzőekben láttuk, hogy a felületi alakzatok képződési energiáinak kvantummechanikai számítása alapján értékes információk nyerhetők a fémfelület morfológiájáról. Felmerül a kérdés, hogy van-e olyan fizikai mennyiség, amelynek értékéből következtetni lehet egy esetleges felületi rekonstrukció bekövetkezésére. Ez a fizikai mennyiség a felületi feszültség, ami a fémfelületen akkor keletkezik, ha a felületi réteg az anyag belsejétől eltérő rácsállandót preferál. Általában ez a helyzet valósul meg, hiszen az elektronok sűrűségeloszlása a felületen és az anyag belsejében különböző. A felületi feszültség keletkezését a 7. ábrán szemléltetjük. Előjelét az határozza meg, hogy a γ felületi energia a felület ϵ_{ij} deformációja során hogyan változik. Ha a felületi energia nyújtásra nő, akkor nyújtó felületi feszültségről, ha csökken, akkor összenyomó felületi feszültségről beszélünk, amit az anyag belsejének geometriája kényszerít rá a felületre. Ha túl nagy a feszültség, akkor a felület rekonstruálódhat.

Most csak olyan esetekről beszélünk, amikor a felületi feszültség nem éri el a rekonstrukcióhoz szükséges mértéket, és a felület ideális marad. Ekkor a felületi geometria megengedett változása a felület relaxációja során csak a felületi rétegtávolság relaxációja. Az ábrán d -vel jelöltük a felületi rétegtávolságot, ami általában eltérhet az anyag belsejében mért rétegtávolságtól. A felületi feszültséget és energiát a Shuttleworth-egyenlet kapcsolja össze:

$$\tau_{ij} = \frac{1}{A} \frac{\delta A \gamma}{\delta \epsilon_{ij}} = \gamma \delta_{ij} + \frac{\delta \gamma}{\delta \epsilon_{ij}}.$$

Folyadékoknál az atomok szabadon átrendeződhetnek a felület deformációja (nyújtása, összenyomása) során, így a felületi energia nem változik, azaz az utolsó tag nulla. Ezért ebben az esetben a felületi energia és feszültség egyenlő, ami gyakran azt eredményezi, hogy a két mennyiséget összekeverik. Szilárd felületeknél a két mennyiség különböző, a felület relaxációja során a rétegtávolságtól való függésük is teljesen eltérő. Erre mutatunk néhány példát a 8. ábrán a 4d sorozatból.

Az ábráról a Nb, Rh és Mo példáján látható, hogy míg a felületi energia kvadratikusan függ a $\delta = \Delta d/d$



8. ábra. Felületi energia és feszültség a rétegtávolság függvényében

relatív rétegtávolságtól és a vizsgált tartományban nagyon keveset változik (nyilvánvalóan minimumot mutat az egyensúlyi értéknél), addig a felületi feszültség változása több, mint egy nagyságrenddel nagyobb, és jó közelítéssel lineárisnak tekinthető. A felületi feszültség értékének számításánál a felületi réteg egyensúlyi relaxációjának pontos meghatározása ezért rendkívül fontos.

Az elmondottak alapján talán az olvasó számára is világossá vált a kvantummechanikai számítások fontossága a felületfizika „vizsgálati módszerei” között. E számítások szerepe egyre nő a számítástechnikai lehetőségek növekedésével. Jelentőségük abban áll, hogy segítségükkel képesek vagyunk „ideális” felületeket vizsgálni, és ezekre meghatározni az alapmennyiségeket. A kísérletekben természetesen ideális felület nem létezik, legfeljebb egyre inkább törekedhetünk az ideális állapot megközelítésére. Ugyanakkor egy realisztikusabb, komplex felület leírása további kihívást jelent az elmélet számára.

Irodalom

1. P. Hohenberg, W. Kohn, *Physical Review* 136 (1964) B864; W. Kohn, L.J. Sham, *Physical Review* 140 (1965) 1133
2. L. Vitos, A.V. Ruban, H.L. Skriver, J. Kollár, *Surface Science* 411 (1998) 186
3. F.R. de Boer, R. Boom, W.C.M. Mattens, A.R. Miedema, A.K. Niessen, *Cobalt in Metals*. North-Holland, Amsterdam (1988)
4. G. Wulff, *Zeitschrift für Kristallographie* 34 (1901) 449
5. L. Vitos, H.L. Skriver, J. Kollár, *Surface Science* 425 (1999) 212
6. Ch. Teichert, Ch. Ammer, M. Klaua, *Physica Status Solidi* 146a (1994) 223
7. Chonglin Chen, Tien T. Tsong, *Surface Science* 336 (1995) L735
8. H. Hornis, J.R. West, E.H. Conrad, R. Ellialtıoglu, *Physical Review B* 47(1993) 13055
9. R.A. Barker, P.J. Estrup, F. Jona, P.M. Marcus, *Solid State Communication* 25 (1978) 375

SZIMMETRIÁK ÉS SÉRTÉSÜK A RÉSZECSKÉK VILÁGÁBAN

– A PARITÁSSÉRTÉS 50 ÉVE

Horváth Dezső

MTA KFKI RMKI, Budapest és ATOMKI, Debrecen

Tükrözési szimmetria és paritás

Ahogy egy korábbi cikkemben [1] leírtam, a részecskefizikában a szimmetriák mindenütt jelen vannak: a kölcsönhatások tulajdonságaiban, a megmaradási törvények háttérében, az összetett részecskék szerkezetében. A szimmetriasértések szerepe ugyanilyen jelentős: a részecskefizika Standard Modellje szerint a részecskék az elektromos kölcsönhatás szimmetriájának „spontán sérülése” következtében nyernek tömeget, és ennek a „spontán sérülési” mechanizmusnak a mellékterméke a részecskefizika talán legmisztikusabb objektuma, a Higgs-bozon.¹ Ezt a hipotetikus részecskét még egyetlen kísérletben sem sikerült „láthatóvá” tenni, de létezése elengedhetetlenül fontos az elmélet szempontjából: lehetővé teszi a mérhető folyamatok valószínűségeinek közelítő, perturbatív, számítását (hacsak nem bizonyul túlságosan „nehéznek”).

A részecskefizika három alapvető tükrözési szimmetriája, a töltés, a tér és az idő tükrözésével kapcsolatos. A P tértükrözés ellenkezőjére fordítja a térkoordináták előjelét, ami annak felel meg, mintha a rendszert a szokásos jobbkezes koordinátarendszer helyett balkezesben írnánk le. A T időtükrözés az időkoordinátát fordítja ellenkezőjére. A C töltéstükrözés részecskéből antirészecskét csinál: valamennyi töltés típusú kvantumszám előjelét megfordítja.

Egy függvény páros, ha változójának előjelét megfordítva, tükrözve, értéke nem változik, páratlan, ha azonos abszolút érték mellett előjelet vált. Páros függvény, például, $f(x) = A \cos x$ és páratlan $f(x) = A \sin x$.

A részecskék állapotfüggvényeinek tanulmányozásánál kiderült, hogy a párosság vagy *paritás* jellemző tulajdonságuk, amely az ütközési és bomlási reakciók során általában megőrződik. Az ℓ mellékkvantumszámra gerjesztett hidrogénállapot hullámfüggvénye, például, a tértükrözés hatására változatlan abszolút érték mellett egy $(-1)^\ell$ szorzót kap, azaz a paritása $(-1)^\ell$. Mivel a legegyszerűbb $E1$ fotonátmenet $\Delta\ell = 1$ változást jelent, a fotonhoz a paritás megmaradását feltételezve a $P_\gamma = -1$ negatív paritás rendelhető. A többi részecskének is van saját paritása, a fermionok jellegzetessége, hogy részecske és antirészecske pari-

tása ellentétes előjelű. Sok-sok megfigyelésből leszűrve a tapasztalatot a paritást megmaradó fizikai mennyiségként fogadták el.

Mivel összetett rendszerekben az alkotórészek paritáisi összeszorzódnak, a kvark + anti-kvark kötött állapotként leírható mezonok alapállapotban (amikor a kvarkok egymáshoz képesti mozgásának impulzusmomentuma zérus) negatív paritással rendelkeznek; az esetleges L relatív impulzusmomentum, a hidrogénatomhoz hasonlóan, a kötött állapot saját-impulzusmomentumához $(-1)^L$ szorzóval járul.

A fizika jelenlegi állása szerint a három tükrözés együttes alkalmazása nem változtatja meg egy fizikai rendszer mérhető tulajdonságait, azaz egy szabad antirészecske matematikailag úgy kezelhető, mint egy térben és időben visszafelé mozgó részecske. Az elektron és antirészecskéje, a pozitron kétfotonos annihilációját úgy írjuk le, mintha egy elektron megjelenne, kibocsátana két fotont, majd térben és időben kihátrálna a képből. A CPT -invariancia a térelmélet egyik alaptétele, sértéséhez olyan alapvető fizikai feltevésekről kellene lemondanunk, mint a Lorentz-invariancia vagy a kauzalitás.

A paritássértés felfedezése

A paritássértés felfedezése a τ - θ paradoxonnak köszönhető. Megfigyeltek két részecskét, amelyek valamennyi tulajdonsága azonos volt a paritásuk kivételével, a τ^+ -mezon ugyanis gyenge kölcsönhatásban két π -mezonra (pionra), amíg a θ^+ három pionra bomlott. Figyelembe véve a pion negatív paritását, ez a τ^+ -nak pozitív, a θ^+ -nak negatív paritást adott.

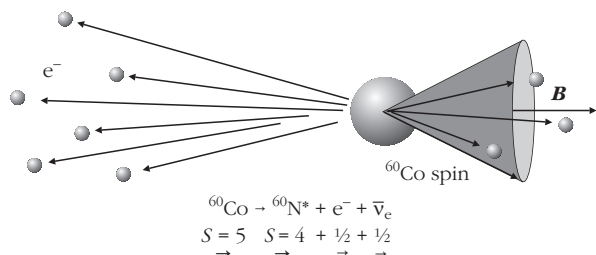
Tsung-Dao Lee és Chen-Ning Yang (1. ábra) a fenti kérdés megoldását keresve 50 évvel ezelőtt megvizsgálta [2] a paritásmegmaradás kísérleti bizonyítékait és megállapította, hogy valamennyi elektromágneses jelenségeken alapul. Feltételezték, hogy a τ^+ és a θ^+ ugyanaz a részecske (azt ma K^+ mezonnak hívjuk), viszont a gyenge kölcsönhatás sérti a paritás-megmaradást, és javasoltak néhány kísérletet a pari-

1. ábra. Tsung-Dao Lee, Chen-Ning Yang és Chien-Shiung Wu



Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat 2006. május 27-i közgyűlésén elhangzott előadás alapján.

¹ Elemi részecskéink fermionok és bozonok, amelyeket $J = S\hbar$ saját-impulzusmomentumuk (S spinjük) különbözteti meg: az összetett részecskéket (mint például a proton, a neutron vagy a pion) alkotó kvarkok, valamint a leptonok, (mint az elektron, a müon, a neutrínók) $S = \frac{1}{2}$ spinű fermionok. A bozonok spinje egész, ilyenek a fermionok közötti kölcsönhatást közvetítő $S = 1$ spinű részecskék (például a foton). A Higgs-bozon spinje zérus, $S = 0$.



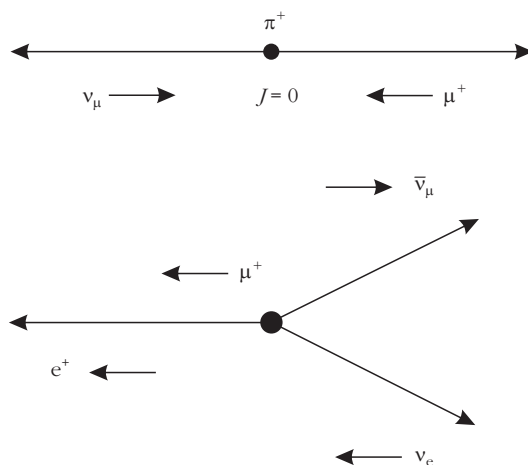
2. ábra. C.S. Wu kísérlete: A mágneses térben orientált ^{60}Co izotóp béta-bomlásánál az elektronok túlnyomórészt a mágneses térrel ellenkező irányban lépnek ki, ami a tükrösszimmetria, azaz adott esetben a paritásmegmaradás sértését jelenti.

tássértés ellenőrzésére. A kísérleti ellenőrzés azonnal megkezdődött, és igazolta a paritásértést; Lee és Yang még 1957-ben megkapta a Nobel-díjat. (Elfilozofálhatunk azon, hány cikk kell a Nobel-díjhoz: általában egy, ha az elég jó.)

Az első kísérlet *Chien-Shiung Wu* asszony (1. ábra) nevéhez fűződik [3]. ^{60}Co izotópot mágneses térbe helyezve lehűtöttek csaknem az abszolút zérus hőmérsékletre (0,1 K alá). A ^{60}Co mag instabil, béta-bomlással a ^{60}Ni izotóp gerjesztett állapotává alakul, azaz egyik neutronja protonra, elektronra és antineutrínóra bomlik: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$. Mivel a ^{60}Co $S = 5$, a ^{60}Ni $S = 4$, a kirepülő elektron és antineutrínó pedig $S = 1/2$ spinnel rendelkezik, a megmaradási törvények előírják, hogy a végállapotú részecskék impulzusmomentuma a ^{60}Co -é irányába mutasson (2. ábra). A mágneses tér a ^{60}Co impulzusmomentumát beállítja, a hűtés pedig a rezgését minimalizálja, a kirepülő elektron impulzusmomentuma (spinje) tehát a mágneses tér irányába fog mutatni. A neutrínó spinje, elhanyagolhatóan kicsi tömege miatt, párhuzamos az impulzusával. A paritásmegmaradás itt tükrösszimmetriát feltételez, akkor tehát az elektronok valamennyi irányban egyforma valószínűséggel repülnek, annak sértése viszont valamelyik irányt előnyben fogja részesíteni.

Az eredmény megdöbbentette a fizikusvilágot: az elektronok túlnyomórészt a mágneses térrel ellenkező irányban léptek ki (2. ábra), ami azt jelentette, hogy a gyenge kölcsönhatás maximálisan sérti a tükrösszimmetriát és a paritás megmaradását: a mozgásiránnyal szemben (balra) polarizált részecskéket és a mozgásirányban (jobbra) polarizált antirészecskéket részesíti előnyben. *Wolfgang Pauli* az eredmény hallatán kijelentette: *Nem tudom elbírni, hogy Isten balkezes!*

Az ugyancsak a Columbia-egyetemen dolgozó *Leon Lederman* csoportja, hallván a Wu-kísérlet első eredményeiről, sokkal egyszerűbb mérésbe kezdett [4]. Pozitív pionokat állítottak meg szénben. A pionok gyenge kölcsönhatásban elbomlanak müonok ki-



4. ábra. A μSR -módszer alapja: a pozitív pion polarizált müonra bomlik; a müon bomlásánál keletkező pozitron elsősorban a müon polarizációs irányában lép ki, és precessziós frekvenciája a mágneses tér erősségével arányos.

bocsátásával, $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$. A müonok polarizáltan keletkeznek: mivel a pion spinje zérus és a keletkező leptonoké $1/2$, az impulzusmegmaradás miatt a müon és a neutrínó spinje egymással szemben fog állni. A müon bomlása is gyenge kölcsönhatás, $\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu$, és ha nincs tükrösszimmetria, a pozitronok a müon polarizációs irányában fognak kilépni. A müonok mágneses térben precesszálnak, azaz a spinjük kis mágnesként forog, a pozitronokat tehát a tükrösszimmetria sértése esetén a rögzített helyzetű detektor időben változó intenzitással észleli. Amint a 3. ábra mutatja, a kilépő pozitronok valóban a müon spinjének irányát követik, a paritás tehát nem marad meg ebben az esetben sem.

A Lederman-kísérlet néhány nap alatt igazolta a paritásértés elméletét, a szerzők azonban nem közölték eredményüket addig, amíg a Wu-csoport is el nem készült. Így a két cikk, [3] és [4] a *Physical Review* ugyanazon számában, egymást követve jelent meg; Wuék Lee-nek és Yangnak mondtak köszönetet az elméletért, míg Ledermanék Lee-nek az elmélet elmagyarázásáért és Wunak előzetes eredménye közléséért. Nem sokkal később *Telegdi Bálint* kísérlete is igazolta a gyenge kölcsönhatás paritásértését.

3. ábra. Lederman kísérlete [4]: A szénben lefékeződő pionok bomlásánál keletkező müonok lassulnak és a mágneses térben precesszáva időben változó irányban bocsátják ki a bomlási pozitronokat, ami a tükrözési szimmetria és paritásmegmaradás sértését jelenti.

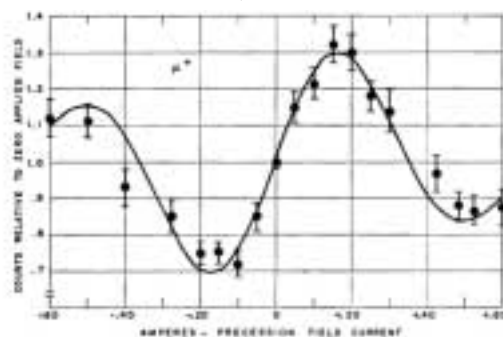
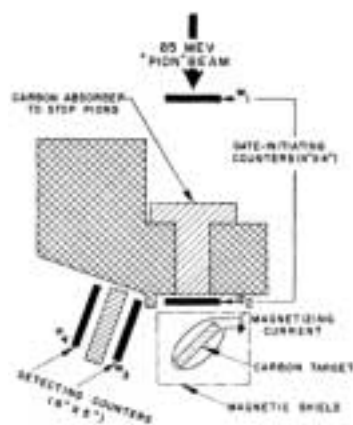
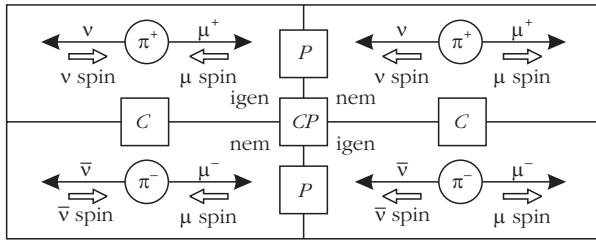


Fig. 2. Variation of gated 3-4 counting rate with magnetizing current. The solid curve is computed from an assumed electron angular distribution $1 - \frac{1}{2} \cos \theta$, with counter and gate-width resolution folded in.



5. ábra. A pionbomlás tükrözési szimmetriája: a gyenge kölcsönhatás sajátállapotait – balra polarizált neutrínó és *jobbkezes* antineutrínó – a CP -tükrözési szimmetria kapcsolja össze, a töltés- és paritás-szimmetria önmagában nem teljesül.

A Lederman-kísérlet messzemenően túlmutatott a paritássértés igazolásán: nemcsak sikerült megmérniük a müon mágneses momentumát, de alapjául szolgált a ma már széles körben elterjedt szilárdtestfizikai-kémiai vizsgálati módszernek, a μ SR-nek. A rövidítés jelentése hármas: müonspin-rezonancia, -rotáció és -relaxáció. A módszer elve az, hogy a polarizált müonok precessziós frekvenciája,

$$\omega = \frac{eB}{m_\mu c},$$

a müon helyén méri a B mágneses teret (rotáció). Ez jellegzetes értékeket vehet fel bizonyos kitüntetett pontokban, például rácshibákban vagy kémiai gyökökkel kötésben (rezonancia). A müon depolarizációs ideje (relaxáció) is jellemzi a közeg mágneses tulajdonságait.

A CP -sértés felfedezése

Mint korábban említettem, a paritássértés felfedezése megrázta a fizikusközösséget, és arra indította, hogy olyan, addig abszolútnak tekintett szimmetriát is ellenőrizzen, mint a töltés és a tér együttes tükrözésével szembeni viselkedést kifejező CP -invariancia. A CP -tükrözés hatását az 5. ábra illusztrálja: a pozitív és negatív pion lehetséges bomlásai közül a gyenge kölcsönhatás paritássértő volta csak azokat engedi meg, amelyekben balra polarizált neutrínó és jobbra polarizált antineutrínó keletkezik; ezeket az állapotokat a CP -szimmetria kapcsolja össze. Vegyük észre, hogy a müonok polarizációja ennek ellentmond: az impulzusmomentum megmaradása azt diktálja, hogy a két keletkező fermion spinje ellenkező irányba mutasson, de a (csaknem) zérus tömegű neutrínóé csak a mozgás egyenesébe eshet. A paritássértés maximális volta vezet tiszta végállapotokra.

A τ - θ paradoxon tehát megoldódott, a két részecske azonosnak bizonyult és K -mezon (kaon) lett a neve. Négyféle állapota van: K^+ , K^- , K^0 és anti- K^0 ($\bar{K}^0$). Az elektromosan semleges K^0 , $\bar{K}^0$ részecskék egyedülálló lehetőséget kínál-

nak a CP -szimmetria megmaradásának ellenőrzésére. Ha igaz a CP -szimmetria, akkor pozitív(negatív) CP -sajátállapot pozitív(negatív) CP -sajátállapotba bomlik. A K^0 és $\bar{K}^0$ részecskék egyike sem CP -sajátállapot, $CPK^0 = \bar{K}^0$. (A CP -tükrözés itt egy a jelen cikk témáján kívül eső, egyedül az erős kölcsönhatás által „tiszteltben tartott” kvantumszám, a „ritkaság” előjelét változtatja az ellenkezőjére.) CP -sajátállapotok a kettő kombinációi lesznek:

$$K_1^0 = \frac{1}{\sqrt{2}} (K^0 + \bar{K}^0); \quad K_2^0 = \frac{1}{\sqrt{2}} (K^0 - \bar{K}^0).$$

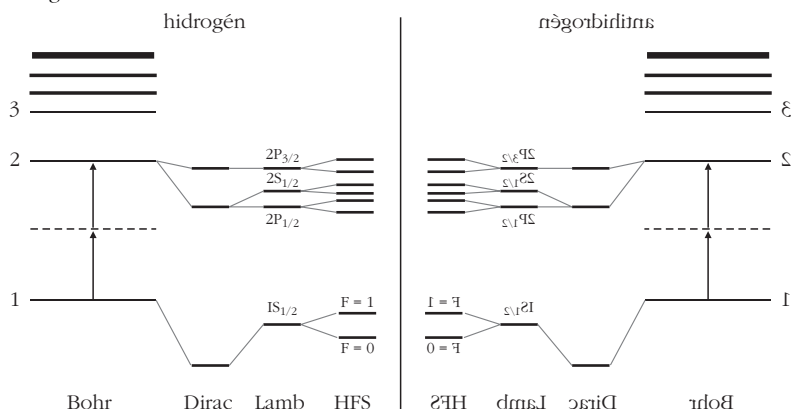
A CP -tükrözés hatására K_2 előjelet vált, míg K_1 nem, tehát K_1 CP -pozitív, K_2 pedig CP -negatív állapot.

A K -mezonok gyenge bomlása pionokat eredményez. Mivel a pion CP -negatív, a K_1 kettő, a K_2 három pionra tud bomlani (egy piont az impulzusmegmaradás tilt). A háromrészecskés bomlás valószínűsége sokkal kisebb, ezért a K_2 élettartama csaknem 3 nagyságrenddel hosszabb, mint a K_1 -é. Ha tehát semleges kaonokat keltünk, és elég sokáig várunk (például hosszú nyalábvezetékben röptetve), a rövid élettartamú K_1 elbomlik, és csak a hosszú élettartamú K_2 marad meg a részecskenyalábban. Christenson, Cronin, Fitch és Turlay 1964-ben kimutatták [5], hogy az így nyert tiszta K_2 is tud – ha nagyon ritkán is – két pionra bomlani, ami azt jelenti, hogy a gyenge kölcsönhatás a CP -szimmetriát is sérti, nemcsak a P tükrözési szimmetriát, bár a paritássértéssel ellentétben a CP -sértés igen gyenge. Ennek az igen kicsi effektusnak a kimutatásáért Cronin és Fitch is Nobel-díjat kapott, igaz, csak 1980-ban.

A CPT -szimmetria ellenőrzése

Senki sem kételkedik komolyan a CPT -invariancia érvényességében, hiszen az elméleti fizika egyik alaptételéről van szó. Ugyanakkor a paritás- és a CP -sértés felfedezése szinte kötelezővé teszi valamennyi szimmetriatörvényünk lehető legpontosabb kísérleti

6. ábra. Hidrogén és antihidrogén spektruma. A $2S$ – $1S$ átmenet különösen alkalmas a CPT -invariancia ellenőrzésére, mivel csak két fotonnal gerjeszthető, ezért hosszú az élettartama, keskeny a vonala, és egymással szemben haladó fotonok esetén a hőmozgásból eredő vonalszélesedés is csökkenthető.



ellenőrzését. Kézenfekvő kísérlet részecske és antirészecske tulajdonságainak összehasonlítása. A *CPT*-szimmetria eddigi legpontosabb ellenőrzése a semleges kaon és antikaon tömegének mérése: relatív különbségük 10^{-18} -nál kisebbnek adódott. Igen pontosak korunk lézerspektroszkópiai mérései (*J.R. Hall* és *T. Hänsch* ezért kapott 2005-ben Nobel-díjat), így a hidrogén és antihidrogén spektrumának összehasonlítása is igen ígéretes (6. ábra).

A CERN antiproton-lassító berendezése a *CPT*-invariancia kísérleti ellenőrzésére épült, és jelenleg három kutatócsoport is (ALPHA, ASACUSA és ATRAP) antihidrogén-spektroszkópia előkészítésével foglalkozik. A japán-osztrák–magyar ASACUSA emellett antiprotonokat fogat be atomi pályákra, és lézerspektroszkópia segítségével tanulmányozza az antiproton átmeneteit. Ebből is igen precíz összehasonlításra nyílik lehetőség az antiproton és a proton tömege és töltése között.

Elveszett szimmetriák?

Amint láttuk, a *CPT*-szimmetria alapvető, abszolút és a fizika jelenlegi állása szerint nem sérül. Láttuk, hogy a gyenge kölcsönhatás az alapvető tükrözési szimmetriák közül kettőt is sért, a paritás-szimmetriát maximálisan, a *CP*-invarianciát viszont csak parányit.

A részecskefizika mai elmélete, a *Standard Modell* a kölcsönhatásokat bizonyos szimmetriák eleve feltételezéséből származtatja (amelyeket aztán, mint említettük, mégis sérteni kell). Kimagasló sikere ellenére, hiszen az összes máig rendelkezésre álló részecskefizikai mérési adatot kitűnően leírja, komoly nehézségekkel küszködik. Nem tudja magába integrálni a gravitációs kölcsönhatást, nem ad számot a Világegyetem tömegének jelentős részét kitevő, rejtélyes sötét anyagról, és nem magyarázza világunk furcsa aszimmetriáit: miért nincsenek antianyag-galaxisok, és a gyenge kölcsönhatás miért éppen a balra polarizált részecskéket kedveli.

A fenti problémákat talán megoldja a *szuperszimmetria* elmélete, amely feltételezi, hogy minden fermionnak és minden bozonnak létezik azonos tulajdonságokkal rendelkező párja a másik csoportban, tehát például az elektronnak ($S = 1/2$) van egy hasonló tömegű és töltésű $S = 0$ spinű partner részecskéje. Ez a szimmetria alacsony energián biztosan sérül, hiszen ezeket a részecskéket hiába kerestük az eddigi gyorsító kísérletekben, nem sikerült megfigyelnünk őket. Ha léteznek, a tömegük a hidrogénatoménak legalább százszorosa. Maga a modell viszont rendkívül vonzó, mert pontos számításokat tesz lehetővé, nem mond ellent az eddigi megfigyeléseknek és megoldja a *Standard Modell* – legalábbis, bizonyos – problémáit. A sötét anyag, például, magyarázható a legkönnyebb szuperszimmetrikus részecske létezésével. A modell szerint ugyanis nagyenergiájú részecske-ütközésekben keletkezhetnek szuperszimmetrikus részecske–antirészecske párok, de azok, miután szétrepültek, a meg-

maradási törvények miatt csak újabb szuperszimmetrikus részecske kibocsátásával tudnak bomlani. Így a legkönnyebb ilyen részecske stabil lesz, de elektromosan semleges lévén, nem észlelhető, csak a gravitációs hatásán keresztül.

Befejezésül idézem a Nobel-díjas *Frank Wilczek* igen mély megfigyelését *Elveszett szimmetriák nyomában* című cikkéből, amely a *Nature* a fizika évének szentelt számában jelent meg [6]: „A fizika alapvető egyenletei több szimmetriával rendelkeznek, mint az aktuális fizikai világ.” Valóban, láttunk több szimmetriát, amely segít a matematikai formalizmus felépítésében, de sérül: a térbeli tükrözését és a *CP*-szimmetriát sérti a gyenge kölcsönhatás, a Higgs-mechanizmus spontán szimmetriasértése segít a tömegképződésben és az elektromos és gyenge kölcsönhatás egyesítésében, az alacsony energián nyilvánvalóan sérülő szuperszimmetria pedig segít a *Standard Modell* elméleti nehézségeinek megoldásában.



A szerző hálásan köszöni *Tóth Kálmán* segítő tanácsait a szimmetriák tárgyalásával kapcsolatban. A témához kapcsolódó kutatásokat az OTKA T042864 és T046095 és az EU FP6 509252 (RIPNP-GRID) és 031688 (EGEE2) jelű pályázatai támogatják.

Irodalom

1. Horváth D., Szimmetriák az elemi részecskék világában, *Fizikai Szemle* 53/4 (2003) 122–127
2. T.-D. Lee, C.-N. Yang, Question of Parity Conservation in Weak Interactions, *Physical Review* 104 (1956) 254–258
3. C.S. Wu és társai, Experimental Test of Parity Conservation in Beta Decay, *Physical Review* 105 (1957) 1413–1414
4. R.L. Garwin, L.M. Lederman, M. Weinrich, Observations of the Failure of Conservation of Parity and Charge Conjugation in Meson Decays: the Magnetic Moment of the Free Muon, *Physical Review* 105 (1957) 1415–1417
5. J.H. Christensen, J. Cronin, V. Fitch, R. Turlay, Evidence for the 2π Decay of the K_2^0 Meson, *Physical Review Letters* 13 (1964) 138–140
6. F. Wilczek, In search of symmetry lost, *Nature* 433 (2005) 239



A FIZIKUSOK TOVATÚNÓ SZENT GRÁLJA: A »VILÁGKÉPLET«

Balázs Béla Árpád
ELTE, Csillagászati Tanszék

Az ókori kultúrnépek világképe geocentrikus volt. A babilóniaiak, egyiptomiak, kínaiak, indiaiak, maják mind úgy gondolták, hogy Földünk helyezkedik el a világ középpontjában. A szamoszi *Arisztarkhosz* (i. e. 310–230) volt az első, aki geometriai megfontolások alapján rájött arra, hogy a Nap sokkal nagyobb a Földnél, és életet adó csillagunkat tette az Univerzum középpontjába. Rájött arra is, hogy bár bolygónk a Nap körül kering, a csillagok szükségszerű parallaktikus elmozdulása azok nagy távolsága miatt szabad szemmel nem észlelhető. A geocentrikus nézeteket valló *Platón* és *Arisztotelész* tekintélye azonban túl nagy volt ahhoz, hogy Arisztarkhosz felismerését elfogadják. A zseniális tudós saját korában csak kevés követőre talált, és „eretnek” nézetei miatt még üldöztetéseknek is ki volt téve.

Tizennyolc évszázaddal később közel hasonló sors várt volna *Nicolaus Copernicus* (1473–1543) lengyel kanonokra, aki *Kommentár az égítestek elrendezéséről és mozgásairól szóló elméletekhez* című korszakalkotó művét csak élete végén publikálta, hiszen heliocentrikus rendszere még abban az időben is eretnekiségnek számított!

Bolygónk (és ezzel az emberiség kitüntetett helyének) „detronizálása” azután – kisebb-nagyobb visszalépésekkel – tovább folytatódott. Kiderült, hogy Napunk csak a Tejútrendszer szerény csillaga, hogy ez a rendszer csak galaxisok milliárdjainak egyike, és talán Univerzumunk sem egyedüli, hanem egy mindent felölelő Multiverzum (másként Megaverzum) egyszerű része.

Az antropikus elv

Ismeretes, hogy a Föld kozmikus helyének kitüntetett-ségét tagadó *kopernikuszi elv* túlhajtásával szembeni reakcióként vezette be a múlt század hetvenes éveinek elején *Brandon Carter* az *antropikus elvet*, amely

- erős formájában azt mondja ki, hogy „az Univerzumnak egy bizonyos stádiumban alkalmasnak kell lennie megfigyelők kialakulására”;

- gyenge változata viszont pusztán a következőt deklarálja: „figyelembe kell vennünk azt a tényt, hogy az Univerzumban elfoglalt helyünk szükségképpen kitüntetett abból a szempontból, hogy összeegyeztethetőnek kell lennie megfigyelőként való létezésünkkel”.

Jelenlegi ismereteink szerint azonban a környezetünkben tapasztalt természeti törvények és állandók érvényesek az egész Univerzumban. Úgy tűnik továbbá, hogy, ráadásul, nagyon finoman ráhangoltak az élet fenntartására, és számos mérvadó szerző úgy tekinti ezt a finomhangolást, mint amit meg kell magyarázni, mert nem magától értetődő. Jelenlegi legjobb fizikai elméleteinkben és a kozmológiai Ősrobbanás forgatókönyvé-

ben számos (legalább 34) szabad paraméter van, és az ember nem jöhetett volna létre olyan univerzumban, amelyikben az alapvető állandók vagy paraméterek egyike vagy másika megváltozott volna akár csak igen minimális mértékben is egyik vagy másik irányban. (Például vegyük az elektron/proton töltésgyenlőséget. Bármely töltésgyenlőtlenség a világon levő összes tárgyat – saját testünk, sziklák, bolygók, csillagok stb. – azonnali szétrobbanásra kényszerítene. Az egyensúly-nak rendkívül pontosnak kell lennie. Már akkor is szertepülnénk, ha a két töltés oly kevéssel különbözne, mint egy százbilliomod rész!)

A finomhangoltsághoz kapcsolódó antropikus kérdést *L. Smolin* a következőképpen fogalmazta meg: Miért esnek a részecskefizika és kozmológia standard modelljeinek paraméterei a paraméterter azon parányi tartományába, ahol lehetővé válik a csillagok keletkezése, és a szerves kémia? Sorra véve a legismertebb idevágó érveket, az Univerzum életbarát módon finomhangolt:

- mivel természetfölötti, magasabb rendű értelem célszerűen tervezte (kozmológiai tervezés elmélete);
- egyszerű véletlen következtében, amit nem kell és nem is lehet megmagyarázni;
- egyszerű véletlen következtében, ugyanis a különböző univerzumok Multiverzumában a paraméterek, törvények összes lehetséges halmaza realizálódik, és nekünk éppen a mi életformánkra hangolt univerzumban kell élnünk, hiszen egyébként nem létezhetnénk, és nem tehetnénk fel a vonatkozó kérdéseket (→ gyenge antropikus elv);
- mivel egyébként nem létezhetnénk és vizsgálódhatnánk (→ erős antropikus elv);
- mivel a rövidesen rendelkezésünkre álló „világ-formula” (Theory of Everything, ToE) az észlelt törvényeket és paramétereket írja elő. Ezek tehát szükségszerűek, és finomhangoltságról nem is beszélhetünk;
- mivel a tapasztalt törvények és paraméterek egy önszervező folyamat, a kozmológiai természetes kiválasztódás eredményei.

A következőkben az utolsó előtti megoldással foglalkozunk.

A mindent átfogó, végső fizikai elmélet: a „világformula”

A posztnewtoni elméleti fizika (asztronómiára, kísérleti fizikára és matematikára alapozott) útja, az elektrosztatikától – az általános relativitáselméleten és a kvantumelméleten keresztül – egészen a gravitáción kívül minden kölcsönhatást magában foglaló Nagy egyesített elméletig (GUT), igazi diadalmenetnek nevezhető (*1. ábra*).

Tulajdonképpen érthető, hogy a fizikai tudásunkon alapuló mega-, makro- és nanocsodák elismerést, ámulatot vagy éppen félelmet keltő sokasága elbizakodottságot is szül. A fizika matematikai alapjainak kelően átgondolt figyelembevétele nélkül megindult a végső

„világformula” utáni kutatás. Pedig ha elkészül(het)ne, nemcsak logikailag kellene ellentmondásmentesnek, univerzálisnak és unikálisnak lennie, hanem egyúttal minden fundamentális dologra (pl. finomhangoltság) végső magyarázattal szolgálnia. Az elméleti fizika akkor már nem lenne természettudomány, hanem a deduktív logika ága. Minden axiómákból lenne levezethető.

A ToE megalkotását célzó első figyelemre méltó kísérletnek a Kaluza–Klein-elméletet vehetjük, amely képes volt az elektromágneses kölcsönhatás és a gravitáció egységes leírására. Sajnos, akkor még mind a gyenge, mind az erős kölcsönhatás ismeretlen volt, így nem szerepelhetett *Klein*ék munkájában.

Az 1950-es években *Werner Heisenberg* próbálkozott, sikertelenül, a világformula megalkotásával. *Albert Einstein* élete végéig foglalkoztatta a „végső” lépés megtétele, de az neki sem sikerült. Napjainkban elsősorban a szuperhúrelmélet, a Hawking-féle M-teória és a kvantumgravitáció szolgál kiindulási forrásként, de még a témakörön dolgozók (a hívők) szerint is igen lényeges problémák várnak megoldásra.

A világformula – megalkotásának tartós sikertelensége ellenére is – a médiában az általános relativitás-elmélethez hasonló szerepet játszik. *Friedrich Dürrenmatt Fizikusok* című drámájában a végső képletet J.W. Möbius fizikus alkotja meg. Mindenesetre jól el is dugja, mivel úgy véli, hogy annak ismerete az emberiség számára igen veszélyes lenne. *Darren Aronofsky Pi* című filmjében M. Cohen matematikus jut el a világképletig, de az sok bajt hoz rá, mivel kiderül, hogy segítségével a jövő megjósolható. A végső fizikai formula, a „világképlet” tehát a köztudatot is foglalkoztatja.

Mi a sikertelenség igazi oka?

Egyértelműen nem az elméleti fizikusok „ügyetlensége”. Az ok mélyen matematikai. *Stanley Jaki* (Jáki Szaniszló) 2004-ben lapunkban megjelent cikke, valamint vonatkozó (1966-ban és azóta megjelent) angol nyelvű munkái után talán nem is fogok hozzá e sorok írásához, ha kezembe nem kerül *Solomon Feferman*-nak, a rangos princetoni Institute for Advanced Study munkatársának idevágó előadása, melyet a Gödel-centenárium keretében, 2006. november 17-én tartott. De vegyük a dolgokat sorjában.

David Hilbert finitista matematikafilozófiai irányzata cantori terminológiát alkalmazva azt mondja ki, hogy egy konzisztens axiómarendszer egyértelműen definiálja a benne előforduló fogalmakat, továbbá biztosítja,

Elektrosztatika	Magnetosztatika	Gyenge kölcsönhatás	Erős kölcsönhatás	Gravitáció
Elektromágneses kölcsönhatás			Kvantum-színdinamika	Általános relativitáselmélet
Kvantum-elektrodinamika				
Elektrogyenge kölcsönhatás				
Nagy egyesített elmélet (Grand Unified Theory, GUT)				
Kvantumgravitáció, „Világképlet” (Theory of Everything, ToE)				

1. ábra. Az elméleti fizika épületének struktúrája

hogy a rendszer által lefedett tartomány konzisztens totalitásként létezik. Az 1934-ben megjelent, *Grundlagen der Mathematik I.* című társszerzős művében Hilbert a fizika és matematika kapcsolatáról a következő véleményen van: Mivel a fizikai elméletek matematikai fogalmakra és eredményekre támaszkodnak, elengedhetetlen, hogy a felhasznált matematika ne vezethessen ellentmondásra. *A matematikai elméletek voltaképp a véges tapasztalat bizonyíthatóan megbízható tudományos extrapolációinak vehetők.*

A világformula megalkothatatlanságát is jelentő Gödel-tétel(ek) *Kurt Gödel*nek abból a sikertelen kísérletéből eredtek, hogy Hilbert programjának keretében bizonyítsa az analízis relatív konzisztenciáját a klasszikus számelmülethez képest. Már a most végződött mondat is utal rá, hogy valójában két Gödel-tételről van szó. Ezek a következők:

- I. *Gödel első nem-teljeségi tétele:*
ha S olyan formális rendszer, melyre
 - S nyelvezete tartalmazza az aritmetika nyelvezetét,
 - S tartalmazza PA -t és
 - S konzisztens,
 akkor van olyan A aritmetikai mondat, mely igaz, de S keretén belül nem bizonyítható. (Itt PA a Giuseppe Peano-féle aritmetikai axiómarendszert jelöli.)
- II. *Gödel második nem-teljeségi tétele:*
ha S olyan formális rendszer, melyre
 - S nyelvezete tartalmazza az aritmetika nyelvezetét,
 - S tartalmazza PA -t és
 - S konzisztens,
 akkor S konzisztenciája (Con_S) S keretein belül nem bizonyítható. (S akkor minősül konzisztensnek, ha nem fogalmazható meg benne olyan A kijelentés, melynek mind igenlése, mind tagadása bizonyítható S keretei között.)

S ellentmondástalanságát tehát általában nem lehet az axiómarendszeren belül igazolni. Így csak egy bővebb axiómarendszer segítségével lehet eldönteni, mint ahogy annak ellentmondástalanságát egy még bővebb axiómarendszerben, és így tovább a végtelenségig. *Hitoshi Kitada* neves japán matematikus vonatkozó nézetét idézve: „A fizikai világ természetes számokat mindenképpen tartalmaz, és szavak rendszerével írjuk le, amely formális fizikai elméletté formálható. Így minden konzisztens fizikai elmélet eldönthetetlen proposíciót is tartalmaz, melynek korrektsége az emberek számára mindaddig rejtett marad, amíg nem találunk olyan jelenséget, észlelési tényt, amely a javaslatot alátámasztja, vagy cáfolja. Gödel tétele értelmében ilyen proposíció azonban



2. ábra. A hipotetikus Multiverzum egymással igen gyengén kölcsönható tagjai különböző természeti állandókkal, törvényekkel, életúttal jellemezhetők, és csak a különlegesen kedvező körülményeket nyújtókban alakul ki élet.

korlátlan számban létezik. Így emberi lény – vagy bármely más finit entitás – sohasem lesz képes megalakítani olyan *végző* elméletet, amely képes kifejezni az Univerzum jelenségeinek totalitását.”

Gödel tételei természetesen nem jelentik a fizika végét. Bár, mint *Hawking* hivatkozott Dirac-centenáriumi előadásában is megjegyzi, a jelenlegi fizikai elméletek sem nem konzisztensek, sem nem teljesek, nincs elvi akadály olyan elmélet megalkotásának, amely egységes magyarázatot ad minden *ismert* fizikai jelenségre. *Egyetlen elmélet sem tudja azonban garantálni, hogy a jövőben semmi alapvetően újat sem fedeznek fel az Univerzumban (akár elméleti, akár empirikus vonatkozásban), ami egy új, átfogóbb elméletet tesz szükségessé.* Tehát mindig lesz érdekfeszítő munkája utódainknak is.

Most jutottunk el ahhoz az okhoz, amiért Feferman előadását említettem. A szerző *Freeman Dyson*nal vitatkozva (aki *Brian Green* *The Fabric of the Cosmos* című könyvéről készített recenziójában azt írja, hogy Gödel tétele következtében a fizika is kimeríthetetlen) azon a véleményen van, hogy a Gödel-tételeknek semmi közük sincs a fizika alapvető törvényeihez. Az, hogy a kutatásoknak elvileg vége lesz-e egyszer vagy sem, nem dönthető el egyszerűen matematikai alapokon.

Jákival, Kitadával, Hawkinggal, Dysonnal és a többi „Gödel-pártival” kell egyetértenünk. Gödel gondolatmenetének valóban semmi köze sincs a fizika jelenleg ismert alapvető törvényeihez. Mint ahogy például a newtoni fizikának sem volt szüksége *Bolyai*, *Lobacsevszkij* és *Riemann* majdani eredményeire. De senki sem vitathatja, hogy a matematika belső fejlődéséből fakadó nem-euklideszi geometriák nélkül az általános relativitáselmélet sem lett volna megalkotható. Ami ma még „fizikailag lehetetlennek” számít, holnap ténylegesen létezőnek bizonyulhat (gondoljunk pl. a kvantumcsatolt részecskepárok nemlokális viselkedésére), és tovább gazdagíthatja a Világmindenségről alkotott képünket. A tudománytörténet azt tanítja, hogy ismereteink mindenkor csupán korlátozott pontosságúak az anyagi világ kimeríthetetlen sokfélesége, valamint tudatunkban való nem teljesen adekvát tükröződése következtében. Hiába hivatkozik Feferman arra, hogy a jelenlegi fizika matematikai háttere legfeljebb a Zermelo–Fraenkel-axiómarendszert használja ki, semmi sem biztosít minket arról, hogy sohasem lesz majd szükség

erősebb alaptételekre. (Ugye, valamikor még a párhuzamosági axióma is megdönthetetlennek látszott, és hogyan is tudnánk leírni például a fekete lyukakat, ha Bolyaiék nem tudtak volna túllépni rajta!)

Gödel a fizikában sokáig negligálták (de hiszen ez történt annak idején Arisztarkhosszal is), és bizony jellemző a Jáki által leírt 1976-os eset, amikor egy Nobel-konferencián *Fred Hoyle*, *Victor Weisskopf*, *Steven Weinberg*, *Murray Gell-Mann* és *Hillary Putnam* mellett egy hatos panel tagjaként arra kellett rádöbbsennie, hogy a rangos társaságban ő tud egyedül Gödel tételéről.

Igen jellemző Einstein esete is, aki ráadásul Gödellel kifejezetten jó barátságban volt. Sokáig mindketten Princetonban dolgoztak, és Einstein egy alkalommal azt mondta *Oskar Morgenstern*nek, a játékelmélet egyik ismert megalapozójának, hogy gyakran csak azért ment be az intézetbe, hogy a munka után Gödellel sétálhasson haza. („Um das Privileg zu haben, mit Gödel zu Fuß nach Hause gehen zu dürfen.”) Bár Einstein több mint 30 évig dolgozott az egyesített elméleten, ebben a vonatkozásban sohasem használta ki a közeli barátságot.

Befejezésül álljanak itt *Hilbert* szavai a *Grundlagen der Geometrie* című nagy klasszikus munkája végéről: „Amikor matematikai elmélkedéseink során találkozunk egy problémával, vagy megsejtünk egy tételt, megismerési ösztönünk csak akkor elégül ki, ha vagy tökéletesen megoldjuk a problémát, illetve szigorúan bizonyítjuk a tételt, vagy világosan felismerjük a siker lehetetlenségét, és a szükségszerű kudarc alapját. Így az újabb matematikában kiemelkedő szerepet játszik bizonyos feladatok *megoldhatatlanságának* kérdése, és az ilyen kérdések megválaszolására irányuló törekvés gyakran vezetett új és gyümölcsöző kutatási területek felfedezéséhez.” (Erre a Gödel-tétel keletkezése is jó példa, és az okfejtés természetesen igaz a fizikai elméletekre is.)

Igen, az áhított Világformulát, egyfajta Szent Grált, nyújtó álom továtűnt, de egy fontos felismeréssel talán gazdagabbak lettünk.

Irodalom

1. B.A. Balázs, *The Cosmological Replication Cycle, the Extraterrestrial Paradigm and the Final Anthropic Principle*. Diotima, Athens (2005) 44 old.
2. S. Feferman, *The nature and significance of Gödel's incompleteness theorems*. <http://math.stanford.edu/~feferman/papers/Godel-IAS.pdf> (2006)
3. K. Gödel, *Monatshefte für Mathematik und Physik* 38 (1931) 173
4. S. Hawking, *Gödel and the End of Physics*. <http://www.damtp.cam.ac.uk/strts/dirac/hawking> (2002)
5. Zs. Hetesi, B.A. Balázs, *On the Question of Validity of the Anthropic Principles*. *Acta Physica Polonica B* 37 (2006) 2729
6. D. Hilbert, *Grundlagen der Geometrie*. (1899), 8. kiadás, Teubner, Stuttgart (1962)
7. D. Hilbert, P. Bernays, *Grundlagen der Mathematik I*. Springer, Berlin (1934)
8. Jáki Sz., Egy megkésett ébredés: Gödel a fizikában. *Fizikai Szemle* 54/10 (2004) 338
9. H. Kitada, A Possible Solution for the Non-existence of Time. *arXiv:gr-qc/9910081* (1999)
10. M. Rees, *Just six numbers: the deep forces that shape the universe*. Basic Books, New York, N.Y. (2000), Magyarul: *Csak hat szám*. Vince, Budapest (2001) 190 old.
11. L. Smolin, *How are the Parameters of Nature Selected?* <http://online.itp.ucsb.edu/online/bblunch/smolin/> (1999)

A SZÁMÍTÓGÉPEK ÉPÍTÉSÉNEK FIZIKAI KORLÁTAI

Borbély Éva

BME TMTT Doktori Iskola

Az emberi természettől elválaszthatatlan a környezetére vonatkozó szüntelen és egyre pontosabb megismerési kényszer. Megfigyeléseit az idők folyamán különbözőképpen értelmezte, értékelte, és más-más célra használta fel megszerzett tapasztalatait, ismereteit, miközben folyton tökéletesítette módszereit. Modellézés, kísérlet, elemzés – e folyamatok eredményeként jutottunk el a mai kor „intelligens” eszközeihez, köztük a számítógéphez. A számítógép mára túlnőtte a megálmodói által neki szánt feladatkörét, és a mindennapos szórakozási, audio-vizuális, kommunikációs célokra való felhasználáson túlmenően a kutató laboratóriumokban modellez, kísérleteket szimulál, kísérleti eredményeket elemez egyre hatékonyabban. Nevezünk e tevékenységek háttérében húzódó műveleteket együttesen (és sok mást is természetesen, amit most nem említettünk) számítási folyamatoknak.

Első, naiv megközelítésben, a számítógépek működési elveire vonatkozó kérdésünket megfogalmazhatjuk úgy is, mint: hogyan modellezzük a modellezőt? A számítógép maga is része a tanulmányozott fizikai világnak, rá is vonatkoznak a természettörvényekből adódó általános érvényű szabályok, sok esetben kényszerek, ezért nem elegendő csupán matematikai modellek alapján finomítani a struktúrát, növelni a számítások hatékonyságát stb.

A számítási folyamatok a fizika törvényeivel írhatók le, ezért a számítógép technikai fejlesztése csak akkor valóságorientált, ha komolyan vesszük azokat a feltételeket, határokat, korlátokat is, amelyek a matematikai elméleti modellalkotás alkalmával nem merülnek fel.

Fizikusok a számítástechnika jövőjéről

A számítási folyamatok és a fizika kapcsolatával részletesen foglalkoztak kiváló fizikusok és számításméleti szakemberek egyaránt, köztük olyan ismert egyéniségek is, mint *Szilárd Leó*, aki az információ fizikai természetét feltárva adott magyarázatot és lehetőséget a „Maxwell-démon” paradoxon feloldására.

Richard P. Feynman, akit a számítástechnika Nostadamusaként is emlegetnek, 40 évvel a Nagasakit ért atomtámadás után Japánban egy békés témájú előadás keretében a jövő számítógépeinek technikai lehetőségeit, a gépek energiafogyasztásának problémáját fejtegette. A Feynman által megfogalmazott kérdésre – mennyire csökkenthetjük a számítógépek méretét összhangban a természet törvényeivel – ma is keresik a téma szakértői az optimális választ.

De nem csak Feynman mutatott élénk érdeklődést a számítógépek fejlődése iránt. 1985-ben a *Scientific*

American hasábjain folytak élénk viták a témában. A júliusi számban tette közzé tanulmányát *Charles H. Bennett* és *Rudolf Landauer* *A számítástechnika fizikai korlátai* címmel, amelyben olyan kérdésekre keresik a választ, mint: mekkora energiára van szükség egy adott számítási feladat elvégzéséhez? Mennyi időre van szükség hozzá? Tartozik-e például az egyes logikai lépésekhez minimálisan szükséges energia? Más szóval: melyek a számítási folyamatok fizikai korlátai? Különböző, számítások elvégzésére alkalmas modellek bemutatásával törekednek a kérdésekre adandó válaszok megtalálására. Így például megmutatják, hogy ideális, súrlódásmentes biliárdgolyók ütköztetésével is végezhetőek számítási feladatok. A szükséges energia tetszőlegesen kicsivé tehető egyszerűen a műveletek lassú elvégzésével. Így tehát semmiféle számítási feladat elvégzéséhez sem tartozik egy szükséges minimális energia.

A tanulmányban adott válaszok nem győzték meg egyértelműen a tudományos közösséget. *David F. Mayer* például a cikke reagálva az említett folyóirat augusztusi számában éppen *Neumann János* e témában közzétett eredményeire hivatkozik: „A gépi számítások energiaszükségletének kérdését Neumann János vetette fel és oldotta meg, több mint harminc évvel ezelőtt. Elemzése röviden a következő: minden anyag mozgásban van, a részecskék mozgási energiája kT , ahol k a Boltzmann-állandó és T az abszolút hőmérséklet. Hogy a számítás minden lépésében információt kapjunk az előző lépés eredményéről, egy jelet kell továbbítani. Hogy ezt a jelet meg tudjuk különböztetni a háttérzajtól, energiájának nagyobbak kell lennie, mint $\log_2 kT$...”

Ugyanebben a számban *John H. Mauldin* az alábbi megállapításokat teszi: „Egy fizikus számára az a gondolat, hogy az információfeldolgozás (elméletileg) nem fogyaszt energiát, elfogadhatatlannak látszik... minden olyan szerkezetnek, amely pontos beállítást vagy kalibrációt igényel, bizonyára szüksége van egy további, energiaigényes részre, amely biztosítja a kívánt feltételeket.”

Most *Tomaso Toffoli*t szeretném idézni, aki a továbbiakban tárgyalásra kerülő reverzibilis, illetve kvantumszámítás egyik jeles képviselője:

„A számítás – akár ember, akár gép végzi – fizikai tevékenység. Ha gyorsabban, jobban, hatékonyabban és intelligensebben akarunk számításokat végezni, akkor többet kell megtudnunk a természetről. Bizonyos értelemben a természet évmilliárdokon keresztül folyamatosan számolja a Világegyetemet »következő állapot«-át; csupán azt kell tennünk, hogy »felkérdezzük« erre a hatalmas, állandóan folyó számításra, és megpróbáljuk kideríteni, hogy mely részei haladnak éppen arra, amerre mi is menni akarunk.”

1. táblázat		
Maximális entrópiasűrűség különböző fizikai rendszerekre		
anyag	maximális entrópiasűrűség	problémák
fekete lyuk	$4,14 \cdot 10^{39} \text{ bit}/\text{\AA}^3$	~ Szaturnusz-tömegnyi anyag
nem fekete lyuk	$1,53 \cdot 10^{22} \text{ bit}/\text{\AA}^3$	előbbi tömegmennyiség
normál anyagsűrűség	$\sim 3 \cdot 10^5 \text{ bit}/\text{\AA}^3$	hőmérséklet ~ milliárd fok
atomnyi anyagmennyiség	$\sim 1-10 \text{ bit}/\text{\AA}^3$	becsült érték, alkotó atomok függvénye

Napjaink számítógépeinek fejlődési üteméről, a fejlesztendő területek technológiai újdonságairól, a szoftverekben rejlő lehetőségekről, a piacot uraló konkurens cégek termékeinek összehasonlításáról e helyen nem célunk beszélni, ezzel nagyon sokan foglalkoznak, és naprakészen közlik az új információkat úgy a nyomtatott, mint az elektronikus szakfolyóiratokban.

A cikk szempontjából napjaink számítógépeire jellemző releváns adatok közül az alábbiakat emeljük ki:

- Tranzisztorok ~ 0,03 μm szélesek, vastagságuk megegyezik 3 atoméval
- 10 milliárd kapcsolat /s
- processzor kapacitás: ~ 20 millió művelet /s.
- chip mérete ~ 70 nm.

A számítógépek fejlődésének ütemét követve óhatatlanul megfogalmazódnak bennünk a kérdések:

- Meddig lehet a logikai áramkörök sebességét fokozni?
- Mekkora a legkisebb méretű tároló cella?
- Mekkora a számításokhoz szükséges energia?

Amikor a számítógépek fizikai korlátairól beszélünk, a továbbiakban azokra a fizikai folyamatokra gondolunk, amelyeknek az ismert természettörvények valamilyen értelemben határt szabnak.

A számítások fizikai korlátai

Információ átvitel sebességének növelése

Mai ismereteink szerint, akár a relativitáselméletet, akár a kvantumelméletet véve alapul, sebességkorlátnak a fény vákuumbeli terjedési sebességét fogadjuk el. Információátvitel szempontjából, bármilyen közeget is tekintünk az információ hordozójának, az átviteli sebesség nem haladhatja meg a jól ismert $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ határértéket.

Egyetlen gondolat erejéig talán érdemes kitérni a kvantumelméletből ismert távolhatás problémájára, az EPR-párokra, amelyekről csak hosszas vita- és kísérletsorozat után sikerült bizonyítani, hogy mégsem képesek fénysebességet meghaladó információcserére. A segítségükkel megvalósított teleportáció, amely kvantumállapotok átvitelét jelenti, sem sérti az említett határértéket.

Összefoglalva: a terjedési, információátviteli sebességnek csak a fénysebesség szab határt, vagyis legfeljebb $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ sebességű információtovábbítás lehetséges.

Információsűrűség-korlát

A számítógépes számításokat korlátozó másik tényező a tárolható információmennyiségre vonatkozik egy adott térrészben, mint például a számítógép memóriájában. Ilyen korlát nyilvánvalóan létezik, de a számítástechnika mai állása szerint még közelítőleg sem bocsátkoznak a

szakértők jóslásokba erre vonatkozóan. A következőket mindenképpen állíthatjuk: létezik egy felső határ egy rendszer által tárolt információmennyiségre (entrópiára) vonatkozóan, amely a rendszer fizikai kiterjedésének és energiájának függvénye. Egy rendszer által tárolható információmennyiségen a rendszer által elfoglalható összes állapotok számának logaritmusát értjük.

Jacob Bekenstein vállalkozott egy ilyen korlát megadására, amelyet a termodinamika második főtételének a fekete lyukak fizikájára való kiterjesztése kapcsán írt fel, és a fekete lyukak eseményhorizontjára alkalmazta első ízben. A *holografikus elv* néven ismert állítás szerint a Bekenstein-korlát kiterjeszthető tetszőleges, fekete lyukaktól különböző felületekre is.¹

A Bekenstein-korlát:²

$$S < 2\pi \frac{ER}{\hbar c},$$

ahol S a rendszer entrópia- vagy információtárolási kapacitása természetes alapú logaritmus skálán, E a rendszer összenergiája, R pedig a sugara. A fekete lyukak esetében a tömeg/energia hányados a sugár egyenes arányában változik, vagyis az entrópia a Bekenstein-korlát esetében a fekete lyuk felületével arányos. Ha valóban ez a helyzet, akkor a fekete lyuk eseményhorizontján az információsűrűség hatalmas, a számítások szerint $2,21 \cdot 10^{70} \text{ bit}/\text{m}^2$. Nyilván bátran állíthatjuk, hogy a DRAM-ok ezt a sűrűséget még jó ideig nem fogják elérni. A fenti összefüggés elemzése során kimutatták, hogy javításra szorul a magas hőmérsékletek tartományában, határértéként 1000 kelvint adták meg. Ugyanakkor egy adott anyagmennyiség estében, ha a nyomás/hőmérséklet normál értékekkel jellemezhető (nem extrém alacsony vagy magas) szintén további korrekciók szükségesek.

Az 1. táblázat különböző anyagokra, fizikai rendszerekre számított maximális entrópiasűrűséget tartalmazza feltüntetve azokat a nehézségeket is, amelyek a mai technológiák mellett egyelőre lehetetlenné teszik a számított maximális értékek elérését.

¹ J.D. Bekenstein, Generalized second law of thermodynamics in black hole physics. *Physical Review D*9 (1974)

² J.D. Bekenstein, A universal upper bound on the entropy to energy ratio for bounded system. *Physical Review D*23 (1982)

Igen fontos fizikai mennyiség a számítástechnika fizikai korlátainak vizsgálatánál a maximális információfluxus, vagyis az egységnyi felületre számított információáramlási sebesség (a hírközlésméletben információütemnek nevezik). Ez a korlát az előzőekben vizsgált korlátok következményeként értelmezhető.

Tegyük fel, hogy az adott anyag entrópiásűrűsége ρ_s . Az F_s információfluxus az adott anyag ρ_s entrópiásűrűségének és a v terjedési sebességnek a szorzata:

$$F_s = \rho_s v.$$

Az entrópiásűrűség korlátja az alábbi képletből adódik, míg a terjedési sebességnek a c fénysebesség szab határt:

$$\rho_s \cong \frac{S}{V} = \frac{16\sqrt{\pi}}{3 \cdot 60^{1/4}} \left(\frac{c}{h} \frac{M}{V} \right)^{3/4},$$

ahol M/V az energiasűrűség tömeg egységben (a szokásos térfogati energiasűrűséget c^2 -tel elosztottuk).

Maximális számítási sebesség

Norman Margolus és Lev B. Levitin The maximum speed of dynamical evolution című publikációjukban az izolált fizikai rendszer dinamikai fejlődésének sebességét vizsgálták, vagyis a rendszer által felvett különböző állapotok számát adott időintervallum alatt. A kvantummechanikai definíció szerint két állapotot különbözőnek nevezünk, ha ortogonálisak egymásra. (Az ortogonalitás és információfeldolgozás kapcsolataival L.B. Levitin részletesen foglalkozott.³⁾

Számításaik szerint – az olyan rendszerek esetében, ahol a kvantummechanika törvényei érvényesülnek – az a maximális érték, amely az átmenetet biztosítja az ortogonális állapotok közt E_0 átlagenergia mellett, az alábbi összefüggéssel adható meg:

$$v_{\perp} \leq 4 \frac{E - E_0}{h}.$$

Bizonyították, hogy amennyiben egy számítási művelet megkívánja a számítást végző rendszer valamely részének egy megkülönböztetett állapotból másikba való átmenetét, úgy az említett összefüggés abszolút felső korlátot szab a számítógépnek az adott számítás elvégzésére.

Ha egy elektront 1 V potenciállal gerjesztünk, akkor valamely számítási lépést képtelen nagyobb

sebességgel elvégezni, mint $4 \text{ eV}/h = 9,67 \cdot 10^{14} \text{ Hz} \sim 1$ művelet / femtoszekundum.

Tovább finomítva a részleteket, Margolus⁴ megemlíti, hogy amennyiben nem áll rendelkezésre a rendszer teljes energiája a számítási folyamat során (pl. az energia egy része hő formájában van jelen), a rendszer szabad energiája az, amely befolyásolja az egyes állapotok közti átmenetek, ezáltal a számítások sebességét is.

Összehasonlítva az említett korlátokból származó eredményeket napjaink számítógépeinek kapacitásával érdekes eredményekre jutottak. Ahhoz, például, hogy a jövő számítógépei – kihasználva a fizika törvényeiből adódó maximális lehetőségeket – 10^{31} bit információt legyenek képesek tárolni a mai $\sim 10^{10}$ értékhez képest, olyan memóriával kell rendelkezzenek, amelyek több billió kelvin hőmérsékleten működnek, egy termonukleáris robbanáshoz hasonlóan. Valószínűtlennek tűnik egy olyan memóriával rendelkező számítógép vezérlésének és stabilizációjának technológiai kivitelezése, amelyben „Big Bang”-szerű folyamatok játszódnak le.

A tárgyalt korlátok és napjaink számítógépeinek összehasonlító elemzése során jutottak el a kutatók arra a következtetésre, hogy csak a reverzibilitást kihasználó számítógépmodellek lesznek képesek arra, hogy megközelítsék a fent vázolt korlátokat. Ezek a számítógépek gyakorlatilag energiavesztés nélkül működnek majd, és reverzibilis (megfordítható) logikai kapukból épülnek, amelyekre az jellemző, hogy a kimeneten kapott értékekből egyértelműen azonosíthatóak a bemenő bitek értékei. A klasszikus számítógépek logikai kapui közül egyetlen ilyen létezik, a tagadó, NOT kapu, amely a bemenetén levő bit értékét az ellenkezőjére konvertálja a kimenetén.

Átfogalmazva a konklúziót: ha társadalmi igény mutatkozik olyan számítógépek iránt, amelyek kapacitásának, hatékonyságának csak a „természettörvények szabhatnak határt”, akkor mindenképpen paradigmaváltásra van szükség. Talán átélhetjük ezt a „forradalmat”, amely az elektronikus, kontra mechanikus számítógépek megjelenését követő korszakot idéző módon világképünk átalakulását is maga után vonja.

Irodalom

1. J.D. Bekenstein, Limitations on quantum information from black hole physics. <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0110005>
2. J.F. Costa, *Physics and Computation: Essay on the unity of science through computation*. <http://fgc.math.ist.utl.pt/papers/unity.pdf>
3. N. Margolus, L.B. Levitin, *The maximum speed of dynamical evolution*. <http://people.csail.mit.edu/nhm/max-speed.pdf>
4. S. Lloyd, Ultimate physical limits to computation. <http://arxiv.org/abs/quant-ph/9908043>
5. W.D. Smith, *Fundamental Physical Limits on Computation*. www.cise.ufl.edu/research/revcomp/physlim/PhysLim-CiSE/PhysLim-CiSE-5.ps
6. Borbély É., *A kvantuminformáció megszületése*. <http://www.sulinet.hu/tart/cikk/ae/0/18509/1>
7. Borbély É., *Reverzibilis számítás*. <http://www.sulinet.hu/tart/ncikk/ae/0/19634/index.html>

³ L.B. Levitin, Physical limitations of rate, depth and minimum energy in information processing. *Theoretical Physics* 21 (1982) 299–309

⁴ N. Margolus, Physics-like models of computation. *Physica D10* (1984) 81–95

KESZTHELYI LAJOS 80 ÉVES

Nagy öröm számunkra, hogy a *Fizikai Szemle* hasábjain is köszönthetjük a 80 éves *Keszthelyi Lajost*, akit a tudományos közélet fizikusként, biofizikusként tart számon, de életpályája, gondolkodásmódja, a természet titkainak megfektetésére irányuló lankadatlan törekvése, minden új gondolat, jelenség iránti érdeklődése okán sokkal jobban illik rá a *természettudós* jelző.

Visszaemlékezéséből tudhatjuk, hogy tudományos ismeretterjesztő könyveket olvasva még gimnáziumi éve alatt beleszeretett az atomfizikába, és mindenképpen fizikus szeretett volna lenni. Az első egyetemi hónapokban rázúduló nehézségek, az önmagába vetett hit elbizonytalanodása majdnem letértették erről az útról, nagyon komolyan fontolgatta, hogy atomfizikus helyett inkább orvos lenne. Különös fordulata életének, hogy orvos ugyan nem lett, de azután, hogy az MTA Központi Fizikai Kutatóintézetében dolgozva atomfizikusként, magfizikusként nagy nemzetközi elismertséget és tekintélyt vívott ki magának, legnagyobb tudományos sikereit az orvosi tudományokhoz szorosan kapcsolódó biofizikában érte el. Mivel meggyőződése volt, hogy egy nagy fizikai kutatóhelyen szükség van az élet titkainak, törvényszerűségeinek kutatására is, a KFKI-ban létrehozta a később osztállyá fejlődő biofizikai csoportot, és ezzel megteremtette annak lehetőségét, hogy az intézetben létrejöhessen a számítógépes agytudomány egyik vezető hazai kutatóközössége. Az azóta is csupán formális „nyugalomba” végül az MTA Szegedi Biológiai Központ főigazgatói székéből vonult.

Kutatási témát mástól először és egyben utoljára pályája legelején kapott, amikor *Faragó Péter* javaslatára hozzászólott a világon alig két évvel korábban felfedezett szcintillációs számláló megépítéséhez. A legújabb tudományos felfedezések befogadása, a legigéretesebb kutatási irányok gyors és alkotó felismerése iránti csodálatos érzéke következtében ezután már ő adta magának és munkatársainak az ötleteket, tudományos feladatokat. Még felsorolni is nehéz azokat a kutatási területeket, ahol ő indította a munkát, érte el az első nemzetközi szintű eredményt, majd figyelmét és érdeklődését továbbra is a témán tartva „engedte át” azok művelését munkatársainak, tanítványainak.

Elsőként végzett Magyarországon az akkoriban elkészült részecskegyorsítóval olyan magfizikai méréseket, melyek eredményeit a legtekintélyesebb magfizikai szaklap, a *Nuclear Physics* is leközölte. A lítiumon (p, γ) reakcióval keltett nagyenergiájú fotonokat használta (γ, p) reakciók tanulmányozására más atommagokban. Eredeti ötletként kihasználta azt a tényt, hogy a szcintillációs számláló NaI kristályában a jódtomagon kiváltott protonok közvetlenül adnak jól mérhető fényfelvillanásokat.

A Mössbauer-effektust, felfedezése után szinte azonnal, sikeresen demonstrálta az Eötvös Loránd Fi-



zikai Társulat egyik klubestjén, és ezzel egy azóta is igen eredményes kutatási témát indított el Magyarországon. Joggal nevezhetjük őt a hazai Mössbauer-spektroszkópia „atyjának”. (Ahogy később kiderült, ez a bemutató még a belügyi szervek érdeklődését is felkeltette, a titkos jelentő magának az effektusnak a nevét ugyan nem jegyezte meg, hanem megelégedett a „... effektus” elnevezéssel.) Munkatásaival együtt, sok más értékes eredmény mellett, felfedezett egy új „Mössbauer-magot”, úttörő vizsgálatokat végzett lefagyasztott oldatokon, de több dolgozatot közölt ókori egyiptomi kerámiák Mössbauer-vizsgálatairól is. Az ilyen, a kulturális örökség megóvását is segítő kutatások éppen az utóbbi évtizedben kaptak nagy nemzetközi lendületet. Kísérleti fizikusi tapasztalataival, kifogyhatatlan

méréstechnikai ötleteivel meghatározó módon segítette elő a nemzetközi színvonalú Mössbauer-spektrométerek, sokcsatornás analizátorok hazai gyártását, és így közvetve a magyar számítástechnikai ipar megeremtését is.

Többek között éppen Mössbauer-mérések mutatták meg azt, hogy ferromágneses ötvözetekben igen nagy belső mágneses terek léphetnek fel az atommagok helyén. Ez a felismerés adta az ötletet Keszthelyi Lajosnak ahhoz, hogy a gerjesztett atommagok mágneses momentumának mérésére használt perturbált szöggkorrelációs módszerben az addigi külső mágneses terek helyett a méréshez szükséges perturbációt ezek a belső terekkel helyettesítse. A módszert kiterjesztette a néhány MeV energiájú protonokkal keltett γ -sugarak perturbált szögeloszlásának mérésére is. Mind-

két módszer új lehetőséget teremtett a perturbáló hiperfinom terek tulajdonságainak vizsgálatára.

A hetvenes évek kezdetén a rohamosan fejlődő félvezetőiparban egyre jelentősebb szerephez jutottak a néhány MeV energiájú ionnyalábokat használó besugárzási, illetve felületminősítő technikák. Az ilyen irányú ionimplantációs kutatás a KFKI-ban is beindult, és a Keszthelyi Lajos vezette csoport hamarosan meghonosította a ion-visszaszórásos spektrometriát. De őt a rutinszerű alkalmazás sohasem hozta igazán lázba, ha már valamit csinál, akkor abban feltétlenül legyen új gondolat is. Nem történt ez másképp ekkor sem. „Magfizikus korából” emlékezett arra, hogy az (α, α) rugalmas szórásban (a visszaszórási spektrometriában többnyire ezt a Rutherford-szórásnak nevezett folyamatot használták) oxigén céltárgy esetén 3 MeV protonenergia táján van egy keskeny, de erős rezonancia. Rögtön felismerte, hogy ezt a rezonanciát kitűnően fel lehetne használni a felületi oxidrétegek érzékeny kimutatására, és csoportjával azonnal demonstrálta is a jelenséget. Az ötlet közlésére akkor egy inkább csak belső használatra szánt kiadványban kerülhetett sor, így az azóta az ionnyaláb-analítika egyik alapeljárássá vált felfedezés egy később, de jobb helyen publikáló amerikai csoport hírnevét öregbíti.

Tudományos érdeklődése már erősen a biofizika, a biológia problémái felé fordult, amikor kezdeményezte egy másik ionnyaláb-analitikai módszernek, a részecskék keltette karakterisztikus röntgensugárzás-spektrometriának (PIXE) a meghonosítását is. De ennek a biológiai, biokémiai, orvosi biológiai anyagok elemösszetételének vizsgálatára is nagyon hatékony módszernek az alkalmazásakor is azonnal új megközelítést szorgalmazott. Nem elégedett meg az egyszerűen megkapható mennyiségi adatokkal, koncentráció értékekkel, a problémákat már „bio”-szemszögből nézve a fehérjemennyiségre vonatkoztatott mennyiségi adatokat szolgáltató PIXE-RP (PIXE relative to protein) módszer kidolgozásával búcsúzott több évtizedes „játékszerétől”, a Van de Graaff gyorsítótól és hivatalosan a KFKI Részecske- és Magfizikai Kutatóintézetől is. De mindannyiunk szerencséjére azóta is rendszeresen meglátogatja hajdani munkahelyét, ahol sohasem vendég, hanem továbbra is gondolkodásra, munkára serkentő, szeretettel fogadott mester.

A gondolati váltást sima átmenetben munkahelyi váltás követte. 1973-ban került Szegedre, kezdetben még csak félállásban az akkoriban alapított MTA Szegedi Biológiai Központ Biofizikai Intézetébe, ahol a biológiai aszimmetria eredetének kutatásába kapcsolódott be. Az élet alapvető tulajdonságára vonatkozó régi kérdés, hogy vajon mi az oka a földi élő anyag azon sajátosságának, hogy az optikailag aktív molekulapárok közül mindig csak az egyik – aminosavakban a balra, cukrokban a jobbra forgató – változat fordul elő. Ennek az időszaknak az újdonsága volt a fizikában a gyenge kölcsönhatás paritássértése, és rögtön felmerült a gondolat, hogy a fizikai és biológiai aszimmetriáknak esetleg kapcsolata lehet. *Garay András-*

nak, az Intézet akkori igazgatójának korábbi kísérletei alapján azt vizsgálták, hogy a béta-bomlás során felszabaduló polarizált spinű elektronok különbözőképpen hatnak-e kölcsön a jobbos, illetve balos molekulákkal. Az egyre alaposabban elvégzett kísérletek nem mutattak összefüggésre. A kérdés végleges megoldása azóta sem történt meg, de Keszthelyi Lajos a felmerült magyarázatok kritikus értelmezésével, fontos kísérletek elvégzésével tisztázta a témakört, és jelenleg is a terület egyik meghatározó szakértője. Még évekkel azután is, hogy aktívan dolgozott a területen, rendszeresen felkéri összefoglalók írására.

További kutatásaiban a biológiai energiaátalakítás alapvető lépéseinek tanulmányozása vált meghatározóvá, „kedvenc” vizsgálati tárgyává pedig a bakteriorodopszin molekula. Ez az akkoriban felfedezett színes fehérje számos előnyös tulajdonsága révén különösen alkalmas a biofizikusi kutatásokra. A fehérje sötét baktérium sejtfalában található, és az a biológiai szerepe, hogy fény hatására protonokat pumpál a sejten belülről a sejten kívülre, a fény energiáját alakítja át a külső és belső protonkoncentráció különbségének a baktérium számára felhasználható energiájává. Ellentétben a fotoszintézissel, itt egyetlen molekula látja el a feladatot, a fény elnyelése után egy néhány egymást követő lépésből álló reakcióban, mint egy mechanikus gép végzi el ezt a munkát. E működést tanulmányozva a fehérjék működésének általános törvényszerűségeit, a biológiai energiaátalakítás részleteit lehet jobban megismerni. Keszthelyi Lajos észrevette, hogy a bakteriorodopszint tartalmazó membrándarabkákat elektromos térben könnyen lehet orientálni. Az orientált mintákon egy sor különleges optikai és elektromos mérés végezhető, hiszen ha az orientáció miatt a rövid lézerimpulzussal szinkronizáltan indított molekulákban minden változás térben és időben rendezett módon zajlik, sokféle mozgás teljes leírására nyílik lehetőség. Ilyen kísérletekből a fehérje mozgását, a proton pumpálásának lépéseit jól meg lehetett határozni. A nagy visszhangot kiváltó alapkísérlet huzamosan művelt és eredményes témát indított az Intézetben, az itt kidolgozott eljárásokat más laboratóriumok is alkalmazták. Aktív tudományos iskola alakult ki széles módszertani repertoárral, spektroszkópiai, fotoelektromos mérésekkel, alkalmazva a génsébeszet akkoriban úttörő módszereit is. A Keszthelyi-iskola nagyban hozzájárult ahhoz, hogy a bakteriorodopszin mára az egyik legjobban megismert aktív funkciójú fehérjévé válhatott. A megközelítési mód általánosításaként különböző, azóta felfedezett, a rodopszincsaládba tartozó más molekulákat is jellemeztek így, de az eljárással eredményesen vizsgálták például az ionpumpáló ATPáz molekulákat is.

Mivel a bakteriorodopszin színes fehérje működése során változtatja optikai tulajdonságait, a biológiai funkciótól teljesen függetlenül nemlineáris optikai anyagnak is viselkedik. Ez mostanában igen intenzíven kutatott irányzat, a nemlineáris optikai anyagok a modern telekommunikáció, adatfeldolgozás remény-

beli kulcsszereplői. A Keszthelyi Lajos által kidolgozott orientálás ezen optikai (pl. holográfiai) alkalmazások szempontjából is nagyon sok előnyös tulajdonsággal rendelkezik. Jelenleg is intenzív kutatások folynak az Intézetben ebben témakörben.

Keszthelyi Lajos 1975-ben lett az Intézet igazgatója, egészen 1994-ig töltötte be ezt a posztot. Az alig pár évvel korábban alapított Intézet arculatának kialakulása tulajdonképpen igazgatóságának idejére esik. 1989-től öt éven át egyidejűleg főigazgatóként irányította az egész SZBK-t.

A biofizika közismerten interdiszciplináris tudomány, az alkotó tudományágak súlya nagyban függ művelői tudományos habitásától. Keszthelyi Lajos jellegzetes megtestesítője a kísérleti fizikus mentalitású biofizikusnak. Megmutatkozik ez gondolkodásmódjában, a témák kiválasztásában, tárgyalásában, még ab-

ban is, hogyan alakította az SZBK Biofizikai Intézetének tematikáját, kutatói gárdáját. Jelenleg is aktív résztvevője az Intézet életének. Saját kutatási témát vezet, és rendszeresen konzultál valamennyi más területen dolgozó kutatóval, akik tanácsait mindig nagyra értékelik. Az intézeti szemináriumokon most is lenyűgözi kollégáit a témák gyors átlátásával, a problémák azonnali feltárásával, előre mutató javaslataival. Tanítványai igyekeztek és azóta is igyekeznek eltanulni egyedülálló kutatói tulajdonságait, a nagy szakmai tudáson, kiváló kísérleti készségen és munkabíráson túl széles műveltségét, eredetiségét, ötletességét, különleges fogékonyságát az új dolgok iránt.

Születésnapja alkalmából, valamennyi tisztelője nevében is, további jó egészséget és eredményes munkát kívánunk a 80 éves Keszthelyi Lajosnak.

Ormos Pál, Szőkefalvi-Nagy Zoltán

FERENCZI DÍJ, 2006

A Ferenczi György Emlékalapítvány Kuratóriuma a beérkezett pályázatok közül a 2006. évi Ferenczi György Díjat sorrend megjelölése nélkül *Osváth Zoltánnak* és *Radnóczi György Zoltánnak* ítélte oda. A Díj igazoló oklevelét, a kitüntetettek nevét mutató

Ferenczi György emlékplakettet és a Díjjal együtt járó 75-75 ezer forint pénzjutalmat 2006. október 20-án a Csodák Palotájában rendezett ünnepségen adták át. Az alábbiakban a két kitüntetett pályamű összefoglalását adjuk közre.

Szén nanocső ponthibák alagútmikroszkópos megfigyelése

Osváth Zoltán

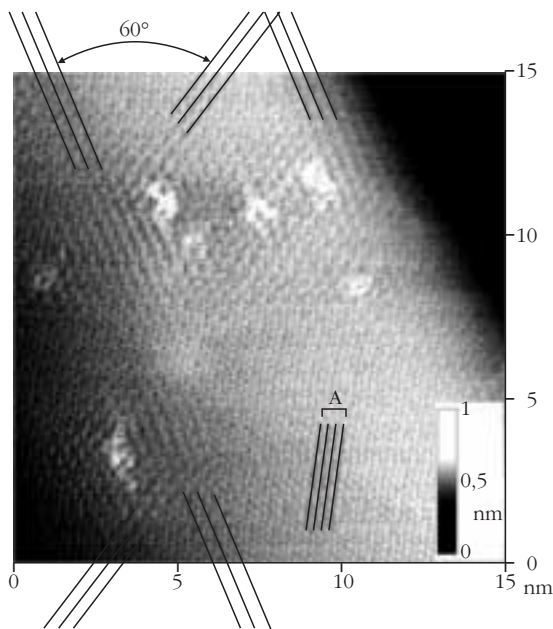
MTA MFA, Nanoszerkezetek Osztály

Felfedezésük után a szén nanocsövek kutatása az egyik erőteljesen virágzó kutatási területté vált. Fizikusok, vegyészek és az anyagtudomány művelői egyaránt nagy figyelemmel fordultak az elmúlt évtizedben e parányi objektumok világa felé. Mindez azért történt, mert a szén nanocsövek egyedi és igen különleges vezetési és mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek. Különleges tulajdonságaik miatt a szén nanocsövek rengeteg területen nyerhetnek alkalmazást, mint például a nanoelektronikában, kompozit anyagok készítésében (úgy elektromos, mint mechanikai tulajdonságok javítására), vagy sík képernyők, tér-emissziós lámpák gyártásában (e termékek ipari termelése a küszöbön áll).

Az egyfalú szén nanocső úgy modellezhető, mint egyetlen grafít síkból (grafén) feltekert, henger alakú objektum, melynek tulajdonságai függenek a feltekérés módjától [1]. A többfalú szén nanocsövek olyan egymásba koncentrikusan helyezett egyfalú csövekkel modellezhetőek, amelyekben a szomszédos hengeralapok közötti távolság 0,34 nm körül van. E modellek tökéletes hengerszerkezetekként kezelik a szén nanocsöveket. A valóságban azonban már az előállítás során hibák épülnek be a nanocsőszerkezetbe [2],

amelyek befolyásolják mind a mechanikai, mind a vezetési tulajdonságokat. A szerkezeti hibák jelenléte nagyon fontos például a szén nanocső alapú térvezérlésű tranzisztorok (CNT-FET) működésénél. A katalitikus CVD-módszerrel előállított nanocsövek általában görbültek, ami a szerkezeti hibákkal van összefüggésben. Ezzel szemben az elektromos ívkisüléssel előállított szén nanocsövek általában egyenesek, jól grafítizáltak, azaz kevesebb szerkezeti hibát tartalmaznak.

Szerkezeti hibák utólagos beavatkozással is létrehozhatók a nanocsövekben, mint például kémiai kezeléssel vagy besugárzással. Ebben a munkában ívkisüléses módszerrel előállított többfalú szén nanocsöveket sugároztunk be 30 keV-os Ar^+ ionokkal, a Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet (MFA) egyik ionimplantációs berendezésével. Ezen az energián az ionok még főleg az atommagokkal való rugalmas ütközések során veszítik el energiájukat, így feltételeztük, hogy a besugárzás hatására sok ponthiba (vakancia, intersticiális atom) keletkezik a nanocsövek szerkezetében. A besugárzáshoz kis, $D = 5 \cdot 10^{11}$ ion/cm² dózist alkalmaztunk azért, hogy egyedi, egymástól jól elkülöníthető ponthibákat hozzunk létre, amelyeket vizsgálni tudunk egy arra alkalmas eszköz-



1. ábra. Ponthibákat tartalmazó (besugárzott) szén nanocső atomi felbontású STM-felvétele. A hibák közvetlen környezetében interferenciavonalak, úgynevezett „ $\sqrt{3} \times \sqrt{3} R$ ” szuperstruktúrák figyelhetők meg. A berajzolt segédvonalak az interferenciacsíkokra, illetve az atomi periodicitásra (A-val jelölt vonalcsoport) kívánják felhívni a figyelmet.

zel, a pásztázó alagútmikroszkóppal (STM) [3]. A vizsgálatokat levegőn és szobahőmérsékleten működő STM-mel végeztük, állandó áramú üzemmódban [4].

Az 1. ábrán egy besugárzott, többfalú szén nanocső STM-felvételét láthatjuk atomi felbontásban. A nanocsővön néhány ponthiba figyelhető meg, egymástól pár nanométeres távolságra.

A ponthibák dombszerű kiemelkedések (világos pontok) formájában jelennek meg a felvételen. Ez a világosabb kontraszt a hibahelyeken nem a felületről kiemelkedő objektumot jelent, hanem pusztán a helyi elektronszerkezet (állapotsűrűség) megváltozásából adódik (látszólagos kiemelkedések) [5]. A hibahelyeken levő többletállapotok miatt lokálisan megnő az

alagútáram, így az STM-tűnek fel kell emelkednie néhány angströmöt, hogy az áram állandó értéken maradjon (állandó áramú leképezés).

A hibahelyek közvetlen szomszédságában megfigyelhető még a lokális állapotsűrűségnek olyan oszcillációja, amelynek periódusa (kb. 0,39 nm) nagyobb az atomi szerkezet által meghatározott periódusnál (kb. 0,25 nm) [5]. Ezek az úgynevezett „ $\sqrt{3} \times \sqrt{3} R$ ” szuperstruktúrák hasonlítanak a fémbelei ponthibák környezetében megfigyelt Friedel-oszcillációkhoz, megjelenésük a hibahelyekre érkező, illetve az azokon szóródott elektronhullámok interferenciájával magyarázható [6]. Az interferencia eredményeképpen az állapotsűrűség átrendeződik a hiba közvetlen környezetében. Megfigyelhető, hogy az interferenciavonalak amplitúdója fokozatosan csökken, ahogy távolodunk a hibától, és 3 nm-en belül teljesen eltűnik. A mérésekből az is látszik, hogy adott kiralítású nanocső esetén az egyes hibahelyeknél megfigyelt szuperstruktúra-mintázatok ugyanolyan orientációjúak. Az interferenciavonalak által bezárt 60° -os szögek az elektronhullámok Fermi-energiánál megengedett terjedési irányainak köszönhetőek.

A témával kapcsolatos további anyagok a Nanoszerkezetek Osztály honlapján találhatóak: <http://www.mfa.kfki.hu/int/nano>.

Irodalom

1. Kürti J., A varázslatos szénatom. *Fizikai Szemle* 47/9 (1997) 276
2. Biró L.P., Nanovilág: a szén nanocsőtől a kék lepkeszármag. *Fizikai Szemle* 53/3 (2003) 385
3. Balázs E., A pásztázó alagútmikroszkóp és társai. *Természet Világa* 1993/1
4. Márk G., Egy hullámcsomag kalandjai az alagútmikroszkópban. *Fizikai Szemle* 56/6 (2006) 190
5. Z. Osváth, G. Vértessy, L. Tapasztó, F. Wéber, Z.E. Horváth, J. Gyulai, L.P. Biró, Atomically resolved STM images of carbon nanotube defects produced by Ar^+ irradiation. *Physical Review B* 72 (2005) 045429
6. L. Tapasztó, P. Nemes-Incze, Z. Osváth, Al. Darabont, Ph. Lambin, L.P. Biró, Complex electron density oscillations on CVD-grown multi-wall carbon nanotube bent-junction. *Physical Review B* közlés alatt.

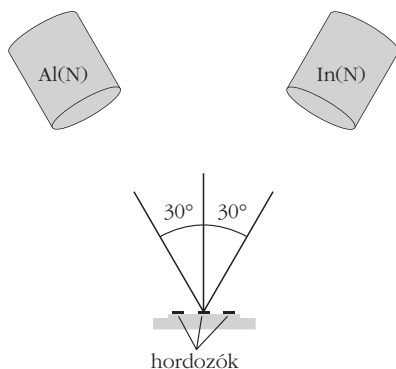
III-nitrid nanofű

A III-nitrid vegyület-félvezetők (GaN, AlN, InN és különböző ötvözeteik) egyre fontosabb szerephez jutnak a félvezetőiparban, elsősorban elektromos tulajdonságaiknak (direkt átmenettel rendelkező sáv-szerkezet, nagy elektronmozgékonyosság) köszönhetően. Ilyen anyagokból készülnek a napjainkban egyre szélesebb körben alkalmazott, intenzív fényű zöld, kék, UV világítódiodák, félvezető lézerek. A félvezető eszközök gyártásának szempontjából fontos, hogy a különböző ötvözetek az összetételnek megfelelő tiltottsáv szélességgel rendelkeznek, így gyakorlatilag tetszőleges tiltottsáv szélesség érhető el a 2–6 eV tartományban. Az AlN/InN ötvözetek előállításánál fontos korlátot jelent a körülbelül 10%-os oldhatósági határ. Emiatt a 10–90% InN-et tartalmazó ötvözetek nem-

egyensúlyi összetételük miatt metastabilak és nehezen állíthatók elő jó minőségben.

Kísérleteinkben ilyen nem-egyensúlyi összetételű, epitaxiális rétegeket kívántunk növeszteni MgO hordozón, reaktív magnetronporlasztással. A növesztéshez külön In- és Al-forrásokat használtunk, az 1. ábrán látható elrendezésben, nitrogén porlasztógázzal. 300°C hőmérsékleten a 2. ábrán látható szerkezetet növesztettük, melyet a morfológia alapján *nanofű*-nek neveztünk el. A szerkezet érdekessége, hogy a folytonos réteg helyett felépült tűkristályok görbültek, ennek megfelelően a hordozótól távol eső szakaszaik orientációja lényegesen eltér a hordozóhoz közeli részek epitaxiának megfelelő orientációjától. A nanofű jellemzően 10–20 nm széles és 300 nm hosszú osz-

Radnóczi György Zoltán
MTA MFA, Vékonyrétegtudományi Osztály

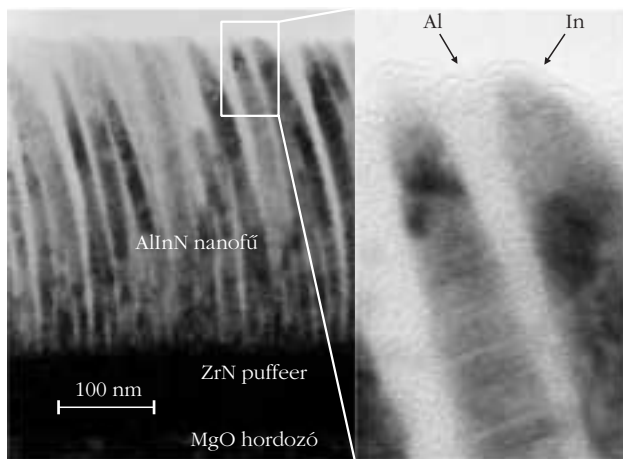


1. ábra. A magnetronforrások és a hordozó elhelyezkedése a nanofű növesztésénél.

lopokból áll, melyek körülbelül 28° -ot görbülnek, végük csúcsos, hordozóval érintkező részük epitaxiális, és meglehetősen sok hibát, főleg rétegződési hibát tartalmaznak. Mikroszkópos és röntgendiffrakciós vizsgálatokkal is kimutattuk, hogy az oszlopok az Al-forrás felé dőlnek.

A görbület logikus magyarázata lett volna az oszlop tengelyével párhuzamos Burgers-vektorú éldiszlokációk jelenléte, ilyen kristályhibákat azonban nem figyeltünk meg. Ezzel szemben kimutattuk, hogy az oszlopok hibamentes szakaszai is görbültek. A rácshibák helyett tehát más magyarázatot kerestünk. Ha kiszámítjuk, hogy rugalmas deformációt feltételezve milyen mértékben torzul a kristályrác, akkor 1% körüli érték adódik, ami meglehetősen nagy. Ezért nem valószínű, hogy a görbületet rugalmas deformáció okozza, emellett a deformációt létrehozó feszültség forrása is tisztázatlan.

Figyelembe véve, hogy az oszlopok az Al-forrás felé dőlnek feltételezzük, hogy a görbületet rácsállandó-különbség okozza, ami az oszlopokon belüli koncentrációgradiens miatt alakul ki. Az oszlopok In(Al)-forrás felőli oldalán több In(Al) épül be az ötvözetbe, így a nagyobb In-tartalmú oldalon nagyobb lesz az ötvözet rácsparamétere, mint az Al-ban gazdag oldalon. A Vegard-szabályon alapuló becsléseink szerint az In-tartalom nanométerenként körülbelül 1 at%-ot



2. ábra. Az AlInN nanofű átnézeti képe. Az oszlopok csúcsának ki-nagyított képén nyilakkal jelöltük a beérkező Al-, illetve In-fluxus irányát.

változik. A meglepően nagy koncentrációgradiens kialakulásának oka, hogy a csúcsos végű oszlopok hegyén árnyékhathások miatt inhomogén lesz a beérkező részecskék összetétele. A nitrid anyagok esetében viszonylag alacsonynak számító 300°C -os növesztési hőmérsékleten, a kis felületi mozgékony-ság miatt ez az inhomogenitás részben megmarad, így a növekvő oszlopok összetétele és rácsparamétere is helyfüggő lesz.

Koncentrációgradiens miatt kialakuló görbületet több anyagrendszeren megfigyeltek, leginkább eltérő összetételű rétegekből álló rétegrendszerek esetében. A nanofű újdonságát az adja, hogy ez egy önszerveződő szerkezet, melyben az összetétel inhomogenitását a növesztési kísérlet geometriai feltételei és a felületi mozgékony-ság határozzák meg. A geometriai feltételek célzott változtatásával (mintaforogtatás, döntés, források intenzitásának változtatása) ilyen tűkristályokból várhatóan érdekes nanoszerkezetek hozhatók létre. A görbült tűkristályok további érdekessége, hogy rendezettségük ugyanolyan fokú, mint bármely kristályé, ám a kristályok alapvető tulajdonságával – a translációs szimmetriával – nem rendelkeznek.

FRISS

2007 januárjától új szolgáltatással bővült a *Fizikai Szemle* internetes változatának is otthont adó KFKI-szerver. Szalay Katalin és Kőrösi Magdolna útjára indította a FRISS oldalt. Itt naprakész információkat kaphatunk az ország fizikusokat és fizikatanárokat érdeklő eseményeiről, előadásokról, konferenciákról, kiállításokról stb.

Külön érdekesség a minden napon megjelenő HISTÓRIA rovat, melyben a természet-, a műszaki tudományokat művelő kimagasló egyéniségekről emlékeznek meg a honlap gondozói. A rövid méltatásokat kép és sokirányú web-dokumentumok egészítik ki.

Jó böngészést kívánunk olvasóinknak.



Wigner Jenő szobra – melynek felavatására készülünk – ott áll majd, ahol a Nobel-díjas fizikus gyermek- és ifjúkorának emlékezetes hónapjait töltötte: Alsógödön, a volt Wigner-villa kertjében. Ez a villa ma a Piarista Szakmunkásképző Intézet otthona. Dicséretes kezdeményezés az iskola fenntartói és a Gödi Városvédők Egyesülete részéről, hogy a gödi önkormányzat támogatásával szobrot állítanak a nagy tudósnak. A szobor az érett embert, a befutott tudóst ábrázolja, ez természetes. A fiatal Wigner Jenőről, aki számára ez a kert és ez a környék az ifjúkor élményeit hozta, nem készült szobor. Emlékezzen meg róla ez az előadás.

Az édesapa, *Wigner Antal* (1870–1955) Kiskunfélegyházán született, de három éves korától fogva Pesten élt. Özvegy édesanyja taníttatta. Az akkor már jó nevű pesti Evangélikus Gimnáziumba íratta be (ami akkor még nem a Fásorban, hanem a Deák térből nyíló Sütő utcában működött). Mire Antal leérettségizett, édesanyját is elvesztette. Egyetemi továbbtanulás helyett dolgozni kezdett, az újpesti Mauthner Testvérek és Társai Bőrgyárban kapott jó előmenetellel kecsegtető állást. A szorgalmas diákból következetes és határozott főnök lett. Anyagi helyzete fokozatosan javult, harmincéves korában már megnősülhetett.

Az édesanya *Elisabeth Einborn* (1879–1966) Eisenstadtban (Kismartonban) született, osztrák családban. Huszonegy éves korában ment férjhez az ígéretes karrierrel rendelkező Wigner Antalhoz. A házasságból három gyermek született, két lány és egy fiú. *Wigner Berta* (1901–1955) az egyetlen, aki nem érte el a hatvan éves kort, a család összes többi tagja nyolcvan évet is megélt, sőt, *Wigner Margit* (1904–2002) csaknem százéves volt, amikor Floridában elhunyt. Ő egyébként kétgyermekes elvált asszonyként *Paul Dirac* (1902–1984) angol fizikus felesége lett 1937-ben. (Dirac már korábban, 1933-ban Nobel-díjat kapott.) Bátyja és férje egyidősek, jó barátok voltak.

Wigner Jenő (1902–1995) ugyancsak hosszú életet élt. Budapesten született 1902. november 17-én, a Király utca 76-ban, ahol ma már márványtábla őrzi születésének emlékét. „A Wigner család a jómódú zsidó középosztályhoz tartozott” – állapítja meg *Füstöss László* a Wigner Jenőről készült CD-ROM-on¹. A második emeleti lakásban külön szobája volt a személynak, külön a nevelőnőnek, akitől a gyerekek franciául tanulhattak, de volt külön gyerekszoba, sőt könyvtárszoba is a nagy lakásban. Wigner Jenő legszívesebben az utóbbiban tartózkodott. Korán lett szemüveges, a gyerekek vehemens játékaiban nemigen vett részt. Rengeteget olvasott, a magyar költők közül legjobban Vörösmartyt szerette.

Reggel fél nyolckor fiáker, később már gépkocsi jött Wigner Antal igazgató úrért, s vitte a gyárba. Esetenként, hogy el ne késsen, kis kitérővel a fiát is elvihette a szigorú apa az onnan néhány száz méterre lévő iskolába. Abba a Fasori Evangélikus Gimnáziumba, melynek elődjébe járt annak idején ő maga is. Az iskola hivatalos megnevezése akkoriban Budapesti Ágostai Hitvallású Evangélikus Főgimnázium volt.

A félénk, visszahúzódozó kisfiú első osztályfőnöke és egyben számtan- és mértantanára *Oppel Imre* (1883–1968) lett. A gimnázium első és második osztályában (ez a mai 5. és 6. osztálynak felel meg) a számtant heti 4 órában, a mértant heti 3 órában tanította Oppel tanár úr, de ő tartotta a szépírási órát, heti 1 órában és a tornaórát is, heti 2 órában. Vajon milyen szakos lehetett? A már említett CD-ROM-on olvasható életrajza szerint Oppel Imre a 4 éves rajztanárképzőben szerzett művészeti és mértani rajz oktatására jogosító oklevelet 1905-ben. Ebben az évben adták át az Evangélikus Gimnázium új épületét a Fásorban. Amikor Wigner Jenőt és még mintegy hatvan osztálytársát kezdte tanítani 1912-ben, már hatodik éve ő volt a gimnázium rajztanára. Fiatal tanár volt, akit a fiúk szerettek és respektáltak is. Hogyan taníthatta a matematikát? Egy jó tanárnak ez nyilván akkor jelenti a legkevesebb gondot, ha jó könyvből taníthat. Ő pedig jó tankönyvből tanított: 1912-ben *Beke Manó Számtanát* kellett megvennie és használnia minden nebulónak ebben az osztályban. Honnan tudhatta a rajztanár, a művészeti rajzszerzőre és a művészeti rajztan-

Wigner Margit, Berta és Jenő édesanyjával 1905-ben.²



Wigner Jenő alsógödi szobrának felavatásakor elhangzott előadás.

¹ Készült a Wigner-szobor felállításának alkalmából.

² A fényképet a Wigner család hozzájárulásával Kármán Tamás gyűjteményéből közöljük.



Jenő unokatestvérével 1914 nyarán.

folyam vezetője, hogy melyik a jó matematika tankönyv? Nyilván érdeklődött, és szerencsére volt kitől érdeklődni. Az iskola igazgatója ekkor az országosan ismert és elismert matematikatanár, a Középiskolai Matematikai Lapok kiadója és szerkesztője, *Rátz László* (1863–1930) volt.

Későbbi, időskori megnyilatkozásaiban Wigner Jenő mindig úgy emlékezett vissza Rátz tanár úrra, mint jótevőjére, akinek nagyon sokat köszönhet. Fényképét kitette egyetemi szobájának falára, és minden alkalmat megragadott, hogy dicsőően szóljon róla. Pedig nem is Rátz László tanította a számtant vagy a mértant Wigner Jenő osztályában, s még igazgatója se volt sokáig, csak mintegy másfél évig. A nyolcvanas évek végén a budapesti József Attila Gimnáziumban, diákokkal beszélgetve így emlékezett vissza: „Ő igazgató is volt, másfél évig. Másfél év múlva azonban úgy érezte, hogy jobb tanítani, mint igazgatónak lenni. Lemondott az igazgatásról.”²

Az igazság kedvéért el kell árulnunk, hogy Rátz László nem másfél évig, hanem öt éven át volt igazgató a Fasorban, azonban igazgatóságának utolsó két tanéve volt az, amikor már Wigner Jenő is odajárt. Ezt őrizte meg Wigner emlékezete. És azért említ Wigner csak másfél évet, mert az 1913/14-es tanév őszétől kezdve Rátz László az iskolai Értesítő megfogalmazása szerint „egészsége helyreállítása céljából félévi szabadságot kapott”. Óráin – például a Wignerékkel párhuzamos osztályban, ahol mértant tanított – „*Renner János* tanárjelölt helyettesítette”. Renner János (1889–

1976), akit még Rátz László vett fel a gimnázium tanári karába, 1945 és 1949 között szintén a gimnázium igazgatója lett, s a gimnázium másik híres tanárával, *Vermes Miklóssal* (1905–1990) egyszerre kapott Kosuth-díjat 1954-ben. A sors keserű ironiája, hogy akkor már nem is létezett a Fasori Evangélikus Gimnázium.

Rátz László betegségéről az Értesítő szűkszavú megfogalmazásán kívül semmit se tudunk. Az biztos, hogy 1914-ben, még jóval a világháború kitörése előtt mondott le a gimnázium igazgatásáról. „Tiszteletbeli igazgató” címmel tüntették ki, és ezek után már csak a tanításnak élt. A tanév végén abbahagyta a Középiskolai Matematikai Lapok szerkesztését is... Könnyen lehet, hogy nemcsak az iskola igazgatása, de a matematikai reformbizottságban végzett munka, a *Mikola Sándorral* közösen jegyzett *A függvények és az infinitezimális számítások elemei* című, a Franklin kiadásában 1914-ben megjelent könyv ráeső részének kidolgozása, valamint a Lapokhoz egyre nagyobb számban érkező megoldások javítása, az újság szerkesztése és kiadása okozott annyi gondot, követelt olyan szellemi erőfeszítést, hogy az már egészsége rovására ment.

Wigner Jenő és Rátz tanár úr kapcsolata akkor vált még bensőségesebbé, amikor már *Neumann János* (1903–1957), a később világhírűvé vált matematikus is ebbe az iskolába járt. „Neumann Jancsi egy osztállyal alattam volt. Három osztállyal előttem matematikában” – állapította meg a már említett beszélgetésben Wigner Jenő. – „Rátz László Neumann Jánosnak magánórákat adott, nekem pedig könyveket, amelyekből nagyon sokat tanultam. Főleg matematikát. És ez nagyon hasznos lett nekem az idők folyamán.” Wigner Jenő egész életén át kiválóan tudta hasznosítani azt a képességét, hogy gyorsan és eredményesen tudott könyvekből tanulni. Az se mellékes persze, hogy anyanyelvi szinten beszélt németül, s a német matematikai és fizikai szakirodalom volt ekkor a legjobb, a legszínvonalasabb.

11 éves korában néhány hetet az Alpokban töltött egy tüdőszanatóriumban, ahová édesanyja kísérte el, amikor itthon tbc-fertőzést diagnosztizáltak nála. A szanatóriumban matematikapéldák megoldásával ütötte el az időt, míg végre hat hét után kiderült, hogy a diagnózis téves volt, és hazamehetett. Betegségutadata azonban még sokáig megmaradt, és ez csak megerősítette visszahúzódo természetét.

1914 nyarán kitört az első világháború. Ősszel Wigner Jenő a gimnázium harmadik osztályát kezdte meg (mai számozással ez a 7. osztály). Új igazgatóval és számára új osztályfőnökkel kezdődött a tanév. Opperl Imre az iskola két másik tanárával együtt „hadiszolgálatba” lépett, mindjárt ki is küldték őket a frontra. Rátz László lemondása után egy latin–görög szakos tanár lett az új igazgató, és az évenként változó osztályfőnökök is mind humán szakosak voltak. Csak az ötödik osztályban kaptak újra reál szakos osztályfőnököket *Kubacska András* (1871–1942) természetrajz szakos tanár személyében. Ő főleg a növénytant szerette – nemcsak tanítani, de kutatni is. A jó tanuló Wigner

² Wigner Jenő beszélgetése a József Attila Gimnázium diákjaival, 1987. november 16. A beszélgetést *Marx György* közölte 1992-ben, *Beszélgetés marslakókkal* című könyvében.

Jenőre nagy hatással volt Kubacska szakmai tudása és a kutatómunka iránti elhivatottsága. „Sokáig nem tudtam, hogy mit szeretek jobban, a növénytant, vagy a matematikai fizikát” – emlékezett vissza ezekre az évekre 1973-ban, a *Fizikai Szemlében*.

A háború alatt a tanítás feltételei egyre rosszabbak lettek. Már a második háborús tanévben a fasori iskola épületében kellett helyet adni az István úti gimnázium 18 osztályának, mivel az ő épületükben katonai kórházak rendeztek be. A Fasorban csak 12 osztályterem volt – négy-négy alsó tagozatos és további négy felső tagozatos osztály számára. Most hát a fasori szertárakat, a rajztermeket, néhány alagsori termet is tanteremnek kellett berendezni. Délelőtt a fasoriak, délután az Istvánosok számára folyt a tanítás, 45 perces órákkal, közte 10 perces szünetekkel. Naponta 1500 diák fordult meg az épületben. Wignerék osztályának létszáma az elsős 60-ról 40-re apadt a negyedik osztály végére, ekkor a párhuzamos másik osztállyal összevonva újra majdnem 60-an kezdték meg a tanulást az ötödik osztályban, Kubacska tanár úr osztályfőnöksége alatt.

Oppel Imre tűzerőhadnagyot, miután Signum Laudis kitüntetést kapott, az északi frontról az olasz frontra vezényelték át. Itt, ezen a fronton esett el akkoriban *Zemplén Győző* (1879–1916) fizikus, akitől hadbavonulásakor a gimnázium fizikatanára, Rátz László barátja, Mikola Sándor (1871–1945) vette át a Matematikai és Fizikai Lapok fizikai rovatának, a Fizikai Szemlének a szerkesztését. Oppel Imre végül is szerencsésen megmenekült, az iskola volt diákjai közül azonban az első világháború kirobbanásától fogva egyre több lett hősi halott. A háború áldozata lett a gimnázium két volt igazgatójának egy-egy fia, ami érthetően nagy visszhangot váltott ki, együttérzést keltett az iskola tanárai és tanulói között. Közben hatvannál is több különböző korú, Erdélyből menekült, német (!) anyanyelvű tanulót kellett felvenni az iskola tanulói közé. Őket azután az itteni magyar diákok német tudásának fejlesztésére sikerült felhasználnia az iskola pragmatikus vezetésének.

A halál közelségének megtapasztalása nem volt újdonság Wigner Jenő számára, mivel ő már 11 évesen, az ausztriai szanatóriumban átesett ezen az élményen. „Megtanultam, hogy az emberi élet is véges.” Most tehát – és ebben nem volt egyedül – igyekezett függetleníteni magát a háborús és a politikai eseményektől, *Ferenc József* halálától, *IV. Károly* koronázásától, és megpróbált a tanulásra koncentrálni. Ezt ösztönözte az iskola vezetése is. Az 1916/17-es és az azt követő tanévben az iskola két-kétezer koronát költött könyvek vásárlá-

sára az iskolai könyvtár számára és hat-nyolcszáz koronát fizikai taneszközök vásárlására. Mekkora volt ez az összeg? Összehasonlításként nézzük meg az évi tandíjak nagyságát!

1916/17-ben a protestáns tanulók számára 70–76 korona, a többiek számára 150 korona volt a tandíj a Fasorban. Az 1917/18-as tanévben már beindult a háborús infláció, így a protestáns tanulókért 100–110 koronát, a többiekért évi 240 koronát kellett fizetni. Az, hogy a protestáns tanulók tandíja kevesebb egy, az evangélikus egyház által fenntartott iskolában, magától értetődő volt. A katolikus vagy az izraelita vallású tanulók szüleinek egyaránt a nagyobb tandíjat kellett befizetniük. Igaz, aránylag kevés katolikus tanuló járt ide, viszont a tanulók fele izraelita volt a Fasorban. Érdemes még megemlíteni, hogy a legjobb diákok által itt elnyerhető évi ösztöndíjak 10 és 20 korona között mozogtak ebben az időben.

Az 1918/19-es és az 1919/20-as tanév volt a két befejező tanéve Wigner Jenőnek a Fasorban. Láttuk már, mennyire megnehezítette a normális tanítást, hogy helyet kellett biztosítani az épületben első egy gimnáziumnak, de még nem említettük az első világháború idején bevezetett „hadi érettségi” intézményét. Ezt a vizsgát hamarabb, még tavasszal lehetett letenni azoknak a fiúknak, akik alkalmasak voltak katonai szolgálatra. Az érettségi után rövidesen bevonultatták őket, és erőltetett ütemű, gyors kiképzés után már vitték is legtöbbször a hadszíntérre. Nemcsak Magyarországon volt ez így; a front mindkét oldalán egyre nagyobb volt a veszteség. Hogy a Fasorban a tanárok mégis igyekeztek tartani a színvonalat, arra picit, de jellemző példa az 1916-ban feladott itteni matematikaérettségi feladat:

a) Határozza meg az R sugarú gömbbe írható, legnagyobb köbtartalmú egyenes kúpot;

b) a beírható, közös alappal rendelkező két egyenes kúpot úgy, hogy köbtartalmuk különbsége a lehető legnagyobb legyen!

Ma, 2006-ban, ezt a feladatot valószínűleg semmilyen szintű érettségi vizsgán se lehetne feladni Magyarországon.

A Fasori Evangélikus Gimnázium 1919-ben végzett osztálya (első sorban jobbról a harmadik WJ).





Szüleivel a tengerparton az 1920-as évek elején.

Akkoriban, a jól bevált nyolcosztályos gimnáziumban a két utolsó tanévben tanultak a diákok fizikát, általában heti 4 órában. Okos, átgondolt döntés volt ez: ekkor ugyanis már tudtak a diákok annyi matematikát (szögfüggvényeket, függvényanalízist), hogy el lehetett várni tőlük a fizika alapvető törvényeinek megértését. „Fizikát persze Mikola Sándortól tanultunk, és büszkén mondhatom, hogy két év után annyit tudtam, hogy a fizikai kurzus a budapesti Műegyetemen vagy a berlini Technische Hochschulen majdnem teljesen ismétlésnek tűnt fel.” A mindig udvarias Wigner Jenőnek ez a kijelentése akkor kap különös hangsúlyt, ha felidézzük azokat a politikai eseményeket, amelyek 1918 őszétől kezdve kényszerűen rányomták bélyegüket a hazai oktatásra.

1918 nyarán még német katonai győzelmektől voltak hangosak a hazai újságok, miután 1917 őszétől fogva sikerült a keleti hadszínteret kikapcsolni a háborúból. 1918 őszén azonban a nyugati front összeomlott. A német császár elmenekült az országból, a fiatal magyar király elvetélt békekezdeményezései pedig a hadsereg felbomlásához vezettek anélkül, hogy bármilyen méltányos engedményt sikerült volna elérni velük. A rendezetlen csapatokba verődött hazatérő, pénz és élelem hiányában a civil lakossággal erőszakoskodó katonák nagy riadalmat keltettek. Az ország volt miniszterelnökét, *gróf Tisza Istvánt* megölték. Budapesten kitört az őszirózsás forradalom, melynek *gróf Károlyi Mihály* állt az élére. Nemsokára, ahogy azt később *Az Est* írta, a földosztó Károlyi kezéből a halálosztó *Szamuely* kezébe ment át a hatalom, megalakult 1919 tavaszán a Tanácsköztársaság. A kommunista ideológiára épülő, az orosz forradalommal rokonszervező „munkáshatalom” mögött

azonban nem állt nagyobb erő, mely az ország integritását biztosíthatta volna. Sőt, az egykori nemzetiségekből alakuló (alakított) új kis államok területi követelésekkel léptek fel Magyarországgal szemben és ennek katonailag is nyomatékot adtak.

Hogyan élte meg mindezt a Fasori Evangélikus Gimnázium? Mindenek előtt örömmel vették tudomásul 1918 őszén, hogy az István úti gimnázium visszakapta addig kórháznak használt épületét, s így újra egyedül a fasori diákoké lett saját iskolaépületük. Hazatért Oppel Imre is a frontról, újra beindulhatott a művészeti oktatás a visszaállított rajzteremben. Ugyanakkor az országban kitört spanyolnátha-járvány miatt hamarosan járványszünetet kellett elrendelni. (A spanyolnátha egyfajta fertőző agyhártyagyulladás volt. A járvány egész Európán végigsöpört, és egyes becslések szerint több halálos áldozatot szedett, mint ahányan elesetek az első világháborúban.)

Az 1918/19-es tanév második feléve azonban minden eddiginél nagyobb zűrzavarral járt. A Tanácsköztársaság kikiáltása után két hónappal leváltották a régi igazgatót, és „bizalmi” nevezték ki az iskola élére. Ekkor már nem is az iskola épületében folyt a tanítás, mivel áprilisban a Vörös Őrség lefoglalta a fasori épületet kaszárnynak. Most a fasori diákoknak kellett átjárniuk az István úti gimnáziumba, ahol délutánonként 40 perces órákat tartottak számukra saját tanáraik. El lehet képzelni, milyen kísérleti (!) fizika órákon vehettek részt. Az előmenetelért aggódók számára kétes vigaszt jelentett, hogy május 13-án központi intézkedéssel az egész országban eltörölték az iskolai osztályzatokat és megszüntették az érettségit.

A Wigner család ezeket a hónapokat már nem Magyarországon élte át. Amikor a Mauthner gyárban is „győzött a kommün”, leváltották a „népnyúzó” igazgatót. A kommunista agitátorok és a hangadó gyári munkások nem kis része zsidó származású volt, ami annyira felháborította az ugyancsak izraelita Wigner Antalt, hogy kilépett az izraelita egyházból. Egész családjával áttért evangélikus hitre, majd családostul elmenekült az országból felesége rokonaihoz, Ausztriába. Lehet persze, hogy egy, az Osztrák–Magyar Monarchiában született és élt ember számára maga az átköltözés a Monarchia egyik városából a Monarchia másik városába még nem lett volna olyan nagy dolog. Csak hát a körülmények, amelyek ezt az átköltözést kikényszerítették!

Érdekes, hogy az iskola által szerencsésen megőrzött önképzőkori jegyzőkönyvben egy 1919. február 8-i bejegyzés arról tanúskodik, hogy Wigner Jenő ebben az időben még Budapesten tartózkodott, hiszen a relativitáselméletéről nyújtott be egy tanulmányt az iskolai Arany János Önképzőkörön. Idézzük fel a tanulmány ott leírt vázlatát!

Az objektív aberráció elmaradása.

A „nyugvó éter”.

Mit értünk azon kifejezés alatt, hogy valamely test „áll”?

A speciális relativitáselmélet.

Lorentz-transzformációk.

A távolságok megrövidülése.

Ezen az alapon a merev testek létezésének lehetetlensége. Az általános relativitáselmélet. A gravitációs erő. A Gauss-féle koordináták.

Összehasonlítás a klasszikus mechanika, a speciális és általános relativitás elve között.

Hasonlítsuk össze a relativitáselméletnek a fenti felépítését egy mai bevezető előadássorozat vagy könyv felépítésével! Semmi kétség, Wigner Jenő VII. osztályos tanuló megértette a relativitáselméletet. Honnan ismerhette, kitől tanulhatta meg? Mikola Sándortól biztos, hogy nem. Sem az akkori körülmények, sem Mikola felfogása nem kedvezett ennek. Az egyetlen lehetséges magyarázat: Wigner hozzájutott egy színvonalas német nyelvű könyvhöz, azt elolvasta és megértette. Amint már említettük, kiválóan tudott könyvből tanulni. Kitől kaphatta a könyvet? Talán Rácz Lászlótól...

1919. augusztus 3-án bevonultak Budapestre a megszálló román csapatok. A gimnázium épületében tartózkodó Vörös Őrség katonái megadták magukat. Legálábbis a legénység. A tisztek akkor már szétszédtek, a politikai megbízottak elmenekültek. Wignerék néhány hét múlva visszatérhettek Ausztriából Budapestre. Wigner Antal visszakapta igazgatói állását a börgyárban. Elkezdődött Wigner Jenő utolsó tanéve a Fasorban. Az osztályba már csak 10 izraelita, viszont 20 evangélikus diák járt, köztük Wigner Jenő. Volt még 6 református, 3 római katolikus és 1 unitárius tanuló is az érettségizők között. Tabló nem készült az osztályról és a tanárokról, csak egy szokásos iskolai csoportkép.

1920-ban a 20 koronás matematikai ösztöndíjat az „érettségi vizsgáló bizottság” javaslatára a tantestület Wigner Jenőnek ítélte. Közben, 1920. június 3-án írta alá a magyar kormányküldöttség a Párizs melletti Versailles-ban, a XIV. Lajos által építtetett Trianon Palotában a mai napig súlyos problémákat okozó békeszerződést.

Egyetemre először Budapesten kezdett járni, 1920 késő őszen vegyészmérnök hallgatónak iratkozott be az itteni műegyetemre. Egy év múlva azonban már Berlinben találjuk, a Technische Hochschule-n. Elvégezte, kitanult börgyári vegyészmérnöknek, ahogy apjának megígérte. Közben azonban eljárt a berlini tudományegyetemre is, ahol csütörtök délutánonként a híres Laue-kollokviumokon vett részt. *Einstein* és Európa más nagy fizikusai ültek a padokban, egyszer még egy referátum tartását is rábízták a nagyok. Berlini egyetemi tanulmányainak megkoronázásaként, az akkor Berlinben dolgozó *Polányi Mihály* (1891–1976) önzetlen szakmai támogatásával elkészítette, majd 1925-ben sikeresen megvédte doktori disszertációját, amelyet utána Polányival közösen publikáltak.

Végzett vegyészmérnökként hazajött és apja gyárában kezdett dolgozni. Berlini kapcsolatait azonban nem adta fel, élénk levelezést folytatott Polányi Mihállyal. A gyárban előfizetett a *Zeitschrift für Physik*-re, ahol a fizikai kutatások élvonalába tartozó cikkek jelentek meg. Amikor egy igazán izgalmas cikket ol-

vasott, Polányi javaslatára és támogatásával elfogadott egy berlini állásajánlatot. Titkos vágya, hogy minél közelebb kerüljön az akkor születő új fizikához, a kvantummechanikához, végre teljesült.

Berlinben a *Karl Weissenberg* (1893–1976) mellett végzett, a szilárd testek kristályszerkezetének szimmetriatulajdonságaira vonatkozó kutatásai, majd egykori iskolatársával, Neumann Jánossal folytatott göttingai beszélgetései (most tőle kapott fontos matematikai könyveket, értékes szakirodalmat) vezették el ahhoz a felismeréshez, hogy a matematikai szimmetriatulajdonságoknak fundamentális szerepük lehet a természet alapvető törvényeinek megfogalmazásában. Több közös cikket publikáltak Neumann Jánossal. Már magántanár volt Berlinben, az ottani műegyetemen, amikor baráti biztatásra hozzáfogott egy könyv megírásához. Ebben azt mutatta meg, hogyan alkalmazható a matematikai csoportelmélet a modern elméleti fizikában. (*Gruppentheorie und ihre Anwendung auf die Quantenmechanik der Atomspektren*, 1931.) *Marx György* szerint ez volt az a könyv, amely őt már diákkorában a modern fizika megismerésére sarkallta.

Befejezésül hallgassuk meg, éppen mert van gödi vonatkozása is, hogyan emlékezett vissza Wigner Jenő a fenti könyv születésére 1987-ben, 86 éves korában:

„A csoportelméleti könyvet németül akkor írtam, amikor Berlinben tanítottam az egyetemen. De nyaranta hazajöttem, és főleg idehaza írtam, Budapesten vagy Gödön. Én szerettem Gödöt. A szüleimnek volt ott egy kis háza. Nem is olyan kicsi, egy egészen csinos háza közel a Dunához. Ott laktunk, mindennap mentünk úszkálni egy kicsit a Dunában. Van ott egy kis sziget közel, oda is gyakran fölmentünk. De azért volt idő arra is, hogy olvassak fizikát, és dolgozzam fizikán, ez nagyon kellemes idő volt...”

1931-ben jelent meg a könyv németül, 1959-ben angolul, 1979-ben magyarul. Miközben írta, Wigner Jenő még nem volt harminc éves.

Saját magáról készített képe Berlinben, 1925-ben.



JUBILEUMI KÖZÉPISKOLAI FIZIKATANÁRI ANKÉT ÉS ESZKÖZBEMUTATÓ

Az 50. Középiskolai Fizikatanári Ankét és Eszközbe-
mutató lesz Szegeden 2007. március 14–18. között! A
nevezetes jubileum alkalmából visszatekintünk az ed-
digi ankétok eseményeire.

Budapesti ankétok

Az első 11 tanári ankétot Budapesten tartották, közü-
lük az elsőt az Eötvös Loránd Fizikai Társulat vezető-
ségének kezdeményezésére 1957. december 27–28-án
szervezték. (A Társulat elnöke az első tanári találko-
zók idején *Gyulai Zoltán* volt.)

A továbbképzés egyik helyszíne az akkor legkor-
szerűbben felszerelt fizikai kutatóintézet, a csillebérci
Központi Fizikai Kutatóintézet volt. A megnyitót *Já-
nosy Lajos* tartotta, majd *Pál Lénárd* az épülő atom-
reaktorról, *Simonyi Károly* a magreakciók végzésé-
nek módozatairól, *Fenyves Ervin* a kozmikus sugárzá-
sok vizsgálati módszereiről, *Marx György* az elemi
részekkel kapcsolatos legújabb elméleti fizikai ered-
ményekről és azok kísérleti igazolási lehetőségeiről
tartott előadást. Az épülő reaktor megtekintésével a
kutatómunka előkészületeiről is tájékozódhattak a
résztevők. A neves előadók közül, sajnos, már csak
ketten vannak közöttünk: Pál Lénárd és Fenyves Ervin
professzorok, utóbbi az Egyesült Államokban él. Az itt
említett tudósok később is meghatározó szereplői
voltak a tanári rendezvényeknek.

Az első ankétról *Csekő Árpád* a Petőfi Sándor Gim-
názium tanára tudósított a *Fizikai Szemlében*.

A második tanári ankéton még csak reménykedtek
egy hagyomány létrehozásában: „Mindent figyelembe
véve bátran mondhatjuk, hogy az Eötvös Loránd Fizi-
kai Társulat a most már feltehetően hagyományossá
váló országos középiskolai tanári ankétok rendezésé-
vel egyik igen fontos küldetését teljesíti, és a hazai
középiskolai fizikatanítás jobbá tételének ügyét szol-
gálja. Mindannyian reméljük, hogy ezt a minden te-
kintetben sikeres ankétot újabbak követik.” – írta

1959 januárjában *Makai Lajos* és *Csekő Árpád* a *Fizi-
kai Szemlében*. Akkor még nem gondolták, hogy eze-
ket a mondatokat 49 év múlva idézni fogjuk.

Az első három ankétot a téli szünetben tartották, a
két ünnep között. 1959-ben tett a Társulat Középisko-
lai Bizottsága javaslatot a kiállításon résztvevő iskolák
jutalmazására és az ankétok tavaszi szünetben való
megtartására, így a negyedik ankétot már 1961 áprili-
sában tartották.

Vidéki ankétok

A sors érdekessége, hogy a 12., első vidéki, és az 50.,
jubileumi ankétok is Szeged a helyszíne. Az 1969. évi
rendezvényt a József Attila Tudományegyetem fogadta
be. Az ankétot *Budó Ágoston* akadémikus nyitotta meg.
Azóta minden évben más vidéki városban rendezték
meg az ankétokat. Szegedre most harmadik alkalom-
mal látogatnak el a középiskolai fizikatanárok.

Az Oktatási Szakcsoport megalakulása

Az 1973. évi veszprémi ankéton jelentős változás tör-
tént, megalakult az ELFT Oktatási Szakcsoportja. Marx
György és Pál Lénárd vetették fel az addigi Középisko-
lai Bizottság, majd Oktatási Bizottság néven működő
funkcionáriusok inkább alkalmi jellegű munkájánál
sokkal szélesebb feladatok megoldására alkalmas Ok-
tatási Szakcsoport megalakulásának szükségességét.

A résztvevők szavazással döntöttek a szakcsoport
céljairól, feladatairól. Ezeket nyolc pontban foglalták
össze. A hetedik pont szólt arról, hogy az egyes rész-
területekkel foglalkozó önálló csoportokat (általános
iskolai, középiskolai- és felsőoktatási) kell létrehozni.
A nyolcadik pont szólt arról, hogy a vezetőségeket 4
évenként válasszák újjá, ezeknek be kell számolni
munkájukról. Az első elnök Jánosy Lajos, az első
titkár *Holics László* volt.

A képeken: Csekő Árpád, Gyulai Zoltán, Fenyves Ervin, Jánosy Lajos, Marx György, Pál Lénárd és Simonyi Károly



Hagyományos díjak az ankétokon

Mikola Sándor-díj

1961. április 7-én ismertette Gyulai Zoltán az ELFT elnöke a Mikola Sándor-díj alapításáról szóló elnökségi határozatot. Részletek az alapítási és odaítélési szabályzatából: „A minél eredményesebb fizikatanítás előmozdítása és az azt elősegítő fizikai didaktikai munkásság serkentése és támogatása céljából az Eötvös Loránd Fizikai Társulat emlékdíjat alapít, amelyet *Mikola Sándor*-ról, a kiváló fizikatanárról, a kísérleti fizikatanítás úttörőjéről és mesteréről nevez el. Mikola Sándor könyveivel és munkásságával jelentősen hozzájárult a fizikai módszertan fejlesztéséhez, a középiskolai tanulói gyakorlatok meghonosításához és a fizikai ismeretek hazánkban való elterjesztéséhez. A Mikola Sándor emlékdíjat korszerű, módszeres kísérletezésen alapuló, eredményes fizikatanítást elősegítő munkásság jutalmazására kell kiadni. A díj átadása minden évben az országos fizikatanári ankéton történik az 1961. évi ankétól kezdődően. A díj összege 2000,- Ft.”

Az első Mikola-díjat a Társulat elnöksége az egyik legnagyobb hazai tanáregyenéségnek, *Vermes Miklós*-nak, a Jedlik Ányos Gimnázium tanárának ítélte oda.

Vándorplakett

Marx György, aki szívén viselte a fizikatanárok sorsát és aktív segítője, résztvevője volt az ankétoknak, indította útjára a Vándorplakettet, amelynek átadása az ankétok nyitóünnepségének hagyományos aktusává vált. A vándorérmeket a michigani *C.M. Clark* professzor alapította. Tőle kapta 1989-ben Marx György. Ő a plakettet – amelyen lévő idézet a következő módon fordítható: „Csont törhet, vihar tombolhat, ez a tanárt nem akadályozhatja” – 1990-ben *Boros Dezső*-nek adta. Az érmet egy évig őrzi a díjazott, utána átadja az általa érdemesnek ítélt kollégának. 2007-ben *Krassói Kornéliától* a 19. tulajdonos veheti át az érmet.

KÖNYVESPOLC

Michio Kaku: HIPERTÉR

– A párhuzamos univerzumok, az időelhajlás és a tizedik dimenzió világa
Akkord Kiadó, Budapest, 2006. 364 o.

Michio Kaku amerikai kutató – aki maga is aktív részese a fizika ma egyik legaktuálisabb területén folyó tudományos erőfeszítéseknek – ismeretterjesztő könyvében a kívülről („laikusok” és a fizika más területein dolgozók) számára igyekszik bemutatni a tudomány mai állását a hipertérrel kapcsolatban. „Ez a könyv lehetővé teszi, hogy az érdeklődő tudomá-

Napjaink változásai

2004 óta – amikor az akkreditációs engedélyt meg kellett hosszabbítani – az ankét hivatalos neve: *Országos Középiskolai Fizikatanári Ankét és Eszközbemutató*.

A modern korról lépést tartva 2005 januárjától a szakcsoportnak saját honlapja van, amelyen nyomon lehet követni a szakcsoporttal kapcsolatos eseményeket. A honlap elérhető az ELFT honlapjáról (<http://www.elft.hu>) vagy közvetlenül a <http://www.kfki.hu/elftkisk> címen.

50. Országos Középiskolai Fizikatanári Ankét és Eszközbemutató, Szeged

A rendezvényen szeretnénk megemlékezni az eltelt 50 évről, ezért kérünk mindenkit, aki emlékeket őriz, ossza meg a résztvevőkkel. A szegedi ankét után egy összefoglaló kiadványt szeretnénk készíteni, amelyben összegeznénk az előző ankétok eseményeit.

A szegedi ankét témája: *Elektromágneses hullámok*.

A plenáris előadások helye a Szegedi Tudományegyetem AOK Oktatási Épülete. A műhelyfoglalkozások, a kiállítások és a szállások az egyetem közelében lévő intézményekben lesznek. Az előadások az elektromágneses hullámokkal, a szegedi kutatásokkal és az oktatás aktuális problémáival foglalkoznak.

Sajnos, az eszközbemutatón résztvevők száma az utóbbi években jelentősen csökkent. Reméljük, hogy ez a negatív tendencia Szegeden nem fog folytatódni. A szervezők igyekeznek mindent megtenni a jubileumi rendezvény sikeréért, szeretnénk egy rangos, az előzőekhez méltó ankétot szervezni.

Mester András

Irodalom

Középiskolai fizikatanárok országos ankétjai és eszközkészítései.
Fizikai Szemle 7 (1957) 301, 8 (1958) 131, 9 (1959) 220, 10 (1960) 317, 11 (1961) 258, 18 (1968) 21, 41 (1991) 455

sítése. Különösen a gravitációs kölcsönhatás „lóg ki a sorból” – úgy látszik, annak befoglalása csak a 10-dimenziós szuperhúrelméletben sikerül. Ez utóbbi megoldás további előnye, hogy nemcsak egyesíti a természeti törvényeket, de „elegánsan” is fejezi ki őket a 10-dimenziós tér formalizmusában. Ebben a 10-dimenziós úgynevezett szuperhúrelméletben az elemi részecskék nem pontszerűek, hanem zárt végű hurkok („gyűrűk”). Ezek mérete a Planck-hossz nagyságrendjébe (10^{-33} cm) esik, és rezgési mintázataik határozzák meg az elemi részecske tulajdonságait.

Sajnos az elmélet „számos sebtől vérzik”. Az talán még a legkisebb baj(!), hogy a 10-dimenziós teret nem tudjuk elképzelni, és, hogy tulajdonképpen ellenkezik a józan ésszel, csupán matematikai formalizmusnak tűnik. Azért mondjuk, hogy ez a legkevesebb, hiszen, ha máshol nem, a kvantummechanikában megszokhattuk, hogy a „józan ész”, a szemléletesség és az elképzelhetőség hiánya nem igazán hasznos szempontok. Hadd idézzem ezzel kapcsolatban például *Heisenberget*: „...az atom szerkezetét nem lehet szemléletesen leírni...” *J.D. Barrow* még tovább megy: „A kvantumelmélet feltárta, hogy a mikrovilág legmélyebb törvényei különös, megfigyelhetetlen dolgok viselkedését szabályozzák. Ez a szemléletességnek és a »józan észnek,« mint a tudomány két megbízható vezérelvének a végét jelzi.” Különben ne feledjük, hogy már a négydimenziós téridőt sem tudjuk elképzelni, amelyben a speciális relativitáselméletet megfogalmazzuk. De ezen már senki nem lepődik meg. A legnagyobb baj az, hogy hiányzik a kísérleti bizonyíték a szuperhúrelmélet igazolására, és ilyenek

a ma elérhető energiatartományokban nem is várhatóak, ilyenekről csak a Planck-energia környékén lehet szó (10^{19} milliárd eV). De más baj is van! Hiányzik az egész elméletnek az az alapelve, amely az általános relativitáselmélet ekvivalenciaelvének megfelelője, azaz nem ismerjük a szuperhúrelmélet alapjául szolgáló fizikai elvet. Nem tudunk arra sem választ adni, hogy miért éppen a 10-dimenziós tér a legalkalmasabb az összes kölcsönhatás és természeti törvény leírására. Bizonyos problémák jelentkeznek az alkalmazandó matematikával kapcsolatban is. A topológia eredményeit felhasználják, de valójában új matematikára van szükség.

Mindez többféle közelítésben, többféle kifejtésben és hangsúllyal, bizonyos ismétlésekkel található meg a könyvben, és az egész elolvasása után nagyjából kibontakozik a teljes kép. Természetesen sok mást is találunk a könyvben, így mindenek előtt a relativitáselmélet és a kvantummechanika alapjai kerülnek felvázolásra, de szó van fekete lyukakról és az ősrobbanásról, vagy az antropikus Világegyetemről, a Földbe csapódó óriás meteoritok pusztításairól, nem utolsósorban pedig a – könyv alcímében is szereplő – párhuzamos univerzumok végtelen halmazáról.

Egyes helyeken a könyv kifejezetten súrolja a sci-fi határát. Például ahol az I., II. és III. típusú civilizációkról ír. Most még csak a 0. típusúban élünk, de „egy III0. típusú civilizáció számára, amelynek a megszámlálhatatlan csillagrendszer és talán a galaktikus mag energiája is a rendelkezésre áll, a tizedik dimenzió uralása reális lehetőséggé válik”.

Berényi Dénes

HÍREK – ESEMÉNYEK

A TÁRSULATI ÉLET HÍREI

Örökifjú, megújuló fizika! – Fizikus Vándorgyűlés 2007

A szombathelyi Vándorgyűlés után, három év elteltével az Eszterházy Károly Főiskola, Eger városa és az ELFT Heves megyei szakcsoportjának meghívását örömmel elfogadva 2007. augusztus 22–24. között Egerben találkoznak a konferencia résztvevői.

A választott mottó kifejezi, hogy a hazai fizika közösségének e legátfogóbb eseményét a tehetséges fiatal kutatók megismerésének fórumává kívánják alakítani. A szakcsoportok javaslatára felkért, az elmúlt három év legjelentősebb irányzatait megjelenítő meghívott előadások mindegyikét egy-egy nemzetközileg elismert neves kutató mutatja be. E témakörökhez lazán-szorosabban csatlakozva a szervezők várják az elmúlt 5 évben tudományos (PhD) fokozatot szer-

zett fiatal kutatók jelentkezését. Témánként 2–4 fiatal bemutatkozását tervezik.

Megnyílt a Vándorgyűlés www.elft.hu/vandor07 honlapja. A jelenleg ismert részvételi feltételek ott olvashatók. A szervezők kérik, hogy a további információk közvetlen megküldését igénylő kollégák, különösen az előadást ajánló fiatal kutatók, mielőbb végezzék el a honlapon az előzetes regisztrációt!

A főbb témakörök és a felkért előadók

Bíró László Péter (MTA MFA): Mit tanítanak a lepkek az anyagtudósoknak: Fotonikus kristályok?

Bor Zsolt (SzTE): Femtoszekundumos lézerek és szuperlátás

Bottyán László (MTA RMKI): Neutron- és Mössbauer-reflektometria a vékonyréteg-mágnességben

Csabai István (ELTE): Az Univerzum szerkezete és az SDSS felmérés

Frey Sándor (FÖMI), *Mosoni László* (MTA CsKI): A csillagászat nagyfelbontású eszközei

Kertész János (BME): Hálózatok fizikája

Krasznaborkai Attila (MTA ATOMKI): Egzotikus atommagok

Márka Szabolcs (Columbia Univ.): Gravitációs hullámok a LIGO-tól a LISA-ig

Mihály György (BME): A klasszikus és kvantum határán

Pellet Sándor (OSSKI): Ionizáló sugárzások orvosi haszna és kockázata

Pusztai László (SzFKI): Diffrakciós mérések értelmezésének új módszerei

Siklér Ferenc (MTA RMKI): A kvarkanyag előállítása

Trócsányi Zoltán (DE): Higgs-bozonok nyomában az LHC-nál

Vásárhelyi Balázs (BME), *Kovács László* (Kútfej Bt.): A radioaktív hulladékok végleges elhelyezése – a hazai és nemzetközi gyakorlat

A fizika jövőjének két meghatározó kérdése meghívott előadással szerepel (előadók felkérése folyamatban van):

– Fizika és vállalkozás

– A fizika vonzó tanítása a közoktatásban

Eger város közönségének – nyilvános eseményként, *Kiss Ádám* (ELTE) szervezésében – a *Tudomány és áltudomány párviadala a környezetvédelemben* című esti programot nyújtja a Vándorgyűlés.

Tiszteletbeli tagság

Rajkovits Zsuzsannát, az ELTE Fizikai Intézet Anyagfizikai Tanszékének docensét nemzetközi versenyek alapításáért és szervezéséért, a középiskolás diákok és egyetemi hallgatók tehetséggondozásában másfél évtizede végzett folyamatos, eredményes munkájának elismeréseként az angliai Institute of Physics 2007.

januári tanácsülésén tiszteletbeli tagjává (Fellow of The Institute of Physics, FInstP) választotta.

Ugyanilyen elismerésben részesült *Kenesei Péter*, az Anyagfizikai Tanszék fiatal segédmunkatársa, aki korábban sikeres versenyzőként, az utóbbi években már szervezőként vesz részt a versenyeken.

Felhívás a határainkon kívül élő, magyarul tudó fizikusokhoz, fizikatanárokhoz és fizikát tanuló egyetemistákhoz

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat minden magyarul gondolkodó-olvasó-beszélő fizikus, fizikatanár és minden, fizika tanulmányokat folytató egyetemi hallgató fóruma, szervezete kíván lenni. A tagdíj fejében havonta küldött – évente mintegy 1000 könyvoldalnak megfelelő terjedelmű – *Fizikai Szemle* rendszeres tájékoztatást ad a fizika kutatásának és tanításának aktualitásairól. A Szemle postán jut el tagjainkhoz, azonban a világ más tájain, távol élő magyar fizikusokhoz, sajnos, így nehézkesen, késve – néha hiányosan – érkezhetsz meg a folyóirat. Ezért döntött úgy a Társulat elnöksége és a Szemle szerkesztősége, hogy a jövőben, külföldön élő tagjainak, előfizetői-

nek kívánságára, elektronikusan is hozzáférhetővé teszi a teljes Szemlét.

Bármilyen távol is él hazánktól, éves 30 euró tagdíj fejében Ön is *bekapcsolódhat a magyarországi fizika, fizikusok, fizikatanárok életébe*.

Megrendelését, belépési szándékát jelezheti a mail.elft@mtesz.hu címen.

Ismer külföldön élő magyar fizikust, fizikabaratot, fizika tanulmányokat folytató egyetemistát?

Ha igen, kérjük, küldje el neki e felhívást, vagy adja meg a Társulat titkárságának (mail.elft@mtesz.hu) ismerőse e-mail-címét, hogy felvehessük vele a kapcsolatot.

Eötvös Loránd Fizikai Társulat

HÍREK A NAGYVILÁGBÓL

Méhekkal a bombák ellen

A Los Alamos Nemzeti Laboratórium kutatói módszerrel dolgoztak ki arra, hogy a méheket betanítsák robbanóanyagok felderítésére. Az új technika rendkívül alkalmas eszköz az improvizált robbanóanyagok

(IED, improvised explosive device) elleni harcban, amely a külföldön állomásozó amerikai csapatokra és a civil lakosságra leselkedő legnagyobb veszélyforrás. A méhek viselkedésének tanulmányozása

során kiderült, hogy a méhek rendkívüli szaglőérzéke a virágnektár észleléséhez egy reflexet, a proboscis extension reflexet társítja, amely a nyelv kiöltésében nyilvánul meg. Pavlovi reflextechnikát használva a méheket be lehet tanítani arra, hogy különböző robbanóanyagok, mint TNT, C4, TATP, valamint egyéb tűz- és robbanásveszélyes anyagok gőzeinek észlelésekor hasonlóképpen reagáljanak. Az így betanított méhek viselkedése jelzi a veszélyes anyagok jelenlétét.

Tim Haarmann, a Stealthy Insect Sensor Project projekt vezetője szerint a kutatók már régóta csodálják a méhek hihetetlenül érzékeny szaglőképességét, mely a kutyákéval vetekedik, azonban csak most sikerült megfelelő módszerekkel ezt a tulajdonságot gyakorlati célokra felhasználni. A kutatócsoport a vizsgálatok során arra is igyekszik fényt deríteni, hogy a detektálás határfokát mennyivel csökkenti más, zavaró vegyi anyagok, például kozmetikumok, olajok, valamint rovarirtókerek jelenléte. (www.lanl.gov)

Új röntgenmikroszkóp-technika nanométeres skálán

Az amerikai Argonne Nemzeti Laboratórium kutatói az Xradia Inc. céggel együttműködve új technikát fejlesztettek ki, amely a röntgenreflexiót nagyfelbontású röntgenmikroszkópiával kombinálva nanométer skálán képes az anyag szerkezetét észlelni. Az új leképezési technika segítségével jobban megérthetőek lesznek a felületeken lejátszódó reakciók, mint például adszorpció, korrózió, vagy különféle katalitikus reakciók. A módszer jelentősen megnöveli a röntgenmikroszkópia teljesítőképességét nanométer skálájú vagy annál kisebb méretű szerkezetek közvetlen, valós idejű megfigyelésében. Ez a roncsolásmentes vizs-

galati módszer alkalmas kiegészítése a széles körben használatos szkenningszkópia, és közvetlenül vizsgálhatja a szilárd felületek topográfiáját. A kutatók a röntgenoptikára és röntgenmikroszkópiára specializált Xradia Inc. céggel együttműködve nanométernél kisebb szerkezeteket is észleltek a mikroszkópiában már korábban felhasznált fáziskontraszt jelenségének segítségével. Ez az áttörés lehetővé teszi, hogy egy szilárd test felületének apró részleteit közvetlenül észleljék egy korábban az elektronmikroszkópiában használt technika segítségével hívásával.

(www.anl.gov)

MINDENTUDÁS AZ ISKOLÁBAN

NANOTUDOMÁNY, NANOTECHNOLÓGIA

A nanotudomány – amely az anyagtudománynak új, vagy talán „csak” újszerű, fejezete – mibenlétének megvilágításához az anyagtudományból, anyagtechnológiából indulunk ki. A technológiáknak két alaptípusa van. Az egyiket „lebontó”-nak nevezhetjük. Ez dominálta az ősi tevékenységeket, mint például a pattintott kőszerszám előállítását, de ilyen az esztergálás is. Hogy ma kevésbé kedveljük az ilyen jellegű technológiákat, annak elsősorban energia- és anyag-gazdálkodási okai vannak.

Az „építkező” technológiáknál a folyamat fordított: itt a kívánatos anyagszerkezetet kis egységeként, akár atomokként – erre *Feynman* már 1957-ben igyekezett a figyelmet ráirányítani – lehet felépíteni. Erre is hozhatunk példákat a modern technológiák köréből, például rétegbevonatok előállítása, de a mondandónk szempontjából legfontosabb analógia, sőt, példa a növényi élet, ahogy a Nap energiájának közvetlen hatására létrejön, növekszik, virágot nevel stb.

A nanotechnológiának ez az „építkező” technológia alkotja a *leglényegét*. Ennek két szintje definiálha-

tó. Az egyik a pásztázó szondás módszerek családjának preparatív alkalmazása – az ötlet megvalósítása a nanotechnológiai gondolat szülőanyjaként is tekinthető. A család Nobel-díjat is szerző tagja az alagútmikroszkóp (Scanning Tunneling Microscope, STM) – de főleg „anyagmegmunkálásként”. Az STM-ben, a tárgyhoz néhány atomnyi távolságra közelített, atomi méretekben hegyes fémcsúcsba „átugráló” elektronok áramát mérjük helyről helyre. Az atomi felbontáshoz vezető nagy trükk nem is a tű hegyezése, hanem a tűnek atomi méretekben finom közelítése, valamint a tárgynak ugyanilyen finom „előtolása” volt. Ez az ötlet sem volt teljesen új: régóta ismert a kvarcóra, amelyben a rezgő kvarckristály úgy „vezérli” az elektromos rezgést, hogy közben a térfogata is duzzad, illetve zsugorodik. A „piezokerámiák” fejlesztése meghozta a precíz mozgatásra is alkalmas piezoelektromos eszközt (l. Márk G., *Fizikai Szemle* 56 (2006) 190).

Az STM ötlete katalizálta a gondolatokat, és a piezokerámiás mozgatót hasznosító pásztázó szondás módszereknek egész arzenálja fejlődött ki jó egy évti-

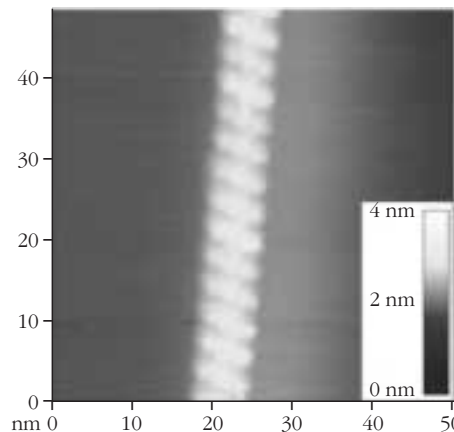
zed alatt: a legelterjedtebb a pásztázó erőmikroszkóp (Atomic Force Microscope, AFM), amely előbb a van der Waals-féle vonzó erőket, a további közeledéskor pedig a Coulomb-taszítást használja a domborzat láthatóvá tételére. Az AFM képes működni akár folyadékkal borított felületeken is! Érzékeny elektronikával jó felbontású, helyi elektromos kapacitásmérés is végezhető. Kifejlesztették a fókuszált (lézer)fénnyel működő, pásztázó elvű optikai mikroszkópot is, amelyre a képfelbontást korlátozó, fényelhajlási törvények nem jelentenek olyan éles korlátot.

Ezen eszközök létrejöttével az emberiség kezébe nemcsak új, atomi felbontást lehetővé tevő vizsgálati eljárások kerültek, de a „szondáknak” az anyaggal való kölcsönhatása képes a felületen atomokat céltotán el is mozdítani, el is helyezni – tehát atomi szintű preparatív eszközökként is használhatók! Világos azonban, hogy egy-egy, de akár „könnyen megszámlálható” számú atom célszerű elhelyezése is csak modellekísérletként alkalmas.

Termelésre, azaz sok atom kontrollált mozgatására – átfogó elnevezéssel – az önszerveződés jelensége alkalmas. Ezen azokat a jelenségeket értjük, amelyeknél a természeti törvények elrendezik az elemeket, atomokat, molekulákat. Mondhatja a T. Olvasó: „A kristályosodás is ilyen jelenség, mert az is »elrendezi« az atomokat.” Nanotechnológiáról akkor beszélünk, ha a természeti törvények atomcsoportok, vagy esetleg néhány száz atomos egységek, illetve nagyobb molekulák elrendeződését idézik elő.

Érthető, hogy emiatt mondják például a kolloidkémikusok, hogy ők mindig is „nanotechnológiát csináltak”. Ez csak majdnem a teljes igazság. Korábban a kémiában ugyanis nem volt kulcskérdés, hogy *helyileg* hogyan a zajlanak a reakciók, csak jöjjön létre a kívánt gél, mono- vagy polimér stb. A nanotechnológia ezzel nem elégszik meg: olyan feladatokat tűz maga elé, hogy akár egyetlen molekulát tudjon célba juttatni, például orvosi alkalmazásoknál. Ehhez képesnek kell lennünk meg is találni azt az „egyetlen” molekulát, majd parancsot adni annak és csak annak. Azaz a térbeli önszerveződést is el kell érni. Ez nagy és új kihívás a nanotechnológiai kémiának. Különösen igaz, ha a nanotechnológiát „nanoelektronika”-ként akarjuk a szolgálatunkba állítani.

A nanotechnológiával kapcsolatban az a vízió elevenedik meg, amit akkor érezhetett az idősebb olvasó, amikor jó pár évtizede a grafit interkalációjáról hallott: ez az a jelenség, amikor az egymással lazán kapcsolódó grafit síkok közé más, például alkáli atomokat sikerült a vegyészeknek „becsempésznüik”. A fullerénnek nevezett, 60 darab szénatomból álló „labda” felfedezésekor is rögtön kínálkozott, hogy a belsejébe – mint egy „nanodobozba” – atomokat, molekulákat zárjunk, és azokat szükség szerint engedjük ki. A nanotechnológia gyógyászati alkalmazásaként önként kínálkozik a „nanoenkapszulálás” mint eljárás: hogy a gyógyszermolekula a tetthelyen szabaduljon ki a „kapszulából”, miután az érzékelő csápok jelt adnak, hogy feloldódhat a védőréteg.



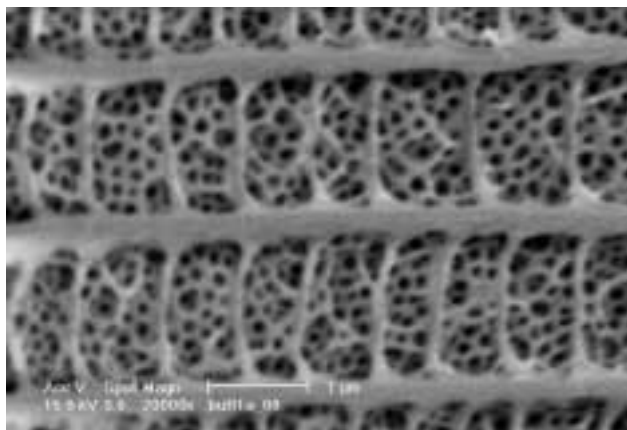
1. ábra. Hengerspirál alakú fulleréncső

A karakterisztikus méretek nanométerekekre való csökkentése sok és gyakran váratlan jelenséget is eredményezett. Néhány példán mutatjuk be ezt – a nanotechnológia több területéről válogatva. Kezdjük a szerves világgal: az olvadáspont-csökkenés jelenségével. Az olvadás felületi energiával is kapcsolatos jelenség: a felületen lévő atomok lazább kötésük miatt könnyebben kerülnek át az olvadékba. Ha a szerkezet „nanokristályos”, a felületszerű részeinek aránya a térfogathoz viszonyítva sokszorosa a makroszkóposnak. Érthető, ha ez az olvadáspontnak – akár több tíz Celsius fokkal való – csökkenéséhez vezet.

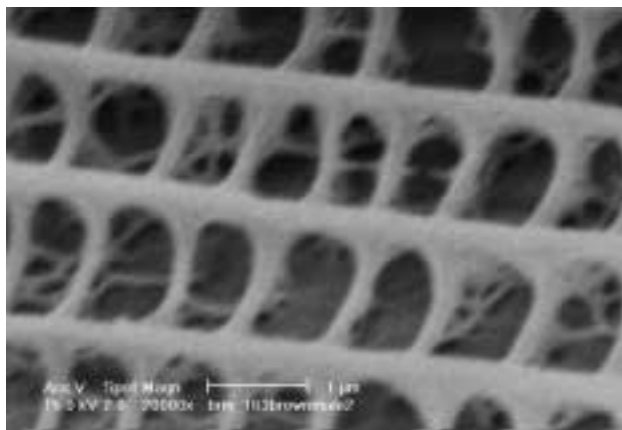
A fullerénről volt szó, a szén nanocső is rokon vele: az „egyfalú” változat a két végén fél-fél fullerénnel lezárt, grafénszerű szénecső. Ha a szabályos hatos gyűrűk helyére ötös vagy heptag gyűrűket építünk be, a keletkező mechanikai feszültség hatására például hengerspirál alakú cső keletkezik (1. ábra).

Szemléletes példákat hozhatunk az optika területéről is. Akár találós kérdésként is feltehető: mennyi fényenergia megy át egy – mondjuk – a felület 20%-ában „nano-lyukacsos” – amelyen a lyukak átmérője kisebb a fény hullámhosszánál – fémlemezen? Kiderül, hogy amit a kisméretű akadályokon való fényszóródásról, interferenciáról tanultunk, az itt nem érvényes. Nem hogy 20%-nál kevesebb, de éppen több fényenergia jut keresztül az ilyen szítán. Fontos azonban, hogy a lemez fémből legyen.

Egy másik érdekesség. A kétdimenziós réseken létrejövő interferencia képleteit ismerjük. Háromdimenziós (3D) rácsokon új jelenségekkel találkozunk. Ha fehér fényel világítjuk meg ezt a finomszerkezetű rácsot, lesznek olyan hullámhosszú fénysugarak, amelyek nem tudnak áthatolni a szerkezeten, hanem visszaverődnek. Hogy ilyen már a T. Olvasó is látott? Biztosan. Az élővilágban a „gyöngyház fényű” színek így állnak elő! Ha mikroszkópba tesszük a kérdéses élőlények ilyen szöveteit, nem színeket, hanem a fény szórására alkalmas, finom-, azaz nanoszerkezetet látunk! Ezeket a szerkezeteket fotonikus kristályoknak nevezik, mert – a kristályok elektronjainak analógiájára, ahol szintén vannak tiltott energiájú, azaz a rácsban mozgásképtelen elektronok – egyes fényhullám-



2. ábra. Színjátszó lepkeszárnypásztázó mikroszkópos képe (Vértessy Z., MFA, felvétele)



3. ábra. Egyszínű lepkeszárnypásztázó mikroszkópos képe (Vértessy Z., MFA, felvétele)

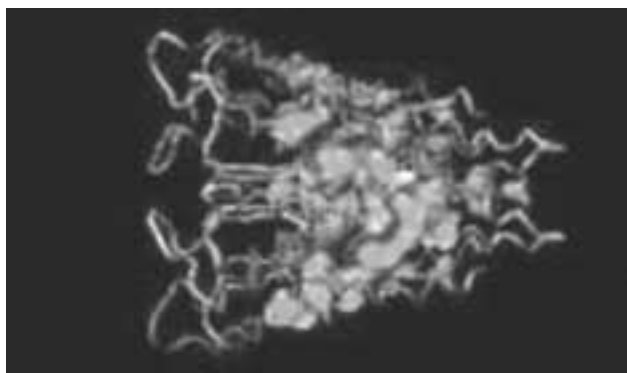
hosszakra tiltott az áthaladás. A 2. ábra ilyen nanoszerkezetes lepkeszárnypásztázó mikroszkópos képét mutatja.

Nagyon érdekes, hogy a kedvezőtlen körülmények között (pl. magas hegységben) élő egyedek elvesztették a nászruhájukat és csúf barnák (3. ábra), de megnőtt a túlélési esélyük: azonos napsugárzás hatására a testhőmérsékletük 6–8 °C-kal magasabb!

A nanotechnológia művelői érzik, hogy ez a tudományos-műszaki ág életünk rengeteg területén lehet és lesz meghatározó. Amiatt is remélhető, mert ezzel a termelés leginkább anyag- és energiatakarékos formáját találjuk meg – minél többet és sikerrel tanulunk el például a növényi élet modelljéből.

A közepesen fejlett országokban talán a kémia, az ipari bevonatok, a biológia, a gyógyszeripar, az orvosi terápia területén lehet az első, tömeges alkalmazás. A fejlett országokban azonban a kvantumszámítógép kifejlesztése is a fő prioritások között szerepel. Egyik fejlesztés alatt álló elképzelés D. Jamieson (Melbourne) ötlete: a Kane-rendszerű nanokomputernél, a ^{28}Si -rétegbe implantált egyedi, egymáshoz közeli, így kölcsönhatásban lévő foszforatomok spinjét (amelyek qubitet alkotnak) vezérlik majd az elektródok. A „qubit” a „bit” kvantum-analagonja, amely nem csak 0 és 1 állapotokat tud felvenni, hanem a hullámfüggvények szuperpozícióit is. Az ezzel „számoló” eszköz, mint hatványozottan összekapcsolt párhuzamos komputer működik, majd, talán évtized(ek) múlva.

4. ábra. Stresszprotein



Credo...

Ha néha meg is feledkezünk róla, a 21. század alapkérdése az energia, annak gazdaságos előállítása, az azzal való takarékos gazdálkodás. Ennek érdekében minden emberi technológiát újra kell gondolni, hogy

- azonos feladatot kevesebb energiával, anyaggal végezzen, és
- zárt termelési–fogyasztási folyamatok tüntessék el a hulladékot.

Ebben tud teljesen újat hozni a nanotechnológia.

A Credo másik része a „multidiszciplína”: sok területen szinte eltűnnek a természettudományok határai, sőt, közérdek, hogy valami hasonló történjék a közeljövőben a biológiával, mint ami a 20. század első felében a kémiával történt, amikor a fizika, a matematika belevonult és ott „kémiává” vált. Most a biológiát kell átalakítanunk.

A paradigmaváltás két szintje tehát:

- nem csak a fizikai–kémiailag metodikák bevétele, alkalmazása az élő rendszerekre,
- hanem az élettelen természettudományok gondolkodásmódjának, azaz az első elvekre való visszavezetésnek a célul tűzése.

Mire gondolok? A mérnöki–fizikusi gondolkodásmódot kell bevezetni a biológiába – hogy kevesebb antropomorfizmus legyen benne („az élőlény alkalmazkodik...” – nem így igaz: csak a kevésbé alkalmas elpusztul...).

Képzeliük el ezen a módon például a csöves csontjainkban keletkező, komplikált gombolyag, a stresszprotein működését (4. ábra).

Megtalálja a sérült fehérjét, de hogyan? Detektálja a fehérje-szekvencia hibás voltát, de hogyan? Átadja a saját testének egy megfelelő részét – milyen energetika vezérli, mi is van a termodinamikával? Hiszen tudjuk, hogy csak atomi erők (van der Waals, hidrogén-kötés, kovalens-ionos kötés – végülis Coulomb-erők) szerepelhetnek.

Ennek megértését reméljük a biológia–kémia–fizika–informatika–matematika új életétől, amelyben a „nano” az egyik kulcs-, de legalábbis főszereplő.

Gyulai József, MTA MFA

SZERZŐINK FIGYELMÉBE

A *Fizikai Szemle* hangsúlyozottan szakmai *tudományos ismeretterjesztő* folyóirat, melyben egy ma végzett fizikus vagy tanár szakos kolléga számára *érthető* módon kapnak helyet a fizika és a rokon tudományok legújabb eredményei, valamint a fizikatörténettel és -tanítással foglalkozó értékes írások. A *Szemle* beszámol továbbá a fizikusok és fizikatanárok számára érdekes hazai és külföldi hírekről, eseményekről és könyv-újdonságokról is. A fenti cél érdekében tesszük közzé szerzőinknek tartalmi és formai követelményeinket.

Tartalmi követelmények

A folyóirat új, eredeti tudományos munkákat nem közöl. A leadott írások ne vesszenek el a tárgyalt témakör részleteiben, az általános színvonal legyen érthető. A kéziratokban kerüljék az idegen szakkifejezéseket, szerzőink inkább azok magyar megfelelőjét használják. Kérjük továbbá szerzőinket, hogy a matematikai levezetések közlésétől tekintsenek el, az ilyen részletek és a cikk hosszabb változata felkerülhetnek a folyóirat honlapjára (www.fizikaiszemle.hu), és a nyomtatott változatban a szerzők szándékuk szerint természetesen hivatkozhatnak erre. A tanulmányokban a szerzők legfeljebb néhány, lehetőleg magyar nyelvű irodalomra hivatkozzanak, de inkább várjuk a téma továbbgondolását szolgáló honlapcímeket.

A tudományos ismeretterjesztő cikkeken kívül ismertetőket közlünk a fizikával kapcsolatos eseményekről (pl. a társulati és az akadémiai élet hírei, beszámolók ankétokról stb.), várjuk az ehhez kapcsolódó írásokat is. Tudósítunk fizikával kapcsolatos pályázatokról, ha időben értesítik a szerkesztőséget. Beszámolunk érdekes előadásokról, konferenciákról, előadás-sorozatokról.

A fizika tanításával kapcsolatban közlünk általános érdeklődésre számot tartó, a módszertani megújítást segítő dolgozatokat, ismertetjük a különböző versenyek érdekesebb feladatainak megoldását.

Továbbra is figyelemmel kísérjük az olvasóink érdeklődési körébe eső könyveket, az ezekről szóló ajánlásokkal segítjük a tájékozódást.

Másutt már megjelent dolgozatot azonos formában nem közlünk.

Formai követelmények

Csak Word vagy LaTeX szövegszerkesztővel készített és elektronikusan (szerkesztok@fizikaiszemle.hu) beküldött dolgozatokat fogadunk el. A szerkesztők munkáját segíti, ha pdf-formátumban is benyújtják a kéziratot, de csak pdf-formában leadott szöveget nem fogadunk el. A szerkesztőkkel való kapcsolattartás megkönnyítésére kérjük, hogy a kéziratban a szerző tüntesse fel elektronikus, telefonos és postai elérhetőségét is.

A kézirat maximális terjedelme ábra nélküli cikkek esetén négy *Szemle*-oldal (kb. 20–21 ezer leütés), ábrákat is tartalmazó cikk esetén öt oldal lehet. Hosszabb cikkek folytatásos közlése a *Fizikai Szemlében* nem lehetséges.

A szerzők minden esetben tüntessék fel teljes nevüket, valamint munkahelyüket, ennek hiányában lakóhelyük nevét.

A kéziratban jól felismerhetően kijelölendők az alcímek, azok egymáshoz való viszonya (betűmérettel, kövér, dőlt, aláhúzott stb. módon). Az alcímeknél decimális megkülönböztetés nem alkalmazható.

A táblázatok sorrendjét arab szám jelöli, a táblázatok az azok tartalmára utaló fejszöveggel kell ellátni.

Az ábrák jelölése arab számmal történik, az ábrákhoz magyarázó ábraalírás szükséges. Az ábrákban levő szövegek magyar nyelvűek legyenek, vagy fordítását mellékeljék a szerzők. Ügyeljenek arra, hogy megadják a grafikontengelyek jelentését. Kérjük, hogy ügyeljenek az ábrák jogtisztaságára, a lehetőség szerinti legjobb minőségű forrást kérjük szerzőinktől. Megköszönjük, ha érdekes és jó minőségű képpel-ábrával segítik a címlap elkészítését.

A kéziratban szereplő neveket első előforduláskor, a műcímeket, az előadási címeket, a folyóiratneveket kurzív (*dőlt*) szedéssel kérjük jelölni. Az idézeteket idézőjelek közé téve álló kurrens (álló) betűvel kérjük megadni, a fontosnak ítélt szövegrészek kurzív (*dőlt*) betűtípussal emelendők ki.

A hivatkozást a szövegen belül szögletes zárójelben lévő arab számmal, több hivatkozás esetén tól-ig jelöléssel szerepeltessék. A szöveg végi irodalomjegyzék címe Irodalom, az egyes tételek arab számmal és azt követő ponttal jelölendők. Ezt követően a szerző(k) neve egymástól vesszővel legyen elválasztva, keresztnév csak betűvel jelölendők. Ezt követi a hivatkozott mű címe, a folyóirat teljes (nem rövidített) neve, kötetszáma, évszáma, oldalszáma, könyv esetén a kiadó neve, a kiadás helye és ideje.

A kézirathoz – lehetőség szerint – kérjük, csatoljanak tömör, néhány soros összefoglalót. A *Fizikai Szemle* honlapján a nem teljes terjedelemben megjelenő írásokra ennek segítségével hívjuk fel a figyelmet.