

fizikai szemle



2009/11

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

Főszerkesztő:

Szatmáry Zoltán

Szerkesztő bizottság:

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

Szerkesztő:

Füstöss László

Műszaki szerkesztő:

Kármán Tamás

A folyóirat e-mail címe:

szerkesztok@fizikaiszemle.hu

A lapba szánt írásokat erre a címre kérjük.

A folyóirat honlapja:

<http://www.fizikaiszemle.hu>

A címlapon:

A Nagy Magellán-felhőben
1987. február 24-én felfénylett
szupernóva a neutrínócsillagászat
kezdését jelentette. A kép a Hubble-
űrtávcső nagy látószögű kamerájával
készült 1994-ben. (NASA, Hubble
Heritage Team, STScI/AURA)

A hátsó borítón:

A CERN Nagy hadron-ütköztetőjében
2008. szeptember 19-én a kilyukadt
hűtővezetéken robbanásszerűen kifűjt
több tonna hélium. A károsodást,
a javítást és a 2009. november 20-i
újraindulást mutatja a képsorozat.
(Foto: CDS CERN)

TARTALOM

<i>Patkós András:</i> Csillagászat és részecskefizika	365
<i>Varga Péter:</i> A Jánossy-kísérletek – III.	371
<i>Földi Péter:</i> Kvantumos interferenciajelenségek nanoméretű gyűrűkben	378
<i>Ormai Péter, Hegybáti József:</i> Merre tart az Európai Unió a nukleáris hulladékok kezelése területén?	381
<i>Trampus Péter:</i> Az atomenergia alkalmazásáról – nem műszaki szemmel	385
<i>Horváth Dezső:</i> Igazából mi van az LHC-vel?	388

A FIZIKA TANÍTÁSA

<i>Kovács László:</i> Blaise Pascal, a francia kísérleti fizika megteremtője	391
Az Országos Szilárd Leó Fizikaverseny meghirdetése a 2009/2010. tanévre	396
Kutató lesznek egy napra – Részecskefizikai Diákműhely 2010	397

HÍREK – ESEMÉNYEK

<i>Takács Sándor:</i> Fizikai Nobel-díj – 2009	398
Emlékezés szóban és tettben... (<i>Füstöss László</i>)	399
A <i>Koppenbága</i> Budapesten (<i>FL</i>)	400

A. Patkós: Astronomy and particle physics

P. Varga: L. Jánossy's experiments – III.

P. Földi: Quantized interference phenomena in nanosize annular structures

P. Ormai, J. Hegybáti: How is the disposal of nuclear waste being attempted in Europe?

P. Trampus: The use of nuclear energy, as seen by laymen

D. Horváth: What happened at LHC?

TEACHING PHYSICS

L. Kovács: Blaise Pascal, the founder of French experimental physics

EVENTS

A. Patkós: Astronomie und Teilchenphysik

P. Varga: L. Jánossy's Experimente – III.

P. Földi: Gequantelhe Interferenzphänomene in Ringstrukturen der Nano-Größenordnung

P. Ormai, J. Hegybáti: Wie wird die Entsorgung von Kernenergie-Abfällen
in Europa angestrebt?

P. Trampus: Die Nutzung von Kern-Energie in der Sicht von Laien

D. Horváth: Was war eigentlich am LHC los?

PHYSIKUNTERRICHT

L. Kovács: Blaise Pascal und die Anfänge der französischen Experimentalphysik

EREIGNISSE

A. Паткош: Астрономия и физика элементарных частиц

II. Varga: Эксперименты Л. Яноши – III.

II. Фöldi: Квантовые явления интерференции в кольцевых структурах
нанометрового порядка

II. Ор-май, Й. Хегьбати: Прогрессы обхождения с радиоактивными отходами в
Европе

II. Трампус: Применение ядерной энергии – глазами неспециалистов

Д. Хорват: Что же действительно было с LHC?

ОБУЧЕНИЕ ФИЗИКЕ

Л. Ковач: Блэз Паскал и основы экспериментальной физики в Франции

ПРОИСХОДЯЩИЕ СОБЫТИЯ

Fizikai Szemle
MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

megjelenését anyagilag támogatják:



nka
Nemzeti Kulturális Alap

mym
paksi atomerőmű

NCA
Nemzeti Civil Alapprogram



Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

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

LIX. évfolyam

11. szám

2009. november

CSILLAGÁSZAT ÉS RÉSZECSEFIZIKA

Patkós András
ELTE Atomfizika Tanszék

A gyakran hallott állítás, hogy a két tudományterületen folyó kutatások szorosan összekapcsolódnak, leginkább a következő jelenségekre alapozható:

- a csillagokban zajló nukleáris reakcióhálóban akár stacionárius csillagállapotban, akár a szupernóva-robbanásokban a részecskefizikai kutatás számára elsősorban érdekes elemi részecskék keletkeznek;

- a Világegyetem nagy anyagsűrűségű kompakt objektumainak belső szerkezete, amely az elemi kölcsönhatásokra alapozva érthető meg, lényegesen befolyásolja megfigyelhető sajátjaikat;

- az Univerzum történetének korai, extrém nagy energiasűrűségű szakaszában létrejöhetnek hosszú élettartamú, igen kis intenzitással kölcsönható, nagy tömegű elemi maradványok, amelyek kézenfekvő jelöltek a csillagászatilag meggyőzően kimutatott sötét anyag alkotórészeinek szerepére.

Alább ebből a három kategóriából mutatok be egy-egy témát. Nevezetesen a neutrínóoszillációról, továbbá a kompakt csillagászati objektumok magja kvarkszerkezetének feltárását és a sötét anyag elemi kölcsönhatásainak kimutatását célzó kutatások helyzetéről lesz szó.

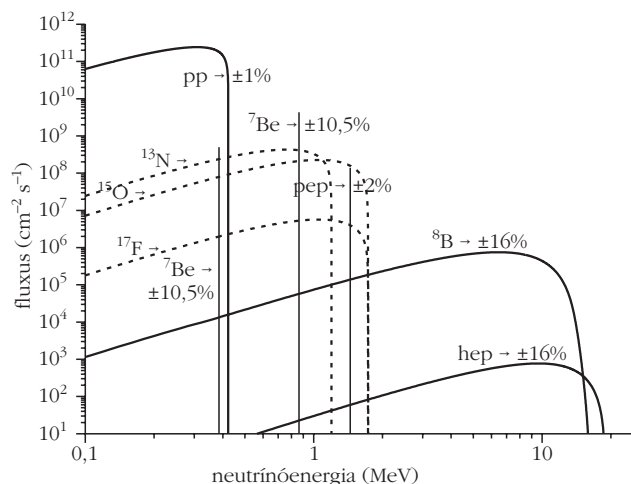
Tudatában vagyok annak, hogy a csillagászat klaszikus stílusú művelői számára ezek nem feltétlenül központi fontosságú témák. Sokuk kifejezetten félti az asztronómiát a részecskefizikai behatolástól. *Simon White*, a garchingi MPI für Astrophysik megfigyelő



csillagász igazgatója 2007-ben, amikor a kizárólag csillagászati eszközökkel megfigyelhető „sötét energia” köré szerveződött kooperáció került a NASA alapvetési projektjeinek élére, kemény hangvételű kritikát tett közzé [1]: „... ez a konvergencia káros lehet a csillagászat számára. A két közösség eltérő módszertant alkalmaz, tudományos kultúrájuk különböző. Kritikátlanul elfogadva egy idegen rendszer értékeit, a csillagászok kockára teszik jelenlegi sikereiket és területük jövőbeli életképességét. A sötét energia csillagászati eszközökkel történő vizsgálata tagadhatatlanul érdekes feladat, de csak egy a sok közül...”. A válasz nem késett soká. *Edward (Rocky) Kolb*, a Chicagói Egyetem részecskefizikus indulású asztrofizika professzora válasz-esszéjében [2] a két kutatási stílust összekötő két erős „szálnak” nevezte a sötét energia és a sötét anyag megismerésének kihívását. „Természetesen a két területnek vannak sajátos intellektuális és együttműködési hagyományai, amelyek egyike sem tekinthető ideálisnak. Két különböző kultúrájú szakterület egyike sem ítéltető önmagában jónak vagy rossznak; egy adott feladatra alkalmazva derül ki, hogy használhatóak-e vagy sem. A csillagászat és a részecskefizika közösségei előtti kihívás a legjobb hagyományaik összekapcsolását követeli.”

A részecskefizika jól reprodukálható események statisztikus értékelésével tesz kísérletet egy tipikus univerzum tipikus jelenségeinek értelmezésére. Ez a stílus tükröződik a részecskefizikai szemléletű asztrofizikai vizsgálati tervekben (pl. galaxistérképek alapján a látható anyag eloszlásának két- és soktest-korrelációs értékelése, amihez hasonló az Univerzum röntgenforrás-térképei vagy neutrínóobszervatóriumok segítségével a kozmikus neutrínóforrásokról megalkotandó globális-átlagos kép). Gyakran hangoztatott tény, hogy a kísérleti részecskefizikában az individuális kutatási hozzájárulás pontos körülhatárol-

A Csillagászat Nemzetközi Éve alkalmából az MTA XI. Osztálya által rendezett 2009. november 10-ei ülészakon tartott előadáson alapuló cikk. Apróbetűs részleteit a technikai kérdések iránt érdeklődőknek szánta a szerző.



1. ábra. A Nap neutrínóságzásának a Standard Napmodell alapján számolt spektrális teljesítménye Bahcall–Serenelli–Basu idézett munkájából.

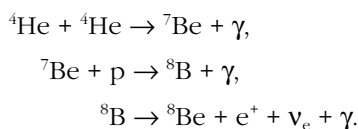
lása egyre nehezebb. A csillagászok erősen hangsúlyozzák a megfigyelt univerzum vagy annak akár egyetlen csillaga vagy galaxisa egyediségét, részletes tulajdonságai általánosíthatóságának nehézségét. Ehhez a szemlélethez látszik illeszkedni a megfigyelő személyiségének szerepét, akár egyetlen objektum kitarító megfigyelésére áldozott kutatói pályáját megbecsülő tudósképük.

Szerencsére, tudunk már olyan, vitathatatlanul tudománytörténeti jelentőségüként számon tartott kutatási eredményekre hivatkozni, amelyek a két kutatási terület összehangolt tevékenységét hasznosították. Elsőként elevenítsük fel a legnevezetesebb példát!

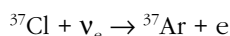
Neutrínócsillagászat

2002-ben a három részre osztott Nobel-díj felén *Raymond Davis Jr.* (1914–2006) és *Masatoshi Koshiba* (1926–) osztozott „úttörő hozzájárulásukért az asztrofizikához, különösen a kozmikus neutrínók észleléséért”. A részletesebb sajtóközlemény záró kulcsmondata a következőképpen fordítható magyarra: „Davis és Koshiba munkája váratlan felfedezésekhez és egy új, intenzíven kutatott területhez, a *neutrínócsillagászat* kialakulásához vezetett”.

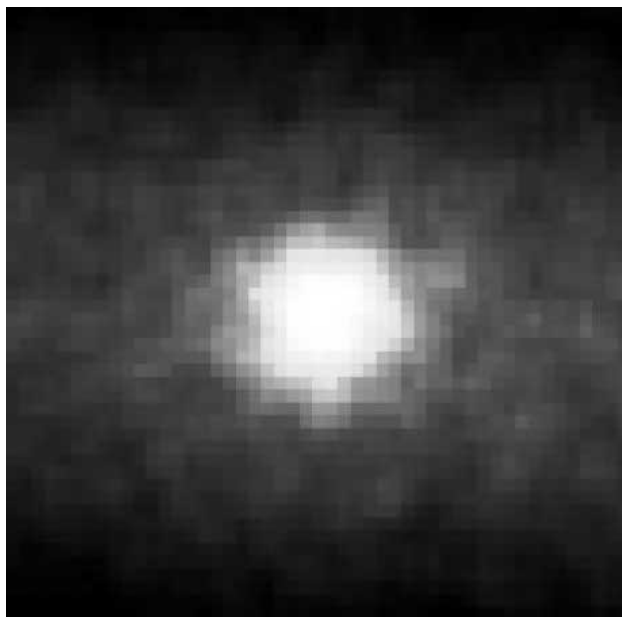
Davis kísérlete a Homestake-bányában tárolt széntetraklorid (CCl_4) felhasználásával a Nap magfúziós folyamatai során lejátszódó reakciósorban keletkező nyolcas atomszámú bór béta-bomlásából származó neutrínók kimutatását tűzte ki céljával:



Az észlelésre használt neutrínó-indukált reakció



volt. Bekövetkezésének kimutatása az argon-atomok kémiai kinyerésén alapult. A kísérlet végső változatát



2. ábra. A Nap képe a neutrínófluxus irány szerinti intenzitásának detektált eloszlása alapján.

1970-ben indították be és közel negyedszázadig működtették. 1998-ban közölték végső eredményét [3], miszerint 1970 és 1994 között 2200 argon-atomot nyertek ki az „uszodából”. *John Bahcall* (1934–2005) már 1964-ben elméleti becslést adott a Nap-neutrínók spektrális teljesítmény-eloszlására a fúziós reakcióháló adatainak akkori ismerete alapján. Az ő modelljét nevezik Standard Napmodellnek. A javuló mérési adatokkal folyamatosan korrigálva számolásait, 2005-ben az 1. ábrán látható spektrumot tette közzé [4]. A mai észlelési eredmények egybehangzóan mutatják, amit Davis már 1972-ben az első (balatonfüredi) Neutrínó-konferencián jelzett [5]¹: a Naptól érkező elektron-neutrínók fluxusa energiafüggő, de mindenképpen csak fele-harmada az előre jelzett értéknek.

A kanadai Sudbury-bányában 1000 m³ nehézvízzel töltött tartályban a Naptól érkező neutrínófluxust azok úgynevezett semleges és töltött árama révén egyaránt lehet észlelni. A 2001-ben elvégzett észlelés értékelése szerint a semleges árammal indukált reakció a Standard Napmodellel egyező fluxusértéket jelzett, míg a töltött áramú reakció Davis kísérletével megegyezően a várt fluxus harmadát mutatta. A látványos ellentmondást a *Bruno Pontecorvo* (1913–1993) és *Vlagyimir Gribov* (1930–1997) által már 1969-ben, a korai Davis-mérések értelmezésére ajánlott neutrínóoszilláció feltételezése oldja fel. Ezt az értelmezést azóta további három perdöntő érv is alátámasztja.² A kozmikus neutrínók észlelésének programja az elemi részek fizikájában egy alapvetően új, a részecskefizikai Standard Modellel túlmutató fejezet megnyitásában játszik kiemelkedő szerepet.

¹ A Nobel-díj részletes szakmai indoklása ezt a cikket is felsorolja Raymond Davis díjazott felfedezéseinek publikációi között!

² Lásd Ligeti Zoltán friss áttekintését a *Fizikai Szemle* 2009. októberi számában!

A Kamioka-hegységben Koshiba vezetésével az 1990-es évek közepére létrehozott SUPER-K neutrínó-observatóriumban H₂O-töltésű tartályban az elektron-neutrínók a víz elektronjain szóródnak, és a meg-lökött elektronok Cserenkov-sugárzását észlelik:

$$\nu_e + e \rightarrow \nu_e + e + \gamma.$$

Ez a technika lehetővé teszi a neutrínóforrás irányának meghatározását, sőt elég finom szögfelbontással és az intenzitáseloszlás hamis színezésével elkészíthető a Nap neutrínófényvel rajzolt képe [6] (2. ábra). A Nap ilyen módon való azonosítását az égbolton kétségtelenül neutrínócsillagászati észlelésként fogadhatjuk el.

Koshiba ¼ Nobel-díja kifejezetten a csillagászat és a részecskefizika kooperációjának első (nem-tervezett) példáját jutalmazta. A szenzációs megfigyelés 1987-ben történt, amikor a Kamiokande-detektor csapata eredeti célkitűzésén, a proton bomlásának megfigyelésén dolgozott. Koshiba párhuzamos célja a Nap-neutrínók valós idejű megfigyelése volt a fenti reakcióval. A detektor érzékenységének ehhez szükséges fokozását 1986 végére el is érte. Ettől kezdve a Cserenkov-detektorok folyamatosan működve a proton hipotetikus bomlása mellett a kozmikus neutrínók jelére is „figyeltek”.

A proton véges élettartamára vonatkozó elképzelések mindmáig nem igazolódtak, viszont 1987. február 23-án az observatórium spontán átalakult neutrínó-csillagászati berendezéssé.

A csillagászok február 24-én(!) észlelték a Nagy Magellán-felhőben felrobbant szupernóva fényét. A nukleáris fűtőanyagának kifogyása révén instabillá vált csillag gravitációs összeomlása egy sűrű objektum kialakulásával zárul. Az egyik lehetőség a neutroncsillag, amelynek elfajult, hideg neutron-anyaga Ferminyomásával ellensúlyozza a gravitációs vonzást. A robbanásban az összes fajta könnyű neutrínó és anti-neutrínó egyenlő mértékben keletkezik, részben inverz béta-bomlással, részben annihilációs reakciók

végtermékeként (utóbbiakban antineutrínók is keletkeznek). Ezek szállítják el a robbanás 10⁵⁹ MeV-re becsült energiájának 99%-át. Koshiba és munkatársai 1987. március 10-én küldték el beszámolójukat a *Physical Review Letters* szerkesztőinek arról, hogy a felfedezést egy nappal megelőzően egy 13 másodperces intervallumban megtalálták annak a 12 neutrínó által meg-lökött elektronnak a Cserenkov-lenyomatát, amelyek beérkezési irányuk és észlelésük időpontja alapján azonosíthatók voltak a felrobbant objektumból származó, négyzetcentiméterenként milliárdnyi neutrínót tartalmazó részecskeáramnak a detektorral kölcsönhatásba lépett kisszámú alkotórészével.

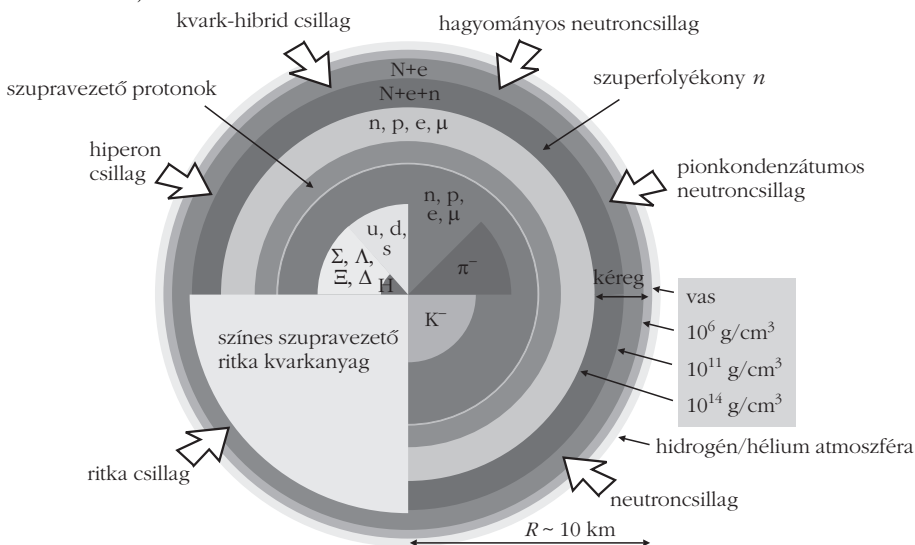
Ez az eset mintát ad a csillagászok elektromágneses (optikai, infravörös vagy röntgentartománybeli) megfigyeléseinek összekapcsolására a kevésbé hagyományos sugárzások észlelésével. Akár a neutrínók, akár a gravitációs sugárzás kibocsátása megelőzi a kozmikus robbanásokat követő elektromágneses energia-kisugárzást (az elektromágneses sugárzáshoz vezető felforrósodás a robbanáskor keletkező lökeshullámban következik be). Ezért e két egzotikus sugárzás perspektivikusan kiváló eszköze lehet a „korai riasztásnak”, amellyel teljesebbé válhat például a szupernóvák robbanási folyamatának vagy például a kettős objektumok összeolvadásának megfigyelése és ennek révén asztrofizikájuk megértése.

Egzotikus kompakt csillagászati objektumok nyomában

A szupernóva-robbanás említése az annak nyomán legtöbbször visszamaradó pulzárokkal átvezet a kompakt csillagászati objektumok világába, amelyek természetének megértésében várható, hogy a hideg, nagy sűrűségű maganyag mellett fontos szerep jut az erősen kölcsönható anyag részecskefizikai alkotórészei termodinamikai állapotgyenletének is.

Az erős kölcsönhatás termodinamikai elmélete óriási léptekkel fejlődött az elmúlt három évtizedben a kvantumkromodinamika megjelenése óta. Jóslatai alapján biztosra vehető, hogy a „neutroncsillag” kategóriája valójában különböző belső szerkezetű égitesteket fog át, amelyeknek közös jellemzője a maganyagét többszörösen fölülmúló sűrűség mellett a 10 kilométert nem meghaladó sugár. Az elképzelések sokaságát a 3. ábra érzékelteti legjobban, amelyen megkísérelték ábrázolni a neutron-„kéreg” alatt feltételezeten elkülönült fázist alkotó mag különféle hadron kondenzátumait. A

3. ábra. A neutroncsillag felszíne alatti kondenzált állapotú közeg lehetséges összetételére vonatkozó elméleti javaslatok.



vázlaton megjelennek olyan kompakt objektumok is, amelyeknél a közbenső fázisban sincs szerepe a neutronagnak.

A neutroncsillag a magfúziós üzemmód végén, a Fe^{56} magokat tartalmazó legalacsonyabb energiasűrűségű maganyag alkotta végállapotú csillag gravitációs összeomlásakor jön létre. A protonok közötti Coulomb-taszítás emelte gátat a gyenge kölcsönhatás révén „szakítja át” a természet, inverz béta-bomlással semleges neutronná alakítva a proton-összetevőket. A Chandrasekhar-határt a Pauli-elvből származó taszítás és a gravitációs vonzás új egyensúlya kialakulásának feltétele adja meg: a Nap tömegének 1,4–1,5-szeresénél nagyobb tömegű maradványcsillagok összeomlása fekete lyuk keletkezésével jár. Hacsak nem derül ki az összeomlás folyamatában elért hadronszintű vagy kvarkszintű anyag állapotegyenletéről, hogy elegendően kemény az összezuhanás megállításához. A sok elképzelésből azt emeljük alább ki, amely a részecskefizikai ismereteket leginkább hasznosítja: a *ritka anyag hipotézist* és következményeinek megfigyelési kutatását.

Az erősen kölcsönható elemi részecskékből álló anyag legstabilabb állapotának keresése egy máig aktívan kutatott elképzelésre vezetett 1971-ben. *A. R. Bodmer* a hadronok zsákmodelljével arra a következtetésre jutott, hogy a magagnál az úgynevezett ritka anyag alacsonyabb energiasűrűségű. *E. Witten* 1984-es elemzése irányította igazán a kutatók figyelmét arra a feltételezésre, hogy az atommagokból álló közeg valójában metastabil, amelynek léte csak annak köszönhető, hogy az igazi alapállapotba történő átmenet nagyon hosszú. Az igazi alapállapot az u , d és s kvarkot azonos sűrűségben tartalmazza.

A zsákmodell feltételezi, hogy a belső tartomány (a „zsák”) többlet energiasűrűséggel (B) jellemezhető a hadronmentes vákuumhoz képest, amely egyben negatív járulékot ad a teljes P nyomáshoz:

$$E = \text{kvark-gáz energiasűrűsége} + B,$$

$$P = \text{kvark-gáz nyomása} - B.$$

Amikor a végtelen kiterjedésű kvarkanyag energiaviszonyait nulla hőmérsékleten ideális kvarkgáz közelítésben vizsgáljuk, a kvarkok minden egyes „íze” (*flavour*) saját Fermi-gömbjét tölti fel. Az f fajta sűrűség-, energia- és nyomásjelükára könnyen kapható (ha a kvark tömege elhanyagolható), hogy

$$\rho_f = \frac{\mu_f^3}{\pi^2}, \quad \varepsilon_f = 3 \frac{\mu_f^4}{4\pi^2}, \quad P_f = \frac{\mu_f^4}{4\pi^2} = \frac{\varepsilon_f}{3}.$$

Ezekben a képletekben μ_f az f kvarkiz kémiai potenciálja. A környezetünkben létező, kétfajta könnyű kvark, az u és d alkotta két-izes kvarkanyag elektromos semlegességét a

$$2\rho_u - \rho_d = 0$$

mellékfeltétel biztosítja. Ez a reláció a sűrűségek fenti kifejezését használva, megköveteli a $2^{1/3}\mu_u = \mu_d$ kapcsolatot. A hadronon kívül a külső nyomás zérus, ezért a kvarkok nyomásával a B zsákállandó egyedül tart egyensúlyt. Ez viszont azt eredményezi, hogy az energia sűrűsége éppen $4B$. A kvarkok mindegyike $1/3$ bariontöltést hord, ezért az egységnyi bariontöltésre jutó energiát az

$$\frac{E}{\rho/3} = \frac{4B}{(\rho_u + \rho_d)/3}$$

hányados adja. A sűrűségek és a zsákállandó vázolt módon számolható kapcsolatát felhasználva

$$\frac{E}{\rho/3} = 6,44 B^{1/4}.$$

A zsákállandó negyedik gyökének legjobb értéke 145 MeV, amit például a proton tömegének zsákmodelles kiszámítása határoz meg. A kétfajta könnyű kvarkból felépülő sűrű fázis egységnyi bariontöltésre jutó energiájára ezzel 934 MeV becslés adódik. Ez kicsit magasabb, mint a vasanyagra a kötési energia figyelembevételével számolt 930 MeV, azaz a két-ízű kvarkanyag a magagnál kevésbé stabil.

Három kvarkiz ideális Fermi-Dirac-gázából álló (az u és d mellett az s ritka kvarkot is tartalmazó) közegben a semlegességi feltétel:

$$2\rho_u - \rho_d - \rho_s = 0,$$

aminek $\rho_u = \rho_d = \rho_s$, azaz $\mu_u = \mu_d = \mu_s$, a következménye a kémiai potenciálokra. Ezt a közeget a két-ízű közeggel hozzuk kontaktusba, megkövetelve, hogy ugyanakkora legyen a nyomása. Az ebből a követelményből meghatározott kémiai potenciállal kiszámolva az egységnyi bariontöltésre jutó energiát,

$$\frac{E}{\rho/3} = \frac{6,44}{1,127} B^{1/4}$$

az eredmény (a fenti zsákállandó értékkel: 829 MeV). Az „igazi” alapállapot tehát egyenlő sűrűséggel tartalmazza mindhárom kvarkot.

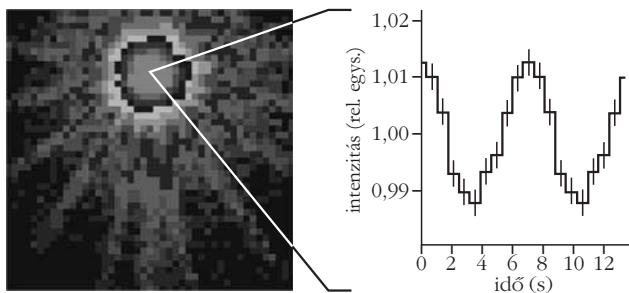
A korai egyszerű becslésekből induló, egyre technikusabb megközelítés eredményeként létrejött a kondenzált kvantum-kromodinamikai anyag fizikájának [7] (egyelőre elméleti) kutatása. Az aszimptotikus szabadság következtében a nagy sűrűségű kvarkközegben az alkotórészek között gyengül a kölcsönhatás, ezért a perturbációs számítás legalacsonyabb rendjében elvégzett számolás elegendően pontos eredményt ad. Eszerint vonzás lép fel a Fermi-gömb átellenes felületén lévő kvarkok között, amennyiben szín-triplettet alkotnak. Végeredményben az erősen kölcsönható anyag alapállapota nagy barionsűrűségen az elektromágneses szupravezető állapothoz hasonló *színes szupravezető* lesz. (Mióután a szupravezetés felületi hatás, a térfogati jellemzők fenti becslései néhány százaléknál többet nem változnak.)

A gluonok közvetítette vonzás okán színes kondenzátum alakul ki:

$$\begin{aligned} \langle \Psi_{iL}^{a\alpha}(\mathbf{p}) \Psi_{jR}^{b\beta}(-\mathbf{p}) \varepsilon_{ab} \rangle &= -\langle \Psi_{iR}^{a\alpha}(\mathbf{p}) \Psi_{jL}^{b\beta}(-\mathbf{p}) \varepsilon_{ab} \rangle = \\ &= \Delta(p^2) \varepsilon_{ijA} \varepsilon^{\alpha\beta A}. \end{aligned}$$

A nulla tömegű Ψ kvarktér balcsavarodású (L) és jobcsavarodású (R) komponense független szabadsági fokként külön-külön kondenzálódik. A háromértékű színindexet görög betűkkel, a szintén háromértékű kvarkiz-indexet az (i,j,\dots) sorozatból választott latin betűkkel jelöljük. Feltüntetjük a Weyl-spinor indexeket is (a,b,\dots) , amelyekben antiszimmetrizált kombináció alkot kondenzátumot. A kondenzátum antiszimmetrikus mind az íz-, mind a színindexekben. Miután az „A” indexre összegezés van, a kondenzátum összeresztolja a szín- és íz-komponenseket, ezért a QCD megfelelő fázisának neve: *egybezárt-szín-íz* (color-flavor locked, CFL) *fázis*. Az aszimptotikusan nagy sűrűségre elvégzett perturbatív számítás szerint ez a fázis a QCD valódi alapállapota. A maganyag sűrűségéhez közelebbi tartományban számos más jellegű közbenső fázis létezését javasolták, ezek viszont csak közelítő eredmények.

A 3. *ábra* bal alsó, világosszürke sarkában jelzett *ritka csillag* létezésének asztrofizikai kimutatásában az egyik fő irányzat ezen anyag kis darabkáinak, a *strangeleteknek* földi észlelése. A kozmikus sugárzásnak a régi kőzetekbe beépült alkotórészei között keresnek speciális, nagy tömegszámú magokat. A kozmikus sugárzás jó okkal feltételezett egyik fő forrása a kompakt csillagok ütközései, amelyek kvarkanyag tartalommal (is) bíró objektumok lehetnek. Egy-egy



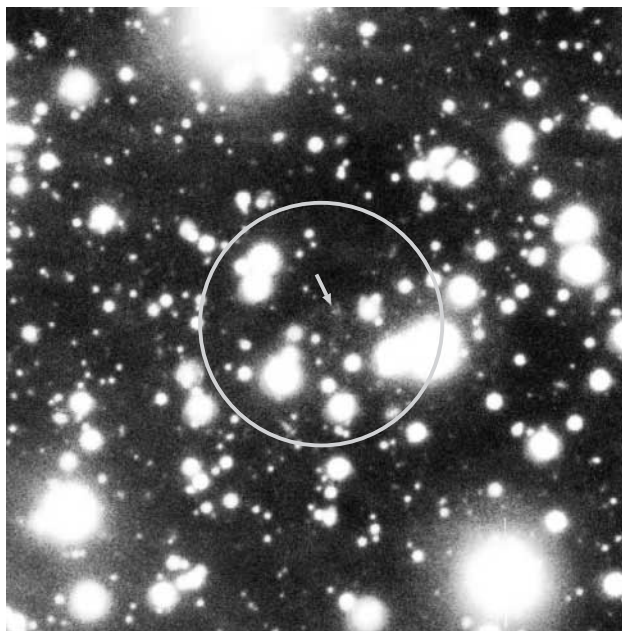
4. ábra. Az RXJ1856 képe röntgensugárzással történt leképezéssel és 7 s periódusú pulzációja.

robbanásszerű ütközés óriási mennyiségű ritka anyagdarabkát szórhat szét, amelyek legfontosabb jellemzője a kis töltés/tömegszám arány ($Z/A \sim 0,08$), miután a közel egyenlő arányú $u-d-s$ összetétel a semlegeshez közeli töltésű kvarkzsákokra vezet. Érdekes megemlíteni, hogy az egykor nagy szenzációként bejelentett $Z = 1$, $A \sim 1000$ esemény, amelyet 1975-ben mágneses monopólusként igyekeztek interpretálni, megfelel a fenti elvárásnak.

Az anyag érintettségét fokozandó, a Holdon gyűjtött közetek 15 grammnyi mintáján végeztek tömegspektroszkópiai vizsgálatot a Yale Egyetemen. $Z = 5-11$, $A = 42-70$ tartományba eső magok koncentrációjára adtak ez évben felső korlátot [8], miután ilyen objektumot nem tudtak kimutatni.

A közel makroszkopikus klasztereket a bolygókéreg nem tudja megállítani, azok átrepülnek a teljes térfogaton. Szeizmikus jelük a szokásos földrengésektől lényegesen eltér. 2006-ban az Apollo-11 által a Holdon elhelyezett szeizmográfok adatainak vizsgálatával a Nap által megkötött sötét anyag mennyiségéhez viszonyított korlátot adtak a ritka anyagdarabok jelenlétére a 10 kg – 1 tonna tömegtartományban [9]. A kis Z/A arány miatt ezen anyagdarabok elektromágneses sugárzása tömegükhöz képest igen csekély, azaz hozzájárulhatnak a sötét anyaghoz. A közölt becslés szerint koncentrációjuk tizedét sem éri el a Nap gravitációs terében várt sötétanyag-többletnek.

A legérdekesebb kihívás a csillagászati kimutatás. A szupernóva-robbanások nyomán visszamaradó kompakt objektumok közül a nagy tömegűek és anomálishan kis sugarúak ($R < 10$ km) keltik fel a ritka kvarkcsillag gyanúját. Hangsúlyozni kell, hogy a neutroncsillagok belsejében meghúzódó kvarkfázist tartalmazó úgynevezett hibrid csillagoktól a ritka anyag alkotta csillag különbözik. Utóbbinak csak vékony (néhány száz méternyi) felszíne lehet kis nyomású állapotban. A leghíresebb jelölt az ESA XMM-Newton röntgencsillagászati űrteleszkópjával az 1990-es évek második felében felfedezett RXJ1856 forrás, amelynek különlegessége, hogy rádióhullám tartományban nem észlelhető, de környezetének hőmérséklete elég magas a röntgensugárzás emissziójához (4. és 5. ábra). Ez különbözteti meg a többi ismert (kb. 1500) pulzártól. A kategóriájában összesen ismert hét forrás („The Magnificent Seven”) közül ez a legfényesebb, ami lehetővé tette távolságának és méretének meghatározását. Az 500 fényévre lévő objektum sugara ígéretesen kisebbnek adódott 10 km-nél.



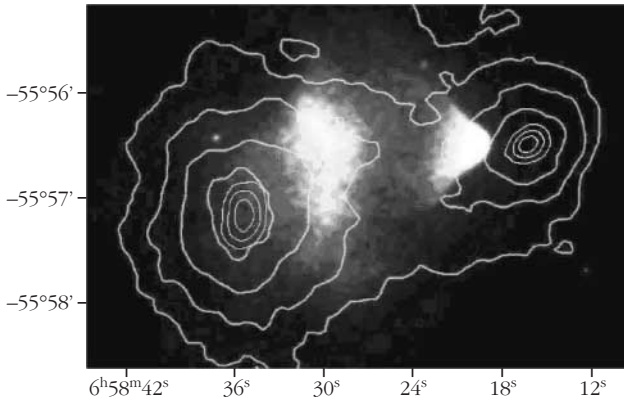
5. ábra. Az RXJ1856 környezetének a Very Large Telescope-pal készült képe.

Fontos újabb információt jelent, hogy a 2002 és 2006 között gyűjtött adatok alapján két olasz kutató kimutatta pulzációját 7 másodperces periódussal [10]. Ez a viselkedés hagyományos neutroncsillag modellekkel is értelmezhető. A neutroncsillagokat jellemző forgó mágneses térhez kapcsolt elektromágneses sugárzási veszteség miatti lassulás jövőbeli megerősítése vagy anomális hiánya nagy súlyt kaphat az objektum természetének eldöntésében.

Bár a ritka anyag kozmikus előfordulására irányuló eddigi kutatások nem hoztak egyértelmű eredményeket, a csillagászatot jellemző kitartó megfigyeléssel, az űrteleszkópok felvételeinek egyre finomodó adatbányászatával feltárható lesz a ma még egységesen neutroncsillag megnevezésű objektumok valódi természete.

Elemi részecskékből áll-e a kozmikus sötét anyag?

2006-ban szemmel is jól látható, közvetlenül érzékelhető érvet publikáltak a gravitációs hatást kifejtő, ám elektromágneses sugárzást ki nem bocsátó „sötét anyag” létezése mellett. A 6. ábrán látható az 1E 0657-56 jelű „puskagolyó-halmazról” készült felvétel elemzése. A halmaz valójában két ütközésben lévő galaxishalmazból áll, amelyek tömegeloszlását az elemzést elvégző csillagászok a kozmikus környezet képére gyakorolt lencsehatásuknak rekonstrukciójával rajzolták ki [11]. A két különállóan zárt görberendszer vonalai a gravitációs ekvipotenciális szintekkel jelzik a szétrepülő anyag tömegközéppontjainak helyzetét. A Chandra röntgenteleszkópnak ugyanerről az objektumról készült felvételével az elektromágnesesen világító forró intersztelláris gáz eloszlását is letapogatták (lásd a szürke skálával jelzett intenzitáseloszlást). Azonnal látható módon az elektromágnesesen



6. ábra. Az 1E 0657-56 „puskagolyó-halmaz” tömegeloszlása lencsehatásból származtatott gravitációs terének ekvipotenciális görbéi, valamint röntgensugárzó anyagának eloszlása.

is kölcsönható plazma lemarad az anyageloszlást meghatározó alig kölcsönható komponens mögött.

Ezen bizonyító erejű példa mellett a sötét anyag létezésére a galaxisok skálájától (rotációs görbék) a Világegyetem globális méretskálájáig (kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás anizotrópiájának értelmezése) állnak rendelkezésre bizonyítékok. A csillagászok hajlamosak a különböző skálán jelentkező láthatatlan tömeget különböző hatásoknak (esetleg éppen a gravitáció Newton-törvénye módosulásának) tulajdonítani. Ezzel szemben a részecskefizikusi megközelítés az egységes értelmezés lehetőségét keresi. A legkézenfekvőbb olyan nagy tömegű, hosszú élettartamú elemi részek kozmikus gázát feltételezni, amelyek az Univerzum forró korszakában keletkeztek és a Standard Modellt alkotó részecskékkel igen gyengén hatnak kölcsön. E tulajdonságaik összefoglaló rövidítése adja nevüket: a WIMP-ek (Weakly Interacting Massive Particles).

A Standard Modell minimális szuperszimmetrikus kiterjesztése minden ismert elemi részecskéhez egy ellenkező kvantumstatisztikát követő partner létezését tételezi fel. A legkönnyebb elektromosan semleges, feles spinű részecskét *neutralínó*nak nevezik, és ez akár abszolút stabil részecske is lehet. Feltételezik, hogy ön-maga antirészecskéje, azaz Majorana-típusú fermion. Ez azt jelenti, hogy két neutralínó annihilálódhat az ismert részecske-antirészecske párokba vagy fotonokba is. Az annihilációs reakció tartja termikus egyensúlyban a forró Univerzum többi alkotórészével.

Világegyetembeli előfordulási gyakoriságának időbeli változását a megfelelő Boltzmann-egyenlettel lehet követni:

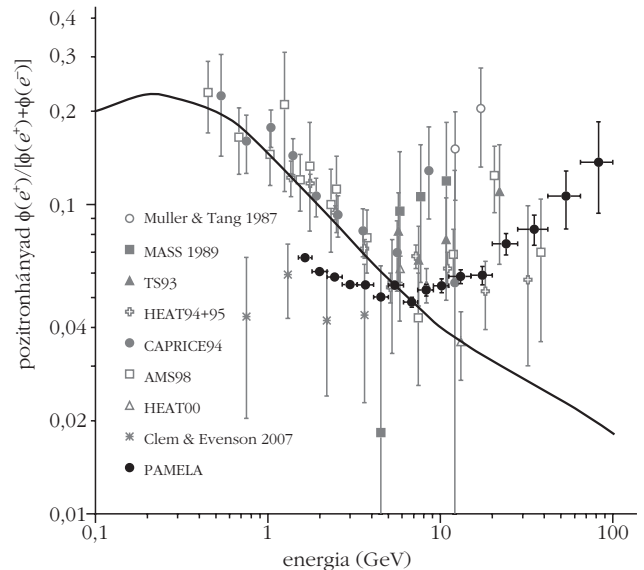
$$\frac{dn(t)}{dt} = \langle \sigma v \rangle [n_{\text{egyensúly}}^2 - n^2(t)] - 3Hn(t),$$

ahol $n(t)$ a WIMP sűrűségének időfüggését írja le, $H(t)$ a Világegyetem tágulását jellemző Hubble-paraméter, amelynek időbeli változását az egyidejűleg megoldandó Fridman-egyenletből kapjuk. $\langle \sigma v \rangle$ az annihiláció hatáskeresztmetszete és az annihilálódó részecskék relatív sebessége szorzatának átlagos értéke. Az időbeli változást a termikus egyensúlytól eltérő sűrűség, illetve a Világegyetem tágulása hajtja, amint az egyenlet jobb oldalán ez nyilvánvaló. A sötét anyag lecsatolódás utáni, ma megfigyelhető átlagos koncentrációja éppen akkor kerül a kozmológiai megfigyelések alapján elvárt tartományba, ha annihilációs hatáskeresztmetszete a Standard Modell szuperszimmetrikus kiterjesztéséből számolttal nagyságrendileg megegyezik. Ezt az egybeesést szokás a szuperszimmetria természeti megvalósulása melletti erős érvként hangoztatni.

Amikor a tágulás üteme meghaladja az annihilációs ütközések időbeli gyakoriságát, a sötét anyag koncentrációjának annihilációs csökkenése leáll. Ettől kezdve az alkotórészek gáza a tágulás ütemében hűl tovább, és alkothatja a globálisan homogén eloszlású sötét anyagot. Kis sűrűségigadozásai gravitációs instabilitás révén felerősödnek, anyaguk csomósodik és a formálódó galaxisok csíráit hozza létre. Csillagászati kimutatásuk egyik irányzata feltételezi, hogy a sötét anyag a galaxisunk centrumát uraló szupermasszív fekete lyuk környékén feldúsulva fordul elő. Hideg univerzumbeli átlagsűrűsége lokális megnövekedésével részecskéinek annihilációs rátája helyileg újból átlépheti az észlelhetőségi határt. Ezért remélhető a sötét részecskék kimutatása a galaxisunk centrumából érkező annihilációs termékek, például kemény (nagyenergiás) fotonok, pozitronok vagy antiprotonok észlelésével.

A 2006 júniusában egy orosz műhold fedélzetén felbocsátott PAMELA (Payload for Antimatter Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics) misszió mágneses spektrométerével 2008 februárjáig mért antiproton- és pozitronspektrumokat 2009 elején két, nagy visszhangot kiváltott közleményben tettek közzé [12]. A szokásos elképzelés szerint antianyag csak a kozmikus sugárzás nagyenergiás részecskéinek ütközéseiben bekövetkező másodlagos párkeltéssel kerülhet kozmikus környezetünkbe. A PAMELA által talált antiprotonfluxus és annak energia szerinti eloszlása jól magyarázható ezzel a kiindulással. Ugyanakkor a pozitronspektrum a korábbi mérésekhez képest a kisenergiás (< 5 GeV) tartományban kisebb fluxust, a nagyobb energiákon (> 10 GeV) a korábbiakkal szemben az energiával határozottan növekvő fluxust jelez (7. ábra). Előbbire a napszél hatásának a Nap 22 éves mágneses ciklusa során bekövetkező polaritásváltása kínál magyarázatot, míg utóbbi szignifikánsan meghaladja a kozmikus sugárzás

7. ábra. A PAMELA űrspektrométerrel mért energia szerinti kozmikus pozitroneloszlás egyéb korábbi mérésekkel együtt ábrázolva. A pozitronspektrum nagyenergiás szélé ellentmond a kozmikus sugárzás másodlagos keltési mechanizmusán alapuló várakozásnak (folytonos vonal).



galaxison belüli terjedése során bekövetkező ütközésekre épített elméleti becslést (a 7. *ábra* folytonos görbéje). A modellek minden bizonytalansága ellenére egyértelmű, hogy a másodlagosan keltett pozitronoknak a töltött leptonokhoz viszonyított arányában az energia növekedésével csökkenést kellene tapasztalni. A mért többletfluxus valamiféle elsődleges forrás(ok) jelenlétét valószínűsíti.

Az elmúlt közel egy év asztrofizikai irodalma tele van a lehetséges elsődleges forrásokra vonatkozó javaslatokkal. Ezek a pontszerű (pulzár) forrásoktól egészen az úgynevezett kozmikus húrok bomlástermékeiig terjednek. Természetesen számos elemzés született a sötét anyag eredetére is, amelyet az anti-protonspektrumban nem észlelt extra komponens nagyon erős korlátok közé kényszerít.

A PAMELA misszió adatgyűjtése legalább 2009 végéig tart. Az adatsor továbbnövelése lehetővé teszi a spektrum 300 GeV-ig statisztikailag megbízható meghatározását. Az annihilációs mechanizmus az annihiláló részecskék tömegének közelében éles levágást követel. Ez a karakterisztika nagyon világos útmutatást adna a CERN LHC kísérleteiben az új (szuperszimmetrikus) részecskék kereséséhez. Ugyanakkor a környezetünk galaktikus röntgenforrásait minden korábbi részletesebben feltérképező FGST (Fermi Gamma Ray Space Telescope) misszióval a pozitrontöbblet esetleg járulékot adó pulzárforrások megtalálásában is jelentős előrehaladás várható. Ugyanez a berendezés a galaxisunk centrumában lévő szupermasszív fekete lyuk környezetéből észlelt röntgenfotonokkal alkalmas a sötét anyag annihilációjából származó fotonok kimutatására, bár ezek leválasztása az egyéb forrásokról erősen modelfüggő.

A példák alapján világos lehet e cikk szándéka: a csillagászati és részecskefizikai szemléletű kutatási programok összehangolt megvalósítása előnyeinek hangsúlyozása. Remélhetőleg az egymás törekvéseit kölcsönösen kioltó ellenpropaganda-kampányok korszakát a világ szerkezetére vonatkozó tudásunkat kölcsönösen kiegészítő ismeretekkel gazdagító együttműködés korszaka váltja le.

Irodalom

1. S.D.M. White: Fundamental physics: why Dark Energy is bad for Astronomy. *Rept. Prog. Phys.* 70 (2007) 883–898.
2. E.W. Kolb: A Thousand Invisible Cords Binding Astronomy and High-Energy Physics. *Rept. Prog. Phys.* 70 (2007) 1583–1596.
3. Cleveland, B. et al.: Measurement of the solar electron neutrino flux with the Homestake chlorine detector. *Astrophys. Journal* 496 (1998) 505.
4. J. N. Bahcall, A. Serenelli, S. Basu: New solar opacities, abundances, helioseismology, and neutrino fluxes. *Astrophys. Journal Letters* 621 (2005) L85.
5. Davis, R. et al., 1972 *Proc. of the Neutrino '72 Conference, Balatonfüred, Hungary.* (szerk. A. Frenkel, G. Marx) OMKDK-TECHNOINFORM, Budapest 1972, vol. 1, p. 3.
6. Forrás: <http://apod.nasa.gov/apod/ap980605.html>
7. K. Rajagopal, F. Wilczek: The Condensed Matter Physics of QCD. in *Handbook of QCD* (szerk. M. Shifman) World Scientific, 2001, vol. 3, pp. 2064–2138.
8. Ke Han et al.: Search for stable Strange Quark Matter in lunar soil. *Phys. Rev. Lett.* 103 (2009) 092302.
9. E. T. Herrin, D. C. Rosenbaum, V. L. Teplitz: Seismic search for strange quark nugget. *Phys. Rev. D* 73 (2006) 043511.
10. A. Tiengo, S. Mereghetti: XMM-NEWTON discovery of 7s pulsations in the isolated neutron star RX J1856.5-3754. *The Astrophysical Journal* 657 (2007) L101–L104.
11. Clowe, Douglas, et al.: A Direct Empirical Proof of the Existence of Dark Matter. *The Astrophysical Journal* 648 (2006) L109–L113.
12. O. Adriani et al.: New Measurement of the Antiproton-to-Proton Flux Ratio up to 100 GeV in the Cosmic Radiation. *Phys. Rev. Letters* 102 (2009) 051101; An anomalous positron abundance in cosmic rays with energies 1,5–100 GeV. *Nature* 458 (2009) 607–609.

A JÁNOSSY-KÍSÉRLETEK – III.

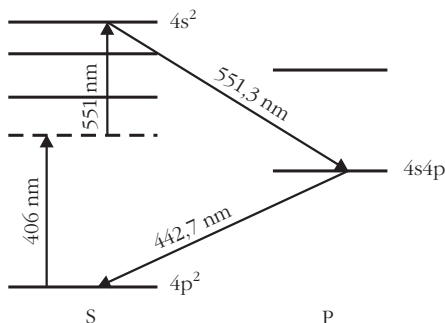
Varga Péter
Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet

Egyfotonos kísérletek

A Jánossy vezette kísérletek ismertetésénél rámutatunk, hogy ezeket szigorú értelemben véve nem egy fotonnal végezték el. Valójában a fénynyalábban a részben áteresztő tükör és a detektorok közötti (lásd I. rész a [11] koincidenciakísérlet) szakaszon, illetve a részben áteresztő tükör és a reflektáló tükrök (lásd I. rész a [13] interferenciakísérlet) közötti szakaszon a fény energiájának *várható értéke* nem haladta meg egyetlen foton $h\nu$ energiáját. A fényforrás a kiválasztott hullámhosszon minden irányban sugároz, a teljesítménye ugyan csak mikrowattokban mérhető, de a fotonok száma így is nagy. Mi csak egy szűk nyalábot választottunk ki, ezzel nem a fotonok számát csökkentettük, hanem annak a valószínűségét, hogy egy adott foton a nyalábon belül tartózkodik. Ez a megállapítás nemcsak Jánossy kísérleteire vonatkozik, ha-

nem a többi, eddig ismertetett kísérletre is. Ezért fordulhatott elő, hogy az előző részben tárgyalt kísérletekben (II. rész [5, 21]) legalább két foton esett be a két detektorra a feloldóképességnek megfelelő időtartam alatt.

Aspect [1] és társai állítottak elő olyan fényforrást, amely lehetővé tette, hogy kijelenthessük, hogy egy adott időintervallumon belül nagy valószínűséggel nincsen egynél több foton a térnek abban a tartományában, amelyet fent definiáltunk. A fényforrás kalciumgőzt tartalmazott, az atom termsémája az *I. ábrán* látható. Legyen az atomok sűrűsége olyan kicsi, hogy a gerjesztett atom csupán sugárzással vesztheti el energiáját. Amennyiben egyedül a $4p^2$ nívó van gerjesztve, akkor csak a $4s5p$ és a $4s4p$ nívóra van sugárzásos átmenet. A $4s4p$ nívóra való átmenetnél a kisugárzott fény hullámhossza 422,7 nm, a kaszkád második lépésőjében kilépő pedig 551,3 nm. A közbülső $4s4p$



1. ábra. A Ca termsémájának felhasznált része

nívó élettartama $\tau = 4,7 \cdot 10^{-9}$ s. A $4p^2$ állapot gerjesztését válasszuk olyan kicsire, hogy ezen idő alatt nagy valószínűséggel ne gerjedjen még egy atom, így biztosak lehetünk abban hogy a 551,3 nm hullámhosszon kisugárzott foton detektálása esetén a τ idővel összemérhető intervallumon belül nagy valószínűséggel egy és csak egy foton tartózkodik a térben.

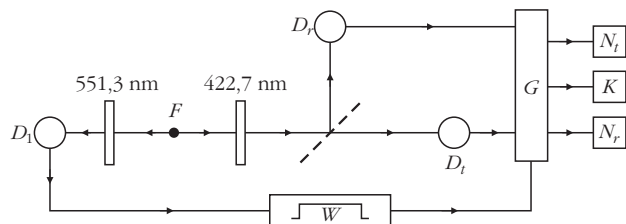
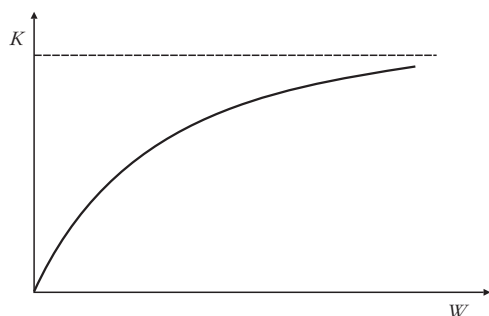
Ügyelni kell arra, hogy csakis a kiinduló $4p^2$ állapotot gerjesszük. Ez nem lehetséges a $4s^2-4p^2$ átmenetnek megfelelő hullámhosszú fényvel, mert a főkvantumszám nem változik, az átmenet tiltott. Ezért a szerzők a kéthullámhosszú (kétfotonos) gerjesztést alkalmazták, egyidejűleg 406 nm és a 551 nm hullámhosszokon működő lézerral világították meg a gázt. Az ilyen gerjesztés határfoka kicsi, de a lézerek nagy teljesítménye miatt a gerjesztés valószínűsége nagy.

Ezzel elértük azt, hogy van olyan fényforrásunk, amely rövid időn belül két és csak két meghatározott hullámhosszhoz (frekvenciához) hozzárendelhető fotonot emittál.

Grangier és társai [2] két kísérletet végeztek. Az egyik megfelel a koincidenziakísérletnek (2. ábra), de a berendezés csak akkor kerül mérésre kész állapotba, amikor az 551,3 nm hullámhosszra érzékeny D_1 detektor fotonot detektál. Természetesen a D_1 detektor sem számlál meg minden fotonot, de ha megszólal, akkor jelen van a térben a kaskád másik átmenetében emittált foton is. Ezt a fotonot is lehet detektálni egy másik színszűrő-detektor kombinációval, de ne siessük el, előbb bocsássuk a 422,7 nm hullámhosszú sugárzást részben áteresztő tükörrre, utána pedig a D_1 és D_2 detektorra.

A D_1 detektor egy adott w időtartamú kapujelet indít el, ez engedélyezi a másik két detektor jeleinek és azok koincidenziáinak számlálását. Mivel a másik

3. ábra. A koincidenziajelek száma a w kapujelet hosszának függvényében



2. ábra. Grangier és társai [2] koincidenziamérése. F a fényforrás, D_1 a monitor detektor, D_2 és D_3 az áteresztett és a visszavert fény detektorai, W kapujelet formáló áramkör, G kapu, K , N_1 és N_2 számlálók.

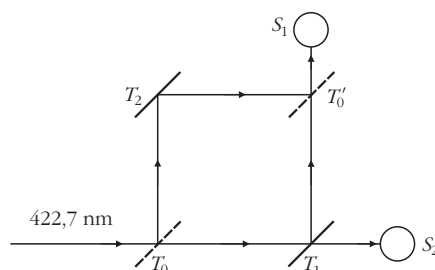
foton rövid időn belül követi az elsőt, a kapujelet is rövidre választjuk és figyeljük, vajon megszólal-e mindkét detektor, a D_1 és a D_2 . A kvantumelmélet értelmében viszont csak a D_1 vagy a D_2 detektor szólalhat meg, tehát nem lép fel koincidenzia. Hosszú w kapuidő esetén a berendezés már azokat a fotonokat is megszámlálja, amelyek az engedélyező jeltől függetlenek, mert ezek egy későbbi atomi átmenetből származnak. Ez felel meg a véletlen koincidenziáknak. A mért görbe alakja a kapujelet függvényében a 3. ábrán látható. Rövid kapujeleknél nem volt koincidenzia, tehát a 422,7 nm hullámhosszhoz rendelhető foton csak az egyik detektort szólaltatta meg. Ez volt az igazi koincidenziamérés.

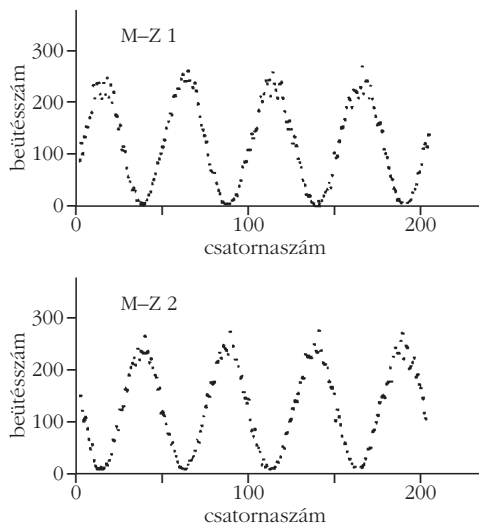
Valóban hullámként terjedt a sugárzás? Ezt ugyanabban a [2] cikkben közölt kísérletben igazolták. Mach-Zehnder-interferométert használtak (4. ábra); ez nem más, mint egy széthajtogatott Michelson-interferométer, de két detektorral is lehet mérni, a T_0' tükör két oldalán. Úthosszkülönbséget a T_0 vagy a T_0' részben áteresztő tükörnek a normálisa irányában végzett mozgásával lehet létrehozni. Az elektromágneses hullámok elmélete szerint a két csíkrendszer egymáshoz képest π fázissal el van tolva (lásd Appendix), ha egy tükörállásnál az egyik oldalon interferencia-maximumot találunk, a másik oldalon minimum lép fel.

A detektorok jelét csak akkor számlálták meg, ha az 551,3 nm hullámhosszú sugárzást regisztráló detektor ezt engedélyezte. Az 5. ábrán a két detektor által mért impulzusszámot ábrázolták, a T_0' részben áteresztő tükör helyzetének függvényében. Egy-egy pont $\lambda/50$ eltolásnak felel meg. Tisztán látható hogy a két detektor ellenfázisban volt. Ez volt az igazi kisintenzitású interferenciámérés.

Grangier és társai megvalósították, hogy valóban egyetlen foton legyen csak a berendezésben, és meggyőztek arról, hogy a bevezetésben felvetett ellent-

4. ábra. Mach-Zehnder-interferométer. T_0 és T_0' részben áteresztő tükrök, T_1 és T_2 tükrök.





5. ábra. Intenzitáseloszlás A Mach–Zehnder-interferométer két kimenetén [2]

mondás szeparált fotonok estén is fellép. Grangier eredménye még magyarázható lenne a foton kollapszusával, amit Jánossy vezetett be (lásd I. rész).

Többször hivatkoztunk a kvantum-elektrodinamikára, talán ez kiküszöböli a kollapszust? Nem, csak olyan szabályrendszert alkotott, amelyik automatikusan megalkotja a fotont, mint a fényelektromos jelenség okozóját.

Kell a kvantumelektrodinamika!

Mielőtt fejezetünk címében szereplő tárgyra térnénk, egy újabb fogalommal kell megismerkednünk: a paraméteres sugárzással.

Már az előző fejezetben is olyan fényforrással találkoztunk, amely közel egyidejűleg két foton emittált. Most is ilyenre lesz szükségünk, de az előzőekben még nem számított a hullámok fázisa, most olyan fényforrást választunk, amelynél ezt is figyelembe lehet venni. Egy nemlineáris optikai jelenséget, a paraméteres sugárzást használjuk fel. Ismert, hogy egy nagy intenzitású, ω_0 frekvenciájú lézer – megfelelően megválasztott anyag esetén – $2\omega_0$ frekvenciájú hullámot, felharmonikust kelt. Ahhoz, hogy az alaphullám terjedése során folytonosan generálja a saját felharmonikusát az kell, hogy az alaphullám és a felharmonikus mindvégig fázisban legyenek, vagyis a két hullám egyenlő sebességgel terjedjen. Ehhez teljesülnie kellene az

$$\omega_0 t - \mathbf{k}_{\omega_0} \mathbf{r} + \varphi_{\omega_0} = 2 \omega_0 t - \mathbf{k}_{2\omega_0} \mathbf{r} + \varphi_{2\omega_0}$$

egyenlőségnek, ez viszont nemcsak a frekvenciára, hanem a hullámszáma és a fázisra is kikötést ad. (A vektorokat félkövérrel jelöljük, utalva arra, hogy a két hullám különböző irányba terjed.) A hullámszámot a törésmutató is meghatározza, $k = n\omega/c$, ezért a törésmutatónak az alaphullám és a felharmonikuson is meg kellene egyeznie. Ez a diszperzió miatt izotróp közegben nem teljesül, anizotróp közegben is csak meghatározott terjedési irány és meghatározott polarizáció mellett.

Az is elérhető, hogy két, ω_1 és ω_2 körfrekvenciájú hullám egyetlen, $\omega_1 + \omega_2$ körfrekvenciájú hullámot keltsen. A fordított esetre is van lehetőség, hogy egyetlen beeső, ω_0 frekvenciájú hullám két, ω_1 és ω_2 frekvenciájú hullámot gerjesszen, az

$$\omega_0 t - \mathbf{k}_0 \mathbf{r} + \varphi_0 = (\omega_s t - \mathbf{k}_s \mathbf{r} + \varphi_s) + (\omega_i t - \mathbf{k}_i \mathbf{r} + \varphi_i)$$

egyenlőség teljesülése esetén. Ezt a sugárzást paraméteres sugárzásnak nevezik. Mivel az egyenletnek minden időben és minden pontban teljesülnie kell, ezért szükséges, hogy külön-külön az

$$\omega_0 = \omega_s + \omega_i, \quad \mathbf{k}_0 = \mathbf{k}_s + \mathbf{k}_i, \quad \varphi_0 = \varphi_s + \varphi_i$$

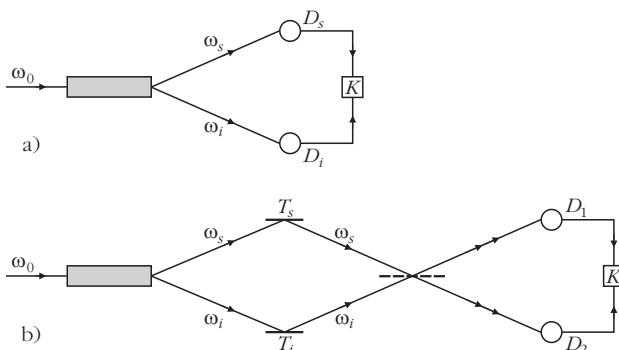
egyenlőségek is fennálljanak. Itt az indexek az angol terminológia alapján a *signal* és az *idle* kifejezéseknek felelnek meg, az előbbi frekvenciája a magasabb, de a frekvenciák különbsége kicsi. A hullámvektorokra kirótt egyenlőség azt tükrözi, hogy a kristályból kilépő két hullám egymással szöget zár be (amely a gyakorlatban kicsi). Az látszik, hogy a fázisok összege sem lehet független a belépő hullám fázisától, de *különbsége* tetszőleges lehet, sőt

$$\langle \exp[i(\varphi_s - \varphi_i)] \rangle = \langle \exp[-i(\varphi_s - \varphi_i)] \rangle = 0 \quad (1)$$

is igaz, ha a fázis egyenletes eloszlású a $(0, 2\pi)$ intervallumban.

Két kísérletet mutatunk be. Az első [3] eredményének interpretálásához még nincsen szükség kvantumelektrodinamikára. Argon ion lézer 351,1 nm hullámhosszú ultraibolya fénye esett be egy 8 cm hosszú kálium-dihidro-foszfát kristályra (6.a ábra). A kristály optikai tengelye $50,35^\circ$ szöget zárt be a belépő felület normálisával, ekkor teljesült az a feltétel, hogy a két kilépő 680 nm és 725 nm hullámhosszú sugárzás együtt haladjon a belépő hullámmal. A különböző irányú hullámok színszűrő után egy-egy gyors detektorra estek, amelyek felbontása 10^{-10} s volt. A két detektor jelét olyan berendezésbe vitték, amely regisztrálta a két impulzus beérkezése között eltelt időt. Az időkülönbség függvényében olyan görbét kaptak, amelynek félszélessége $2 \cdot 10^{-10}$ s volt. Összevetve a

6. ábra. Koincidenciamérés a) a szeparált [3], b) az egyesített [4] paraméteres nyálábokkal



kristályon való áthaladás idejével látjuk, hogy a két foton egy időben, vagy legalább közel egy időben keletkezett.¹ Látható, hogy most is, mint az előző fejezetben tárgyalt kísérletben egyidejűleg két foton jelenik meg.

A második kísérlet alkalmas arra, hogy megmutassuk, hogy csak a szigorúan alkalmazott kvantumelmélet ad a tapasztalattal egybehangzó eredményt. A kísérletet [4] egyszerűsített formában mutatjuk be, de a lényegén nem változtatunk. A paraméteres sugárzásban keltett hullámok a kristály kis méretei miatt nem monokromatikusak, sáv szélességük jóval nagyobb, mint az őket létrehozó lézéré. Mi most a két hullámot monokromatikusként kezeljük.

Megint koincidenциákat mérünk, de gondoskodunk arról, hogy a elektronsokszorozók mindegyikére beessen mind a *signal*, mind az *idle* hullám. Az erre szolgáló berendezés sémája a 6.b ábrán látható. A két hullámot egy-egy T_s , illetve T_i tükör segítségével félig átteresztő T_0 tükörré vetítjük, innen jutnak el a detektorokra. Bár a két hullám veleszületett fázisának különbsége ugyan tetszőleges, de ezt a különbséget szabályozni lehet, ha a T_0 tükört a saját normálisa irányában elmozdítjuk. Ha felfelé mozdul el, akkor az *idle* hullám fázisa változatlan marad, de a *signal* hullám úthossza megrövidül, így fázisa is változik. A tükör lefelé mozgatásával az *idle* úthosszát változtatjuk. Kérdés, befolyásolja-e és hogyan befolyásolja az így létrehozott útkülönbség a mért koincidenциák számát.

Áttekintjük a kvantumelektronika általunk felhasznált szabályait. Az elektromágneses teret leírhatjuk fotonállapotok szuperpozíciójaként, ezeket az állapotokat $|0\rangle$, $|1\rangle$, $|2\rangle$, ... (ket) vektorokkal jelöljük, ezekhez rendeljük hozzá a $\langle 0|$, $\langle 1|$, $\langle 2|$, ... (bra) vektorokat. Az ortogonalitás fennáll, tehát két vektor skalárszorzata $\langle n|m\rangle = 0$, ha $n \neq m$ és $\langle n|n\rangle = 1$. A fizikai mennyiségeket (általában) nem felcserélhető operátorok írják le. Különös szerepe van az \hat{a} megszüntetési és az \hat{a}^+ keltési operátoroknak, ezekre fennáll

$$\begin{aligned}\hat{a}|1\rangle &= |0\rangle, \\ \hat{a}|0\rangle &= |0\rangle, \\ \hat{a}^+|0\rangle &= |1\rangle.\end{aligned}\quad (2)$$

(Nem az általános szabályokat adtuk meg, csak azt, amit felhasználunk.) Szükségünk lesz azokra az esetekre, ha a fenti operátorokat egymás után kétszer alkalmazzuk,

$$\begin{aligned}\langle 1|\hat{a}^+\hat{a}|1\rangle &= 1, \\ \langle 1|\hat{a}\hat{a}|1\rangle &= 0.\end{aligned}\quad (3)$$

Ezek a szabályok már a fenti (2) egyenletekből következnek.

¹ Vegyük észre, milyen sokat fejlődött a technika, a fizika haladása következtében; az első (az első részben [11] alatt idézett) kísérletben a felbontóképesség négy nagyságrenddel rosszabb volt!

Koherens síkhullámokkal fogunk operálni, és ezt csupán a $\langle 0|$ és a $|0\rangle$, illetve az $\langle 1|$ és a $|1\rangle$ állapotok szuperpozíciójával fogjuk leírni. Ez a közelítés, csak abban az esetben igaz, ha a fotonok várható száma nagyon kicsi, de ezt feltettük már előző megfontolásainkban is.

A síkhullám térerősség-vektorának operátora két tagból áll:

$$\hat{E} = \frac{1}{\sqrt{2}} (\hat{E}^{(+)} + \hat{E}^{(-)}),$$

ahol

$$\hat{E}^{(+)} = A \hat{a} \exp[-i(\omega t - \mathbf{k}\mathbf{r} + \varphi)],$$

$$\hat{E}^{(-)} = A \hat{a}^+ \exp[i(\omega t - \mathbf{k}\mathbf{r} + \varphi)].$$

A térerősség kifejezésének ez a formája hasonlít a klasszikus alakhoz, ha az utóbbit komplex formában írjuk fel

$$E = \frac{1}{\sqrt{2}} (E + E^*),$$

ahol

$$E = A \exp[-i(\omega t - \mathbf{k}\mathbf{r} + \varphi)],$$

$$E^* = A \exp[i(\omega t - \mathbf{k}\mathbf{r} + \varphi)].$$

Ha a kvantum formába a keltési és megsemmisítési operátorok helyére 1-et, továbbá $\hat{E}^{(+)}$ helyett E -t, $\hat{E}^{(-)}$ helyett E^* -ot írunk, akkor a klasszikus alakot kapjuk vissza. Erre a szabályra helyettesítési szabályként fogunk hivatkozni.

Az intenzitás operátoraként az

$$\hat{I} = \hat{E}^{(-)} \hat{E}^{(+)}$$

szorzatot fogjuk felhasználni, ami megint csak hasonlít a klasszikus

$$I = EE^*$$

kifejezéshez. Klasszikusan $EE^* = A^2$.

A paraméteres fényben egyidejűleg két foton van jelen, ezt az $\langle 1_i|1_s\rangle$, illetve az $|1_i\rangle|1_s\rangle$ vektorpárral fogjuk jelölni, mert a két fotonállapot megkülönböztethető, hiszen a két hullám más irányból érkezik és frekvenciája is különbözik. Az állapotokra ható operátorokat az s és az i indexszel különböztetjük meg. Ezek az operátorok felcserélhetők.

A következő elemi, de hosszadalmas számítás szükséges ahhoz, hogy a látszólag hasonló kvantum és klasszikus számítás eredményeit összehasonlíthassuk. Felhasználni az operátorokra felírt (2) egyenleteket, valamint a két hullám fáziskülönbségére vonatkozó (1) egyenletet fogjuk. A 6.a–b ábrán látható berendezésben a koincidenциák száma – éppen úgy, mint az előző fejezetekben – arányos az intenzitások szorzatával, csak most ezek operátorok.

Különböztessük meg a látható két detektor bemenetén megjelenő térerősséget és az intenzitást az 1, illetve a 2 indexszel. A koincidenciák várható száma K

$$K = p \langle \langle 1_i | \langle 1_s | \hat{I}_1 \hat{I}_2 | 1_s \rangle | 1_i \rangle \rangle = p \langle \langle 1_i | \langle 1_s | \hat{E}_1^{(-)} \hat{E}_2^{(-)} \hat{E}_2^{(+)} \hat{E}_1^{(+)} | 1_s \rangle | 1_i \rangle \rangle, \quad (4)$$

ahol p arányossági tényező elsősorban a detektorok hatásfokától függ. A csúcsos külső zárójel megint csak a várható értékre utal, a két paraméteres hullám fáziskülönbségére tett (1) kikötés figyelembe vételére.

Vegyük észre, hogy nem kvantumos esetben a (4) kifejezés jobb oldalán egyszerűen az

$$I_1 I_2 = E_1^* E_2^* E_2 E_1 = E_1^* E_1 E_2^* E_2$$

mennyiség, az intenzitások szorzata állna, de az operátorok sorrendje nem tetszőleges.

Felírjuk a térerősségek négy operátorát. Amint már többször rámutattunk, a terjedő teret hullámként kell kezelnünk,

$$\begin{aligned} \hat{E}_1^{(-)} &= \hat{E}_{s1}^{(-)} + \hat{E}_{i1}^{(-)} = \\ &= \frac{A}{\sqrt{2}} \left\{ i \hat{a}_s^+ \exp[i(\omega_s t + \psi_{s1} + \varphi_s - k_s \Delta l)] + \right. \\ &\quad \left. + \hat{a}_i^+ \exp[i(\omega_i t + \psi_{i1} + \varphi_i)] \right\}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \hat{E}_2^{(-)} &= \hat{E}_{s2}^{(-)} + \hat{E}_{i2}^{(-)} = \\ &= \frac{A}{\sqrt{2}} \left\{ \hat{a}_s^+ \exp[i(\omega_s t + \psi_{s2} + \varphi_s)] + \right. \\ &\quad \left. + i \hat{a}_i^+ \exp[i(\omega_i t + \psi_{i2} + \varphi_i + k_i \Delta l)] \right\}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \hat{E}_2^{(+)} &= \hat{E}_{s2}^{(+)} + \hat{E}_{i2}^{(+)} = \\ &= \frac{A}{\sqrt{2}} \left\{ \hat{a}_s \exp[-i(\omega_s t + \psi_{s2} + \varphi_s)] + \right. \\ &\quad \left. + i \hat{a}_i \exp[-i(\omega_i t + \psi_{i2} + \varphi_i + k_i \Delta l)] \right\}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \hat{E}_1^{(+)} &= \hat{E}_{s1}^{(+)} + \hat{E}_{i1}^{(+)} = \\ &= \frac{A}{\sqrt{2}} \left\{ i \hat{a}_s \exp[-i(\omega_s t + \psi_{s1} + \varphi_s - k_s \Delta l)] + \right. \\ &\quad \left. + \hat{a}_i \exp[-i(\omega_i t + \psi_{i1} + \varphi_i)] \right\}. \end{aligned}$$

Itt ω_s , ω_i , k_s , k_i a két hullám frekvenciája, illetve hullámszáma. ψ -vel jelöltük azt a fázist, amellyel az s , illetve az i hullám eljut a kristálytól a D_1 , illetve a D_2 detektorra, amikor a T_0 félig áteresztő tükör a kiinduló állapotban van, Δl pedig a tükör elmozdítása. Ha Δl

pozitív, akkor az s hullámot siettetjük a D_1 detektorhoz vezető útjában, a másik i hullám úthossza változatlan maradt, negatív Δl eltolás mellett ugyanez fordítva. A két hullám veleszületett fázisa φ_s és φ_i . Végül az i az imaginárius egység, mint szorzó, a részben áteresztő tükörön való reflexiónál fellépő fázisugrás miatt jelenik meg (lásd *Appendix*).

A térerősségeknek fenti kifejezéseit kell behelyettesíteni a (4) egyenletbe, ezzel egy 16 tagból álló összeghez jutunk. Szerencsére 10 tagban szerepel az

$$\exp[i(\varphi_s - \varphi_i)]$$

kifejezés, vagy ennek komplex konjugáltja, ezért a 10 tag várható értéke nulla, és csupán hat tag marad meg:

$$\begin{aligned} K &= p \frac{A^4}{2} \langle 1_i | \langle 1_s | \left\{ \hat{a}_s^+ \hat{a}_s^- \hat{a}_i \hat{a}_i + \hat{a}_i^+ \hat{a}_i^- \hat{a}_s \hat{a}_s + \right. \\ &\quad + \hat{a}_s^+ \hat{a}_i^+ \hat{a}_i \hat{a}_s + \hat{a}_i^+ \hat{a}_s^+ \hat{a}_s \hat{a}_i + \\ &\quad + \hat{a}_s^+ \hat{a}_i^+ \hat{a}_s \hat{a}_i \exp\left[i[(k_i - k_s) \Delta l - \Delta \psi] \right] + \\ &\quad \left. + \hat{a}_i^+ \hat{a}_s^+ \hat{a}_s \hat{a}_i \exp\left[-i[(k_i - k_s) \Delta l - \Delta \psi] \right] \right\} | 1_s \rangle | 1_i \rangle, \end{aligned} \quad (5)$$

ahol

$$\Delta \psi = (\psi_{s1} - \psi_{i1}) - (\psi_{s2} - \psi_{i2})$$

a hullámok fáziskülönbségének az a különbsége, amely a kristálytól a detektorokig vetető úthosszak különbségéből ered, irreleváns mennyiség.

Áttekintjük az egyes operátorkombinációk hatását a fotonállapotokra. Emlékeztetünk arra, hogy az s és az i állapotokra vonatkozó operátorok egymással kommutálnak. Felhasználjuk a (2) és a (3) összefüggéseket. Az első operátorkombinációt kiválasztva:

$$\begin{aligned} \langle 1_i | \langle 1_s | \hat{a}_s^+ \hat{a}_s^- \hat{a}_i \hat{a}_i | 1_s \rangle | 1_i \rangle &= \langle 1_i | \hat{a}_i \hat{a}_i | 1_i \rangle \langle 1_s | \hat{a}_s^+ \hat{a}_s^- | 1_s \rangle = \\ &= 0 \times \langle 1_s | \hat{a}_s^+ \hat{a}_s^- | 1_s \rangle = 0, \end{aligned}$$

mivel bármely vektormennyiség nullával szorozva eltűnik. Ugyanez áll az (5) egyenletben álló második operátorkombinációra is. A további kombinációkban mind az s mind az i állapotokra vonatkozó keltési és megsemmisítési operátor szerepel, mégpedig helyes sorrendben, a kreációs operátorok mindenütt megelőzik az annihilációsokat. Ezért a további négy kombináció azonos alakra hozható,

$$\begin{aligned} \langle 1_i | \langle 1_s | \hat{a}_s^+ \hat{a}_i^- \hat{a}_i \hat{a}_s | 1_s \rangle | 1_i \rangle &= \langle 1_i | \hat{a}_i^+ \hat{a}_i | 1_i \rangle \langle 1_s | \hat{a}_s^+ \hat{a}_s | 1_s \rangle = \\ &= 1 \times 1 = 1. \end{aligned}$$

Tehát kvantumos esetben a koincidenciák száma

$$K = p A^4 \left\{ 1 + \cos[(k_i - k_s) \Delta l - \Delta \psi] \right\}. \quad kv$$

A klasszikus számítás más eredményt ad. Elegendő, ha az eltűnési és kreációs operátorok helyébe az (5)

kifejezésbe csupa 1-et írunk, és az állapotvektorokat elhagyjuk. Ekkor viszont az első két vektorkombináció eredménye sem tűnik el, ezért

$$K = p A^4 \left\{ 2 + \cos \left[(k_i - k_s) \Delta l - \Delta \Psi \right] \right\}. \quad \text{kl}$$

Kvantumos számítás esetén a zárójelben lévő kifejezés 0 és 4 között változik, míg klasszikus számítás esetén a függvény csak 1 és 3 között. Mivel minden mért mennyiség hibával van terhelve, azt mondjuk, hogy nem-kvantumos számítás esetén a függvény a saját átlagának fele és másfélszerese között változik. A 7. ábra a mért ko incidenciák számát mutatja a T_0 tükör helyzetének függvényében. Mivel a mérést véges sáv szélességű paraméteres hullámokkal végezték, nem ideális szinuszgörbét kaptak, hanem mindkét oldalon lecsengő függvényt. Míg az átlagos ko incidenciaszám körülbelül 210/100 s volt, látható, hogy helyenként ez a mennyiség 105/100 s alá esik.

Megmutattuk tehát, hogy a szigorú kvantumelmélet vezetett jó eredményre. Az olvasó joggal felróhatja, hogy miért nem tárgyaltuk már magát a paraméteres sugárzást is a kvantumelmélet nyelvén, hiszen ez is rendelkezésünkre állt [5]. A parametrikus fény kvantum és nem-kvantumos tárgyalásának az a része, amit ebből kihasználtunk nem ad más eredményt. Az utak éppen ennél a kísérletnél válnak széjjel és azt szeretjük volna, hogy ezt lássa tisztán az olvasó.

Megjegyezzük, hogy a két hullám frekvenciájának különbsége

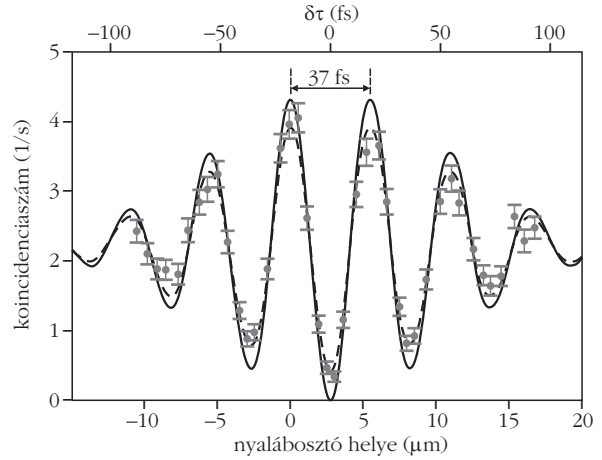
$$\frac{c}{\lambda_s} - \frac{c}{\lambda_i} = \frac{10^{15}}{37} \frac{1}{\text{s}}$$

volt, ez megfelel annak a távolságnak, amellyel két maximum között a T_0 tükröt elmozdították. Nem furcsa, hogy egy ko incidenciaberendezés interferenciát (lebegést) mért?

Személyes tanulság

Elindultam egy problémából, amelyet nemcsak Jánossy exponált, hanem előtte sokan mások. Az újdonság nem a probléma felvetése volt, hanem az, hogy a kísérleteket ugyanabban a laboratóriumban, lehetőleg ugyanolyan eszközökkel akarta Jánossy elvégezni. A elvégzett munka akkor is jelentős volt, ha a ko incidenciakísérlet idézettsége nem érte el a *Hanbury-Brown* és *Twiss* munkájának idézettségét. Az első részben idézett [11] munka csak azt mutatta meg, hogy a foton nem válik ketté, amit fontos volt megmutatni. A kortársak tudtak róla, de eredménye megfelelt a várakozásoknak, míg az utóbbi – a második részben idézett [5] – eredménye meglepetésként hatott és a későbbi kutatás számára fontos is volt, mert felhívta a figyelmet a koherens állapotok jelentőségére [6, 7].

Elárulom, hogy jómagam milyen tanulságot *nem* vontam le a II. fejezetben leírt kísérletekből. Azért teszem, nehogy az olvasó hasonló meggyőződésre



7. ábra. A mért ko incidenciák száma a T_0 tükör helyzetének a függvényében [4]

jusson. *Ellentmondást* láttam a két kísérleti eredmény között, amire nem találtam *raciónális* magyarázatot. Az ellentmondás-mentesség viszont logikai kategória, a gondolkodásunktól megkövetelhetjük, de a természettől nem. A tudomány feladata a jelenségek megismerése, az azok közötti összefüggések feltárása, a jelenségek adekvát *leírása*. Ne követeljük meg, hogy mindez megfeleljen az *a priori* elképzeléseinknek.

Sokáig úgy tűnt, hogy a jelenségeket a klasszikus elmélettel is le lehet írni, ha megfejlük a detektálásnál fellépő kollapszus hipotézisével, meg azzal, hogy a fotoelektron hirtelen kilépésének valószínűsége arányos az intenzitással. Ez használható az egyfotonos kísérleteket tárgyaló fejezetig, de azután csődöt mondott.

A *Fizikai Szemle* még keveset foglalkozott azokkal a kísérletekkel, amelyek a kauzalitás csődjét bizonyították. Ideje lenne a legfontosabbakat összefoglalni. Jánossy nem sokkal betegsége előtt már mondta, hogy talán mégis baj van a kauzalitással, de az ezt bizonyító kétségbevonhatatlan tapasztalati igazolást már nem érte meg.

Appendix

Az energiamegmaradás elvét sértené, ha nem vennénk tekintetbe azt a fázisváltozást, amely a Michelson-interferométer részben áteresztő tükrén megy végbe, amikor a belépő nyaláb visszaverődik, illetve áthalad rajta. Ha a tükör nagyon vékony fémréteg (manapság már nem az) akkor felteszik, hogy a beeső hullám csak elhanyagolhatóan kis fázisváltozással megy át rajta. Tegyük fel, hogy az interferométer karjainak hossza egyenlő és egész számú többszöröse a fél hullámhossznak, tehát az interferencia teljesen konstruktív.

Legyen a belépő fény intenzitása I , visszavert és az áteresztett fény intenzitása $t^2 I$, illetve $r^2 I$, ahol t^2 a transzmisszió-, és r^2 a reflexióképesség, a megfelelő térerősségek pedig $E_t = tI^{1/2}$ és $E_r = rI^{1/2}$. Tekintsük először az M megfigyelési pont irányába haladó hullámot (lásd első rész 1. ábráját). A T_1 tükrön visszavert hullám újra visszaverődik a részben áteresztő tükrön,

míg a T_2 tükrön visszavert hullám áthalad azon. Ezért a két térerősség összege

$$E_M = 2 r t \sqrt{I},$$

és az intenzitás

$$I_M = 4 r^2 t^2 I.$$

A T_1 tükrön visszavert hullám viszont át is halad a részben áteresztő tükrön és a fényforrás felé halad tovább, a T_2 tükrön visszavert hullám pedig még egyszer visszaverődik, ezért a hullám

$$E_F = (r^2 + t^2) \sqrt{I}$$

térerősséggel halad a forrás felé. Ennek e hullámnak az intenzitása

$$I_F = (r^2 + t^2) I.$$

Ha a részben áteresztő tükrő ideális, és $r^2 = t^2 = 1/2$, akkor mind a két irányban I intenzitású fény halad tovább, tehát a belépő teljesítmény megkétszereződött. Ha nem egészen ideális, akkor is nyertünk.

Alkalmazzuk most következetesen az elektrodinamika szabályait, ezek a Maxwell-egyenleteken kívül a folytatási szabályok, amelyek megmondják, miként változnak az egyes térkomponensek a közeghatárokon. Az elektromos térerősség vektornak a felülettel párhuzamos komponense a közeghatáron folytonos. Legyen ez a komponens párhuzamos a részben áteresztő tükrő síkjával, vagyis az első rész *1. ábráján* merőleges a papír síkjára. (A beesési síkban fekvő komponensre a számolás hosszabb lenne, de ugyanazt, az eredményt kapnánk.) A rövidség kedvéért komplex írásmódot használunk, tehát a beeső hullám térerősségét

$$E = A \exp[-i(\omega t - k z)]$$

alakban, az intenzitást pedig

$$I = E E^*$$

alakban állítjuk elő.

Legyen a reflektált hullám a részben áteresztő tükrő síkjában rE , tehát a teljes térerősség a tükrő beeső oldalán $E + rE$, a másik oldalon pedig tE . A folytonossági feltétel miatt $E + rE = tE$, vagyis

$$E = tE - rE.$$

A komplex konjugáltakra áll, hogy

$$E^* = t^* E^* - r^* E^*.$$

Szorozzuk meg egymással a két egyenletet és vegyük figyelembe az intenzitás kifejezését,

$$I = |t^2| I + |r^*| |I - (r t^* + r^* t) I|.$$

Ha a részben áteresztő tükrő veszteségmentes, tehát $|t^2| + |r^2| = 1$, akkor fenn kel állnia a

$$r t^* = -r^* t$$

egyenlőségnek, tehát $r t^*$ imaginárius. Ha t valós, akkor

$$r = a i = a \exp\left(i \frac{\pi}{2}\right),$$

a hullám a reflexiónál 90° fázisugrást szenved. Az M megfigyelési pont irányába haladó hullámok egyszer visszaverődnek, egyszer áthaladnak a T_0 tükrön, tehát fáziskülönbségük nem változik. A forrás felé haladó hullámok közül az, amelyik a T_1 tükrőről verődik vissza nem szenved fázisugrást, amelyik a T_2 tükrőről verődik vissza, kétszer is, tehát éppen ellenkező fázisban van az előzővel. Ha a megfigyelési pont felé haladó hullámnak maximuma van, akkor a forrás felé haladónak minimuma, és fordítva. Az energia megmarad.

A végtelen vékony tükrő persze idealizálás. A részben áteresztő tükrők több dielektrikum-rétegből állnak, de a folytonossági feltétel minden felületen teljesül, csak a számolás bonyolultabb.

Irodalom

1. A. Aspect, P. Grangier, G. Roger: Experimental tests of realistic local theories via Bell's theorem. *Phys. Rev. Lett.* **47** (1981) 460.
2. P. Grangier, G. Roger, A. Aspect: Experimental evidence for photon anticorrelation effects on a beam splitter: A new light on single-photon interferences, *Europhys. Lett.* **1** (1986) 173.
3. S. Friberg, C. K. Hong, L. Mandel: Measurement of time delays in the parametric production of photon pairs. *Phys. Rev. Lett.* **54** (1985) 2011.
4. Z. Y. Ou, L. Mandel: Observation of spatial quantum beating with separated photodetectors. *Phys. Rev. Letters* **61** (1988) 64.
5. C. K. Hong, L. Mandel: Theory of parametric down conversion of light. *Phys. Rev. A* **31** (1985) 2409.
6. R. J. Glauber: The quantum theory of optical coherence. *Phys. Rev.* **130** (1963) 2539.
7. R. J. Glauber: Coherent and incoherent states of the radiation field. *Phys. Rev.* **131** (1963) 2766.

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@mtesz.hu

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

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

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

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

Megjelenik havonta, egyes szám ára: 780.- Ft + postaköltség.

HU ISSN 0015-3257 (nyomtatott) és **HU ISSN 1588-0540** (online)

KVANTUMOS INTERFERENCIAJELENSÉGEK NANOMÉRETŰ GYŰRŰKBEN

Földi Péter
Szegedi Tudományegyetem, Elméleti Fizika Tanszék

A kör egyike a legegyszerűbb, legősbibb szimbólumoknak, nemcsak az emberiség de az egyes ember történetében is: amellet, hogy az évezredek alatt különböző, jellemzően pozitív tartalmak (teljesség, végtelenség...) kapcsolódtak hozzá, ez az egyik első felismerhető alakzat, amit tudatosan vet papírra egy kisgyermek (*1.a ábra*). A geometriai egyszerűség és az elválaszthatatlannal hozzá kapcsolódó, az ember fejében mindig jelenlévő összetett tartalom együttese okozhatja azt, hogy körökkel, gyűrűkkel foglalkozni már a szakmai kérdések felvetése előtt is érdekesnek ígérkezik.

Ha egy konkrét, körön értelmezett problémát vizsgálunk, azaz olyan függvényt keresünk, amelynek az értelmezési tartománya egy körvonal, akkor alapvető kíváncságot a megoldás egyértékűsége: egy adott pontot kiválasztva, elvárjuk, hogy ugyanazt (a függvényértéket) lássuk akkor is, ha egyszer, kétszer, sokszor körbehaladunk a kör mentén, elvégre a vizsgált pont geometriai értelemben ugyanaz. Így a „végtelenség” fogalmának a körre vonatkozó, kevésbé fennkölt, cserébe konkrét verzióját kapjuk: a periodicitást. Matematikailag ez azt jelenti, hogy a függvény Fourier-sorba fejthető, azaz, ha az *1.d ábrának* megfelelően ϕ jelöli a polárszöveget, akkor minden megoldást $\exp(in\phi)$ alakú tagok megfelelően súlyozott összegeként írhatunk fel, ahol n egész. A kör mentén mozgó kvantumos „szabad” részecskét tekintve (az idézőjel arra vonatkozik, hogy a teljesen szabad háromdimenziós mozgáshoz képest a körvonal azért komoly megszorításokat jelent) a Fourier-komponensek egyúttal a kvantummechanikai probléma energia-sajátállapotai is, azaz a periodikus $\exp(in\phi)$ függvények megoldásai a „kör alakú dobozba zárt” részecske sajátérték-problémájának. Az egész n -eknek (azaz a periodicitásnak) köszönhetően az energiaszintek diszkrétnek, az energia n^2 -tel arányos. Ez jellegében igaz marad egy töltéssel rendelkező részecskére, akár gyenge mágneses tér, vagy spinfüggő kölcsönhatások befolyása mellett is.

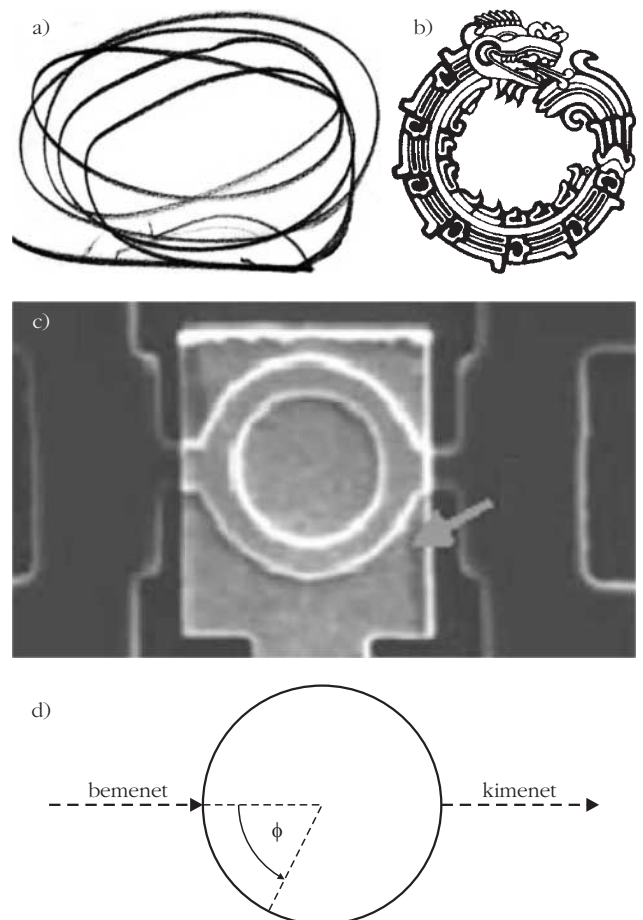
Kvantumgyűrűk, spin-pálya kölcsönhatás

Kör vagy gyűrű mentén mozgó kvantumos részecskék fizikája pontosan a tartomány alakja miatt érdekes, hiszen még ha kezdetben igen jól meghatározott helyzetű részecskét is veszünk, annak hullámfüggvénye az idő múlásával szükségképpen szétfolyik. Ekkor pedig a függvény „feje” és „farka” előbb-utóbb összeér (*1.b ábra*), és a részecske megtalálási valószínűségében is

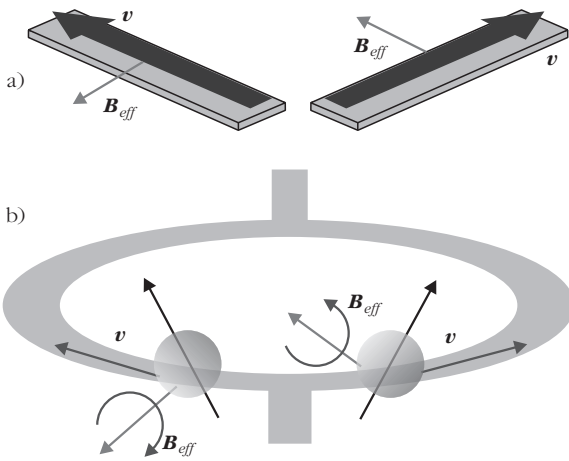
megmutatkozó interferencia lép fel. Szilárdtest gyűrűk és bennük mozgó elektronok esetében a kvantumos viselkedés így alapvető, elvi jelentőségű kísérletek elvégzését teszi lehetővé, széles körben elérhető mintákban. Másrészt, ezek a kvantumgyűrűk akár a gyakorlati alkalmazások szempontjából is lényegesek lehetnek, hiszen a sokat ígérő kvantumos információfeldolgozás [2] egy lehetséges fizikai megvalósítását adhatják.

Félvezetők felületén ma már rutinszerűen hozhatók létre [1] nanométeres tartományba eső struktúrák (*1.c ábra*). A kis méret azért játszik fontos szerepet, mert a kvantumos viselkedés igen érzékeny különféle zavaró tényezőkre (pl. a rácshibákon való szóródásra), amelyek a méret növekedésével felerősödnek. A miniatürizálás és anyagtisztaság növelése már lehetővé teszi, hogy – bár alacsony hőmérsékleten – az elektronok szabad úthossza a gyakorlatban fontos félvezetők esetén is túllépje a struktúra jellemző méretét. Ilyenkor az elektronok hullámtermészete a meghatározó. Amellet, hogy a kvantummechanikai leírás olyan effektusokra deríthet fényt, amelyek jellegében új alkalmazások alapját szol-

1. ábra. Körábrázolások (a) és (b), egy kvantumgyűrű félvezető felületén [1] (c) és az egydimenziós modell (d).



A cikkben leírt eredmények az MTA Bolyai János Kutatási Ösztöndíjának a támogatásával jöttek létre. A szerző köszöni továbbá a témával kapcsolatos eszmecsereket Kálmán Orsolyának, Molnár Balázsnak és Benedict Mibálynak.

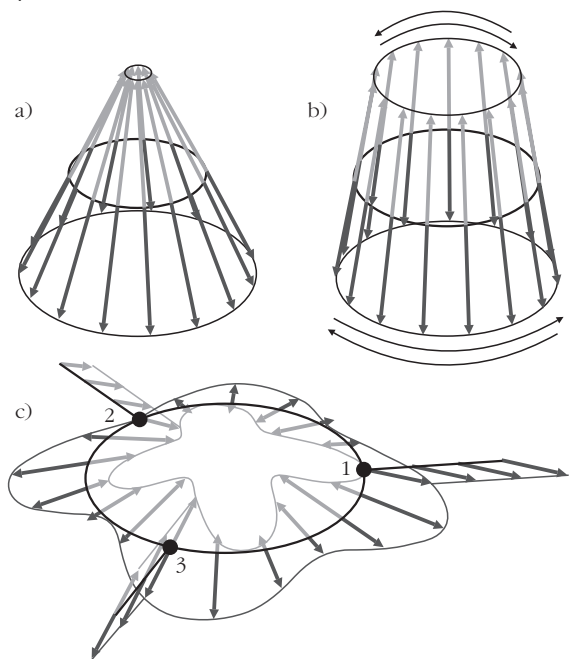


2. ábra. A különböző irányban haladó elektronok által tapasztalt B_{eff} effektív mágneses tér iránya egyenes vezetékek és gyűrű esetén. A b) ábra (J. Nitta nyomán [1]) egy-egy lehetséges spinirányt is mutat (fekete nyilak), a precesszió forgásirányával együtt.

gálhatják, érdemes megjegyezni, hogy ez a hozzáállás nemsokára szükségszerűvé is válhat, pusztán az elektronikai eszközök méretének csökkenése miatt.

Egy további ok, ami bizonyos anyagú félvezető gyűrűket kimondottan érdekessé tesz, az a vezetési jelenségek spinfüggése. A mozgó elektron vonatkoztatási rendszeréből nézve egy tisztán elektromos \mathbf{E} mező részben mágnesesnek látszik, ennek a B_{eff} effektív térnek az irányát $\mathbf{E} \times \mathbf{v}$ adja meg, ahol \mathbf{v} a sebesség. Az elektron-spinhez csatolt mágneses momentum forog, precesszál B_{eff} körül. Ezzel a spin-pálya csatolásnak nevezett jelenséggel a fizika több területén is találkozhatunk, például a spektrumvonalak finomszerkezetéért is ez a kölcsönhatás felelős. Félvezetőkben [3] az effektus jelentőségét

3. ábra. A gyűrű kitüntetett irányai erős (a) és gyengébb (b) spin-pálya kölcsönhatás jelenlétében. A b) ábrán a lehetséges áramirányok is láthatók, amelyekhez tartozó hullámok interferenciája a c) mintázatot is létrehozhatja. A nyilak hossza itt az elektronsűrűséggel arányos, és a 3. számú vezeték a bemenet.



főként az adja, hogy az \mathbf{E} mező elektródákkal hangolható (erre mutat példát a nyíllal jelölt világos téglalap a 1.c ábrán). Mivel az elektron spinje, mint természetes két-állapotú rendszer a kvantum információfeldolgozásban [2] alapvető kvantum bit (qubit) egy lehetséges fizikai megvalósulását jelenti, a spint is erőforrásként felhasználó elektronikának (spintronikának [4]) egy olyan ága fejlődhet így ki, ami akár a jövőbeli kvantumszámítógépek szempontjából is jelentős lehet.

Félvezetőkben kialakított vezetékek esetén a tipikus elrendezés az, hogy egy masszív, viszonylag nagy lapra (szubsztrát) visznek föl más anyagi minőségű félvezetőt, ami tulajdonképpen a vezetékeket jelenti az elektronok számára. Pontosabban, az ilyen heterostrukturák esetén az áram a felület mentén, a kétféle félvezető közötti vékony határretegben folyik (éppen merőlegesen pl. a tranzistorokban megszokott irányra). Itt érdemes visszatérni a „szabad” elektronok kérdésére: ha az egyszerűség kedvéért egy egyenes félvezető csíkra gondolunk, az jó közelítéssel azt jelenti, hogy az elektronok ebbe a tartományba vannak „beszorítva”. A lényegét jól megragadja, ha egyszerűen elektromos eredetű (pl. harmonikus) potenciálokra gondolunk mind a szubsztrát síkjára merőlegesen, mind pedig a csíkra merőleges irányban. Alacsony hőmérsékleten, viszonylag kis feszültségek esetén a rendszer egy hullámvezetőhöz hasonlít [5], ahol a vezeték geometriája és a Fermi-szint viszonya határozza meg a vezetési tulajdonságokat. Vékony vezetékek alkalmazásával elérhető az egymódusú optikai szálakhoz hasonló viselkedés, ilyenkor a terjedési irányra merőlegesen lényegében csak az alapállapot betöltöttsége különbözik nullától. Mivel egyetlen olyan módus van, ami a vezeték mentén haladó hullámot ír le, így az 1.d ábra egydimenziós modellje jó közelítést jelent.

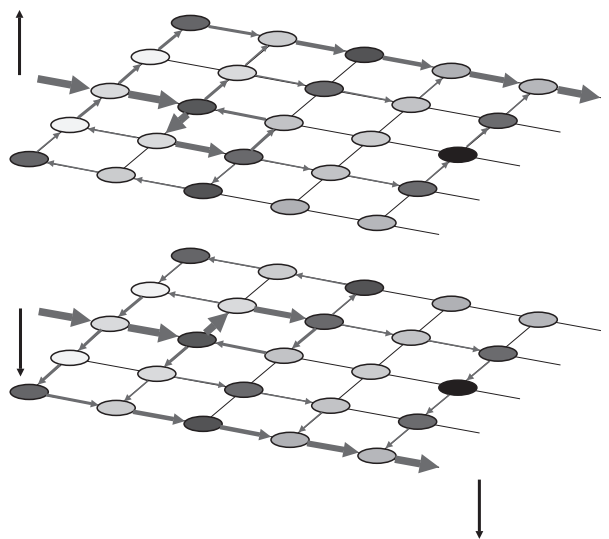
A 2. ábrán az effektív mágneses tér iránya látható egyenes vezetékek esetén. Mivel a vezetékben haladó elektron spinje elforgat B_{eff} körül, általában pontról pontra változik az iránya. Összesen két, egymással ellentétes kitüntetett spinirány található (a spin-pálya kölcsönhatást is tartalmazó Hamilton-operátor [6] sajátállapotai), amelyek nem mutatnak precessziót. Görbült vezeték – mint a gyűrű – esetén a helyzet annyiban más, hogy az effektív mágneses tér iránya pontról pontra változik, így a kitüntetett irányok is helyfüggést mutatnak. A 3.a–b ábráknak megfelelően ezek a spinirányok egy kúp felületén helyezkednek el, aminek nyílásszöge attól függ, hogy mennyire erős a spin-pálya kölcsönhatás. Fontos ismételt hangsúlyozni, hogy ez a kölcsönhatás-erősség arányos az elektronok által érzett elektromos térrel, így külső, a szubsztrátra helyezett elektródákkal befolyásolható (1.d ábra).

Az egyik legalapvetőbb fizikai mérés egy nanoméretű félvezető eszközzel kapcsolatban a vezetőképesség meghatározása. Az ilyen jellegű kísérletek leírásakor nem egy önmagában álló gyűrűre gondolunk, hanem tekintünk két, hozzá csatlakozó vezetéket is (a szaggatott vonalak az 1.d ábrán). Érdeemes megjegyezni, hogy ideálisan illesztett vezetékek esetén a gyűrű lehetséges energiái már nem alkotnak diszkrét

sorozatot. (A folytonos spektrum létrejötte hasonló ahhoz, ami akkor történik, ha egy optikai – de akár [többmódusú] mechanikai – oszcillátort gondolatban fokozatosan „kinyitunk”, egyre inkább kölcsönhatásba hozunk a környezettel: az energiaszintek eltolódnak, kiszélesednek, végül pedig összefolynak.) Gyűrű esetén a legegyszerűbb esetben a vezetékek úgy csatlakoznak az eszközhöz, hogy az egyikben jellemzően befelé, a másikon pedig kifelé folyik az áram. (A visszaverődés miatt elképzelhető, hogy a bemenő vezetékben „visszafelé” is folyik áram, akár pont ugyanannyi, mint befelé: ekkor az eszköz teljesen átlátszatlan az elektronok számára.) Szemléletesen azt gondolhatjuk, hogy a belépő elektron hullámfüggvénye kettéválk, majd önmagával találkozik, interferál. A jelenség hasonlít a klasszikus kétréses kísérletre, csak most ernyő helyett a gyűrű mentén alakul ki az interferenciamintázat, ami az összeállítás vezetőképességének meghatározásával válik mérhetővé: ha a kimenő vezeték egy minimumnál csatlakozik a gyűrűhöz, akkor nem folyik áram, nulla a vezetőképesség, míg az interferenciamaximumok a vezetőképességben is csúcspontot jelentenek. Mindez persze akkor lenne jól látható, ha a kimenő vezeték helyzete változtatható lenne, de a geometria az eszköz elkészítésének módja miatt adott, a későbbiekben már nem módosítható. Így a kimenő vezeték az interferenciakép egyetlen pontjából vesz mintát. A vezetőképesség oszcillációi azonban fontos információt hordoznak, segítségükkel megbecsülhető például az, hogy mennyire kvantumos a viselkedés, és így milyen effektusok megjelenésére van esély. Egy lehetséges ötlet ilyen oszcillációk kimutatására az Aharonov–Bohm-effektus [7] felhasználása, azonban mágneses tér alkalmazása elektronikai eszközökben eléggé nehézkes. A kapufeszültségekkel változtatható erősségű spin-pálya csatolás sokkal praktikusabb lehetőséget kínál. Ez a kölcsönhatás érzékeny a spin irányára, így az interferenciajelenségek is szükségképpen spinfüggőek lesznek. A 3.a ábrán látható kúpfelületből az ellentétes spinirányokhoz (sötét és világos nyilak) tartozó, egymással szembe haladó áramokat leíró hullámok találkozására eredményeként például a 3.c ábra virágsziromra hasonlító interferenciaképe is kialakulhat. A spin-pálya kölcsönhatás erősségének változtatásával nemcsak a kitüntetett spinirányok, hanem a hozzájuk rendelhető hullámhossz és így a teljes interferenciakép is megváltozik. A kimeneten (és így a vezetőképességben) ezért periodikusan láthatunk interferenciaminimumokat, illetve -maximumokat.

Lehetséges alkalmazások

A kvantumos információfeldolgozás esélyével kapcsolatban lehet hasznos, hogy a spin-pálya kölcsönhatás erősségének változtatása a spin irányát is befolyásolja a kimenő vezetékben. Ha az elektron spinjét tekintjük az alapvető információhordozó egységnek, akkor három, elgondolhatatlanul hosszú ideig fennálló felté-



4. ábra. Kvantumgyűrűk rendszere, mint a Stern–Gerlach-berendezés megfelelője. A szürke különböző árnyalatai a spin-pálya kölcsönhatás relatív erősségét kódolják, a gyűrűk közti nyilak vastagsága pedig az ott folyó árammal arányos.

tel együttese szükséges ahhoz, hogy működő kvantumszámítógépünk legyen: képesnek kell lennünk spinpolarizált áramok létrehozására, el kell tudnunk forgatni a polarizáció irányát és létre kell hoznunk legalább egyféle, stabilan működő kétqubitese logikai kaput (amilyen pl. a NAND kapu klasszikus bitek és elektronika esetében). Jelenleg az első két lépés kivitelezhetőnek tűnik – akár gyűrűk segítségével is – a harmadik összetettebb probléma, aminek megoldására azonban van esély.

Felidézve, hogy a spin-pálya kölcsönhatás erősségének (azaz a megfelelő kapufeszültségnek) függvényében változik a kimeneten a spin iránya, nem meglepő, hogy egy adott méretű gyűrűt véve különböző módokon is elforgathatjuk a bemenő spin irányát. Ami érdekes, az az, hogy – elvileg – tervezhető módon készíthetők így kvantumos logikai kapuk, azzal a nem elhanyagolható pozitívummal, hogy a visszaverődés valószínűsége is alacsonyan tartható [8]. Ez azért kiemelkedő jelentőségű kérdés, mert egy nagyobb hálózatban a sok visszaverődés akár azzal is járhat, hogy a rendszer végül lényegében már nem vezet az áramot (holott anyagát tekintve kellene).

Spinpolarizált áramok létrehozása szintén lehetséges egy kvantumgyűrű segítségével, csak ebben az esetben a bemenet mellett két kimenő vezetékre van szükség. A bemenő elektronokat polarizálatlanak gondoljuk, azaz mindenféle polarizációs irány azonos valószínűséggel van jelen (elektromágneses hullámokra gondolva ilyen pl. a napfény). Az állapot leírható például úgy, hogy 50% valószínűséggel a bemeneti ponthoz a gyűrűben tartozó egyik kitüntetett spinirány (a 3. ábrán világosszürke nyilak), 50% valószínűséggel pedig az ellentétes (az ábrán sötétszürkével jelölt) irány. Ha a gyűrű méretét és a spin-pálya erősséget megfelelően választjuk, akkor elérhető, hogy a 3.c ábrán például az 1. kimeneten a világossal jelölt spinirányhoz nulla megtalálási valószínűség tartozzon, így

azon a ponton keresztül csak a sötét nyilaknak megfelelő spinek lépjenek ki. (A másik kimeneten a szerepek felcserélődnek.) Így végeredményben a sötét és világos nyilaknak megfelelően irányított, polarizált spinek lépnek ki a gyűrűből [9].

Ez a fajta polarizáló működés még sarkítottabban jelentkezik, ha nem egyetlen gyűrűt, hanem gyűrűk rendszerét tekintjük [10]. Ha feltesszük, hogy az egyes gyűrűkben függetlenül változtatható a spin-pálya kölcsönhatás erőssége, akkor ezek megfelelő választásával elérhető az is, hogy egymással ellentétes irányú bemenetek más-más kimeneten keresztül hagyják el a hálózatot, méghozzá úgy, hogy irányuk megegyezik a bemenetével, és lényegében visszaverődés sincsen (4. ábra). Érdeemes megjegyezni, hogy ez a javasolt eszköz a Stern–Gerlach-berendezéshez teljesen hasonló, azzal a különbséggel, hogy a számítások szerint működik, míg – amint már *Bohr* is megmutatta – a hagyományos, inhomogén téren alapuló berendezés elektron spinpolarizációjára elvben sem alkalmas.

Kvantumgyűrűk hálózata emellett még számos ígéretes alkalmazást tehet lehetővé [11], de ezek szempontjából alapvető kérdés, hogy a működőképességet mennyire befolyásolja (rontja el), ha a hőmérséklet növekszik, vagy a szabad úthossz a hálózat alkotóele-

meinek gyarapodása miatt összemérhető vagy kisebb lesz, mint a rendszer mérete. Számításaink szerint a működőképesség ugyan megéri ezeket a külső zavarokat, de a mai kísérleti eszközökkel is elérhető az a tartomány, ahol még mérhetőek a jósolt jelenségek [12]. Ennek alapján a kvantumgyűrűk és a spinfüggő interferenciát mutató hálózatok mind elméleti, mind kísérleti szempontból sok lehetőséget tartogatnak még.

Irodalom

1. J. Nitta, *NTT Technical Review* 2 (2004) 31.
2. Geszti T., *Fizikai Szemle* 56 (2006) 216.
3. E. I. Rashba, *Fiz. Tverd. Tela (Leningrad)* 2 (1960) 1224. [*Sov. Phys. Solid State* 2 (1960) 1109.]
4. J. Cserti, *Természet Világa* 136 (2005) 389.
5. S. Datta: *Electronic transport in mesoscopic systems*. Cambridge University Press, Cambridge, 1995.
6. B. Molnár, F. M. Peeters, P. Vasilopoulos, *Phys. Rev. B* 69 (2004) 155335.
7. M. Benedict, *Fizikai Szemle* 44 (1994) 190.
8. P. Földi, B. Molnár, M. G. Benedict, F. M. Peeters, *Phys. Rev. B* 71 (2005) 033309.
9. P. Földi, O. Kálmán, M. G. Benedict, F. M. Peeters, *Phys. Rev. B* 73 (2006) 155325.
10. P. Földi, O. Kálmán, M. G. Benedict, F. M. Peeters, *Nano. Lett.* 8 (2008) 2556.
11. O. Kálmán, T. Kiss, P. Földi, *Phys. Rev. B* 80 (2009) 035327.
12. P. Földi, M. G. Benedict, O. Kálmán, F. M. Peeters, *Phys. Rev. B* 80 (2009) 165303.

MERRE TART AZ EURÓPAI UNIÓ A NUKLEÁRIS HULLADÉKOK KEZELÉSE TERÜLETÉN?

Ormai Péter, Hegyháti József

Radioaktív Hulladékokat Kezelő Közhasznú Nonprofit Kft.

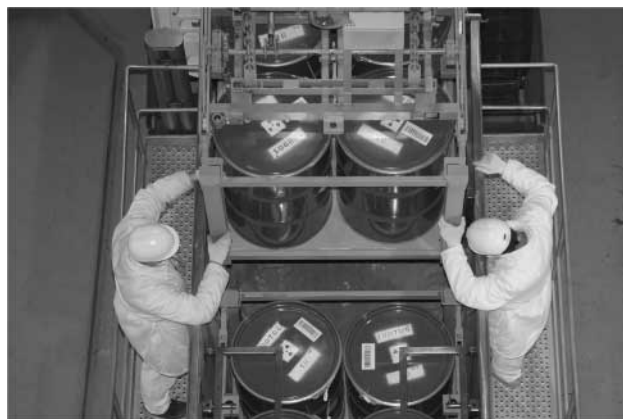
Az elmúlt évtizedben jelentős műszaki haladás történt az Európai Unióban a kis és közepes aktivitású hulladékok elhelyezése terén. Az igazi kihívás továbbra is a nukleáris fűtőelemciklus lezárása. Néhány országban a geológiai tárolók az építésre vonatkozó döntés közelébe jutottak. Az EU legújabb kutatási keretprogramjának fő célkitűzése megvalósítás-célú programok ösztönzése minden eddig még le nem zárt fontos kérdésben annak érdekében, hogy masszív tudományos és műszaki alapot lehessen teremteni a geológiai elhelyezés biztonsága és a technológiák demonstrálhatósága érdekében, ezzel kialakítva egy közös európai álláspontot a fő kérdésekben. A geológiai tárolók kifejlesztése mellett az elemszeparáció és transzmutáció (P&T) a másik fő fejlesztési irány.

Kis és közepes aktivitású hulladékok elhelyezése

Az elmúlt évtizedben – a nemzeti programok keretében végzett munkának köszönhetően – jelentős tudományos és műszaki haladás történt az Európai Unióban a rövid életű kis és közepes aktivitású hulladékok

biztonságos végleges elhelyezése területén. Az ilyen típusú hulladékok elhelyezésére korszerű felszín közeli és felszín alatti tárolók épültek. Európában az atomerőművel rendelkező országok majd mindegyike üzemeltet hulladéktárolót, vagy pedig folyamatban lévő programja van a létesítésre. Kivételt képez Hollandia és Olaszország [1].

Kis és közepes aktivitású hulladékok elhelyezése Pakson a speciális szállítójárműre (foto NRHT).



1. táblázat		
A nagy aktivitású radioaktív hulladékok tárolóinak tervezett időpontjai az EU néhány országában		
ország	tároló építésének kezdete	üzembe helyezés becsült időpontja
Svédország	2015	2020
Finnország	2015	2020
Franciaország	2015	2025
Belgium	2025	2040–2080
Németország	2025	2030
Csehország	2030–2050	2065
Magyarország	2020–2046	2047

Az utóbbi években több ország vizsgálja a nagyon kis aktivitású hulladékok elhelyezésének kérdését, amely a közeljövőben egyre nagyobb számban leszerelésre kerülő atomerőművek hulladékkezelési stratégiájának fontos eleme lehet. Franciaország és Spanyolország már üzembe is helyezett ilyen hulladék-tárolót.

Megoldandó feladatot jelent még a hosszú életű kis és közepes aktivitású hulladékok végleges elhelyezése. Ezen a területen Svédország és Franciaország jár az élen az EU-n belül.

A nukleáris fűtőelemciklus lezárása

Az igazi kihívás továbbra is a nukleáris fűtőelemciklus lezárása. Jelenleg két jól kiforrott koncepció létezik a fűtőelemciklus lezárására. Az egyik az elhasznált fűtőelemek újrafeldolgozása (reprocesszálása), a hasznosítható anyagok kinyerésének igényével és a radioaktív hulladékok üvege ágyazásával, illetve a kiégett fűtőelemek közvetlen végleges elhelyezése. Míg az első ipari méretekben már évtizedek óta működik, addig a közvetlen végleges elhelyezésre még nem került sor.

Figyelembe véve, hogy nagy aktivitású radioaktív hulladék mély geológiai elhelyezése 2020 előtt egyetlen EU tagállamban sem várható, ezért a következő években is minden felhasználónak a kiégett fűtőelemek vagy az üvegezett nagy aktivitású hulladékok hosszú idejű átmeneti tárolására kell berendezkednie.

Geológiai elhelyezés

Ma már nemzetközi egyetértés van a szakemberek között a tekintetben, hogy a nagy aktivitású és/vagy hosszú élettartamú radioaktív hulladékok biztonságos, végleges elhelyezésének legjobb megoldása stabil, mély geológiai formációkban történhet. A legnagyobb kihívás, hogy a geológiai elhelyezésbe vetett bizalmat közvetíteni tudják a társadalomnak [2, 3].

2. táblázat		
A mély geológiai tárolók becsült költségei		
ország	kiégett fűtőelem mennyiség (tU)	költség (milliárd euro)
Finnország *	5 500	3
Svédország	9 100	3,5
UK	16 400	15
Spanyolország	6 800	3

* a telephelykutatás, a K&F, az engedélyezés és az átmeneti tárolás költségeit nem tartalmazza

A tároló fejlesztésben élenjáró országok többsége a mélybeli kőzetkörnyezetet a helyszínen vagy a helyszínhez hasonló körülmények között (in-situ) vizsgálja az erre a célra kialakított föld alatti kutató bázison, vagy elterjedtebb nevén kutató laboratóriumban (angol rövidítéssel: URL). Mára Európában Németország, Finnország, Franciaország, Spanyolország, Svédország, Belgium és Svájc halmozta fel a legtöbb tapasztalatot a föld alatti kutatásokban. Ezek a vizsgálatok minden esetben széleskörű nemzetközi együttműködésben folynak, messzemenően támaszkodva egymás eredményeire és tapasztalataira. Az Európai Unió is támogatja ezt a fajta munkát, kiemelten a belga és a svéd programot. Ez utóbbi indulásától fogva nemzetközi kutató létesítményként funkcionál.

A föld alatti kutatólaboratóriumok nem csak műszaki, tudományos szempontból nagyon fontosak. Külön ki kell emelni, hogy ezek a radioaktív hulladék-elhelyezéssel összefüggő lakossági kapcsolatépítés meghatározó létesítményei is. A hulladéktároló projektek egyik legérzékenyebb pontja szerte a világon a társadalmi elfogadtatás.

Néhány országban mára már az építésre vonatkozó döntés közelébe jutottak a kiégett fűtőelemek és nagy aktivitású hulladékok elhelyezésére szolgáló geológiai tárolók projektjei, bár ez idáig ilyen tároló nem üzemel és a legtöbb országban még évekre van a létesítéstől (1. táblázat). A felmerülő akadályok ellenére egyetlen országban sem vetették el a geológiai tároló létesítésére vonatkozó döntést, bár sok országban lelassult a telephely-kiválasztási program, néhol pedig újragondolják a telephelyek kiválasztásának folyamatát. Az újonnan csatlakozó országok mindegyike még több évtizedre van a megoldástól.

A mély geológiai formációban történő elhelyezés finanszírozása a „szennyező fizet” elv alapján biztosítható. A 2. táblázat a tároló költségeire tartalmaz becsléseket. 1000 tonna urán (tU) végleges elhelyezése közelítőleg 0,5–1,0 milliárd euróba kerülhet [4].

Elemseparáció és transzmutáció

Annak ellenére, hogy a nagy aktivitású hulladékok mély geológiai formációban történő végleges elhelyezésével szinte minden nukleáris iparral rendelke-

ző ország foglalkozik, sok helyen keresik azokat a lehetőségeket, amelyek segítségével csökkenthetők a jövő generációk terhei. Az egyik ígéretesnek tartott lehetőség a hulladékokban található hosszú élettartamú radionuklidok átalakítása oly módon, hogy a maradékok elhelyezését követően csak jóval rövidebb idejű intézményes ellenőrzésre legyen szükség. Az eljárás a transzmutáció, illetve P&T (Partition & Trans-mutation), olyan nukleáris folyamat, amellyel a hosszú élettartamú radioizotópok nagy részét stabil, vagy rövid élettartamú izotóppá lehet alakítani reaktorban, vagy az e célra kialakított részecskegyorsítókban [5].

Mivel a mai technológiákkal a megkívánt szétválasztási hatékonyság nem érhető el, továbbá a szükséges reaktorteknika sem eléggé kiforrott, ezért a transzmutációs programokat tovább kell fejleszteni, mielőtt dönteni lehetne gyakorlati alkalmazásukról. Mai tudásunk szerint azonban nincsen olyan technológia, amelynek alkalmazásával teljesen kiválthatók lennének a geológiai tárolók. Ezért a transzmutáció nem is tekinthető önálló koncepciónak, sokkal inkább a reprocesszáli változat finomításának. E technológiánál a nagy aktivitású hulladékból leválasztják a transzurán izotópokat (aktinidákat) és a hosszú felezési idejű hasadási termékeket, majd megfelelő atomreaktorban átalakítják azokat rövidebb élettartamú, illetve stabil izotóppokká.

A negyedik generációs reaktorok fejlesztésénél ezt a feladatot már figyelembe veszik, és olyan reaktortípusok kidolgozását és üzembe állítását is tervezik, amelyeknek egyik fontos feladata – a villamosenergia-termelés mellett – az említett transzmutáció. Ennek révén olyan hulladékot kapunk, amelynek aktivitása kisebb lesz (bár továbbra is nagy aktivitású marad) és megfelelő szintre történő lebomlásához nincs szükség több százezer évre, esetleg néhány száz év is elegendő lesz.

A fűtőelemciklus korszerűsítése és zárása során flexibilis elemszeparációs eljárásokat terveznek kidolgozni, hogy az uránt és a plutóniumot többször is fel lehessen használni; ehhez a gyorsreaktorok elterjedésére, az aktinida-kémia fejlődésére, a szeparációs technológia fejlesztésére és az úgynevezett minor aktinidákat (Am, Cm, Np) is tartalmazó fűtőelemek gyártási technológiájának kidolgozására van szükség. A mai tudás szerint ipari üzemek 2040. előtt nem kezdik meg működésüket.

A ma reálisnak nevezhető számítások szerint a kiégett fűtőelemek több mint két nagyságrendű radiotoxicitás-csökkenése P&T alkalmazásával 500–3000 év után érhető el, szemben a nyitott ciklussal, ahol ugyanez az érték 130 000 évre tehető. Ezt az időtávot követően a maradék radiotoxicitás 7,83 t természetes – leányelemeivel egyensúlyban lévő – urán (ennyi szükséges 1 t friss fűtőelem előállításához) radiotoxicitásával egyenlő. Ez azt is jelenti, hogy ezt az „új”, kedvezőbb tulajdonságúvá tett hulladékot továbbra is mély geológiai tárolóban kell elkülöníteni a bioszférától.

Európai Unió kutatások a nukleáris hulladékok terén

Egyre hangsúlyosabban fogalmazódik meg az Európai Bizottság Kutatási Igazgatósága részéről az integrált, összehangolt kutatási programokra vonatkozó igény. Fontos kérdés, hogy a radioaktív hulladékokkal foglalkozó szakembergárda hogyan tudná jobban hasznosítani a tudományos és technológiai tudásanyagot a legfontosabb kutatási területeken, illetve az új kutatási hálózatokra tett kezdeményezések segítségével miként lehetne jobban strukturálni és hatékonyabbá tenni a jövőbeni európai kutatási együttműködést.

Fontos lépések már eddig is történtek a hatékonyabb együttműködés érdekében a korábbi Euratom Keretprogramokban, ahol a partnerszervezetek megosztották tapasztalataikat mind a stratégiai, mind pedig a tudományos kérdésekben. Az olyan szervezeti keretek, mint az Összehangolt Programok (Concerted Actions), vagy a Tematikus Hálózat (Thematic Network) nagy mértékben hozzájárultak ahhoz, hogy az alapvető kérdésekben közös irányvonalak és megközelítések alakuljanak ki. Ily módon megtehető az a műszaki konszenzus, amely a nemzeti programok prioritásainak meghatározásában jelenthet segítséget.

Annak ellenére, hogy ezen összehangolt akciók korábban is segítettek abban, hogy számos problematikus területen sikerüljön közös megközelítést kialakítani, nem feltétlenül biztosították a leghatékonyabb kutatási struktúrát és a tudásanyag legjobb hasznosítását. Az Európai Bizottság úgy véli, hogy a 6. és 7. Keretprogram új szervezeti formái, úgy mint az Integrált Projektek (Integrated Project) és a Tudásközpontok (Network of Excellence) valóban szervezettebb és hatékonyabb kutatásokat fognak eredményezni. Ehhez azonban arra is szükség van, hogy a radioaktív hulladékok kezelésében érintett szervezetek – kutatók, programvégrehajtók, hatóságok – között még szorosabb együttműködés valósuljon meg. Az Európai Bizottság Kutatási Igazgatósága a 7. Keretprogram Európai Technológiai Platform létrehozását szorgalmazza.

A 6. és 7. Keretprogram fő célkitűzése megvalósítás-célú K&F minden eddig még le nem zárt fontos kérdésben annak érdekében, hogy masszív tudományos és műszaki alapot lehessen teremteni a geológiai elhelyezés biztonsága és a technológiák demonstrálhatósága érdekében, ezzel alakítva ki közös európai álláspontot a fő kérdésekben.

A jelenlegi vizsgálati irányok a következők:

- A befogadó közet in-situ jellemzése generikus és telephely-specifikus URL-ekben.
- A meghatározó folyamatok (geoszférától a bioszféráig) vizsgálata a tároló környezetének megismeréséhez.
- Robusztus biztonságelemzési módszertan kifejlesztése (modellezési eszközök).
- Mérnöki tanulmányok és a tároló megvalósításának demonstrálása.

- A lakossági elfogadást támogató társadalmi kérdések vizsgálata.

Az eddigi kutatásokkal kapcsolatosan néhány fontos megállapítás tehető. A nagy aktivitású hulladékok elhelyezésére szolgáló geológiai tárolókkal kapcsolatos K&F tevékenység időigényes, komplex multi-diszciplináris terület. A programok lassan és óvatosan valósulnak meg (évtizedek telhetnek el a koncepció kialakításától a megvalósításig). Az Euratom keretprogramok végig jelen voltak ezen összetett folyamat során, és továbbra is folytonosságot jelentenek. Mivel az alapkoncepció kiforrott, a további vizsgálatok az optimalizálást és a bizonytalanságok csökkentését szolgálják.

A további európai kutatási erőfeszítések elsősorban a nagyobb mértékű integrációt célozzák.

Nemzetközi vagy nemzetek feletti megoldások

Gyakorlatilag minden nemzeti radioaktív hulladékkezelési program deklarálja, hogy nemzeti szintű megoldást kell találni a saját hulladék elhelyezésének problémájára. Ez leginkább a jelenlegi politikai realitások tükröződése, mintsem alapelv. A témában megjelent nemzetközi tanulmányok, valamint a különböző más fórumokon lezajlott viták mind arra a következtetésre jutottak, hogy nincsenek alapvető etikai vagy környezetvédelmi érvek a nemzetközi hulladéktárolási projektekkal szemben. Az aggodalmak forrásai újabban a terrorfenyegetettség és proliferáció.

Valóban nyilvánvaló, hogy erős gazdasági és műszaki érvek szólnak az ilyen projektek mellett, különösen olyan nemzetek esetében, amelyek kis atomenergetikai kapacitással rendelkeznek. A költségek, a biztonság és a védelem (safeguards) szempontjából a nemzetközi együttműködés ideális megoldás lehetne, hiszen így a nukleáris anyagok megbízhatóbb elzárása mellett a nukleáris technológiák alkalmazását is lehetővé tenné még több ország számára. A kérdés társadalmi és politikai érzékenysége miatt a nagy aktivitású hulladékok végleges elhelyezésében élenjáró országok (Svédország, Finnország) különösen visszafogottak a regionális hulladéktárolás kérdésében.

Hazai helyzet

Magyarországon az atomerőművi kis és közepes aktivitású hulladékok végleges elhelyezésének kérdése a jelenleg Bataapátiban épülő tárolóban hosszú távon megoldást jelent.

A kiégett fűtőelemek átmeneti tárolására szolgáló létesítmény 50 évre megoldja a kazetták biztonságos tárolását. Ez idő alatt kell végleges megoldást találni.

1995-ben program indult a nagy aktivitású és hosszú élettartamú hulladékok elhelyezésének megoldására. Középpontjában elsősorban azok a helyszíni vizsgálatok voltak, amelyeket 1996 és 1998 során a

Mecsek hegységben található (akkor még működő) uránbányából megközelíthető Bodai Agyagkő Formáció (BAF) területén, 1100 m mélységben végeztek el. A program három évre korlátozódott a bánya 1998 évi bezárása miatt. 2004-től folytatódtak a BAF megismerését és alkalmas terület kijelölését célzó vizsgálatok és kísérleti munkák. Az újrainduló kutatások elsődleges célja egy földalatti kutatólaboratórium helyszínének kijelölése.

Összefoglalás

A nukleáris energia jövőbeli alkalmazásai alapvetően hatással lesznek a képződő nukleáris maradékanyagok mennyiségére és minőségére.

A következő évtizedekben az atomenergia felhasználásának fenntarthatósága érdekében kifejlesztik az atomerőművek negyedik generációját. Az atomerőműveknek ez az új generációja a természeti erőforrások javított felhasználásával és a nagy aktivitású hulladékok mennyiségének minimalizálásával döntően befolyásolja majd az atomenergetika fenntartható alkalmazását. A fejlesztésekben nagy szerep jut a gyorsneutron-spektrumú reaktoroknak, amelyek lehetővé teszik a fűtőelemciklus zárását.

A negyedik generációs rendszerek egyrészt minimalizálni fogják a nukleáris maradékanyagok mennyiségét, másrészt pedig jelentősen csökkentik a végleges elhelyezés nagyon hosszú felügyeleti időszakát, ezáltal csökkentve a jövő generációk terheit, valamint növelik a lakosság egészségének és a környezet védelmét.

Nemzetközileg elfogadott elv, hogy minden országnak saját magának kell gondoskodnia a területén keletkezett radioaktív hulladékok végleges elhelyezéséről. Ez nem feltétlenül az adott országon belüli elhelyezést jelenti. Az utóbbi időben felélénkült az érdeklődés a nemzetközi megoldás iránt. E nemzetközi hasznosítású tárolókra vonatkozó elképzelések ma még nagyon kezdeti fázisban vannak, és egyáltalán nem biztos, hogy – a befogadó országok lakosságának ellenállása következtében – valósággá válhatnak. Ezért minden atomenergiát alkalmazó országnak folytatnia kell a saját területén történő elhelyezésre alkalmas terület keresését és a telephely előkészítését.

Irodalom

1. Ormai P: *Nemzetközi és hazai törekvések a radioaktív hulladékok biztonságos kezelésére és elhelyezésére*. Radioaktív Hulladékokat Kezelő Közhasznú Társaság, Budapest, 2003.
2. *Geological Disposal of Radioactive Waste Produced by Nuclear Power, from Concept to Implementation*. EUR 21 224, European Communities, 2004.
3. *Timing of High-level Waste Disposal*. OECD Nuclear Energy Agency, NEA No. 6244, 2008.
4. Euradwaste '08 Conference: Community policy and research and training activities. Luxemburg, 2008. Oct. 20–23.
5. *Partitioning and transmutation: Towards an easing of nuclear waste management program*. EUR 19785, European Commission, 2001.

AZ ATOMENERGIA ALKALMAZÁSÁRÓL

– NEM MŰSZAKI SZEMMEL

Trampus Péter
Debreceni Egyetem Műszaki Kar

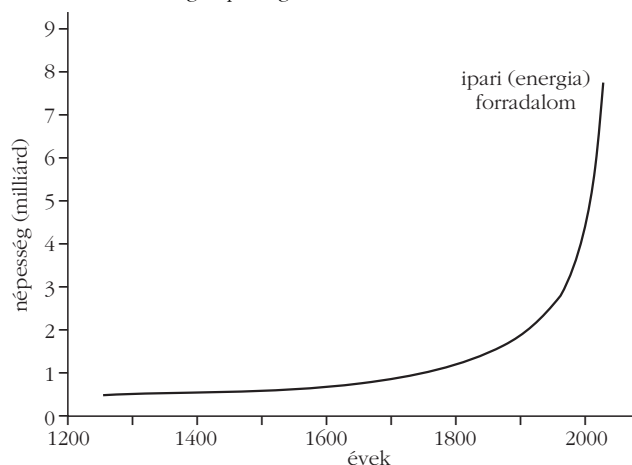
Az atomerőművek azon nyilvánvaló adottságuk eredményeként, hogy működésük közben nem bocsátanak ki üvegházhatású gázokat, hozzájárulnak a globális éghajlatváltozás ütemének lassításához. Abhoz, hogy hozzájárulásuk a jelenleginél hatékonyabb legyen, az atomerőművek alkalmazásával kapcsolatosan olyan akadályokat is le kell győznie az emberiségnek, amelyek elsősorban nem műszaki, gazdasági, hanem más természetű – etikai, pszichológiai, szociális, kulturális – okokra vezethetők vissza. Az atomenergia alkalmazásának ezek a szempontjai gyakran nem kapnak akkora figyelmet, mint a tisztán műszaki, gazdasági vagy éppen proliferációs szempontok. A cikkben – elsősorban a nemzetközi fórumokon elhangzottak, valamint vezető folyóiratokban publikáltak alapján – sorra vesszük és röviden elemezzük ezeket a szempontokat, majd következtetéseket vonunk le az atomenergia jövőbeni alkalmazására nézve.



Az emberi társadalom működése – hasonlóan más, dinamikus folyamatokból felépülő rendszerekhez – külső energiát igényel. Egészen a 19. század kezdetéig a külső energia forrása – közvetlen vagy közvetett formában – a Nap volt. A 19. század kezdetén váltak tömegesen elérhetővé a fosszilis primerenergia-hordozók, ami megváltoztatta az életet, és jelentős mértékben hozzájárult – egyebek mellett – a népesség exponenciális növekedésének elindulásához, 1. ábra.

Ma az emberiség energiaellátással kapcsolatos problémája (divatos kifejezéssel élve: kihívása) kettős. Az egyik problémát a világ népességének és a fejlődő országok életszínvonalának folyamatos növekedésével együtt járó energiaigény kielégítése jelenti. A másik probléma a globális éghajlatváltozás kezelése. A cikk általánosságban az energiaproblémán, és kifejezetten az atomenergia-alkalmazás műszaki-gazdasági szempontjain túlmutató kérdéseket kísérli meg összefoglalni.

1. ábra. A világ népességének növekedése a 13. századtól



A népesség növekedésének kérdése

Az emberiségnek a Földre gyakorolt hosszú távú hatását a népesség és az életmód határozza meg. Ha elfogadjuk azt, hogy az „ökológiai lábnyom” jól definiálja azt a területet (földet, vizet, keletkező hulladék elhelyezését stb.), amely egy ember életéhez szükséges, akkor kijelenthető, hogy csaknem három Föld nagyságú bolygó kellene ahhoz, hogy a 2050-re prognosztizált népesség a jelenlegi életmód és fogyasztási szokások megtartásával folytathassa életét. Ezzel szemben abban az esetben, ha az emberiség alapvetően megváltoztatná életmódját és fogyasztási szokásait, akkor akár 10 milliárd ember is élhetne a Földön. Ennek az lenne a feltétele, hogy lakásaik nem lennének nagyobbak, mint a japán miniatűr hotelek (*capsule hotels*), rizs-alapú vegetáriánus diétán élnének, nem vagy ritkán utaznának, a világhálón kommunikálnának, pihenési és szórakozási szükségleteiket a virtuális valósággal elégítenék ki és így tovább. A felvázolt tendencia egyébként illeszkedik a jelenlegi környezetbarát fejlődési tendenciához (miniatűrízálás, információs technológia), megvalósulása mégis erősen kétséges [1]. Ezért az emberiségnek szembe kell néznie a népességnövekedés problémájával. Amennyiben feltételezzük, hogy a fejlett országok energiaigénye nem növekszik jelentős mértékben, ez akkor is a jelenlegi energiaigény megkétszereződését-megháromszorozódását jelentheti az évszázad közepére.

Annak ellenére, hogy az energiaprobléma egyik oka a népesség növekedése (ami a világ különböző országaiban egymástól jelentős mértékben eltérő tendenciát mutat), ritka annak a következtetésnek a hangoztatása a tudósok körében, hogy magát ezt az okot kellene kiküszöbölni. A népesség stabilizálásának kérdéséről általában nem beszélnek, aminek érthető politikai, humanitárius és egyéb okai lehetnek, de a hallgatás talán azzal is magyarázható, hogy az érintett tudósok (fizikusok, mérnökök) nem szívesen lépnek tudományterületük határain túlra. Nem beszélni a kérdésről ebben a megközelítésben viszont annyit jelent, mint amikor az orvos aszpirint ír fel rákbetegnek, mondta *Bartlett*, egy amerikai fizikus, aki a jelenséget a tudósok csendes hazugságának nevezte [2]. Bartlett javaslata, hogy amennyiben elfogadjuk azt, hogy a probléma gyökere valóban a népesség növekedése (amit ő meggyőződéssel állít), akkor a legfontosabb megvitatandó kérdés az, hogy mi ad jobb általános megoldást: a népesség stabilizálásán dolgozni, vagy a folyamatosan szűkülő forrásokat a folyamatosan növekvő népesség között elosztani? Ebben a kérdésben felelőssége van a fizikustársadalomnak. A kérdés ilyenén felvetése természetesen a legszükségesebb reakciókat váltotta ki, lásd a *Physics Today* 2004. évfolyamának későbbi olvasói leveleit.

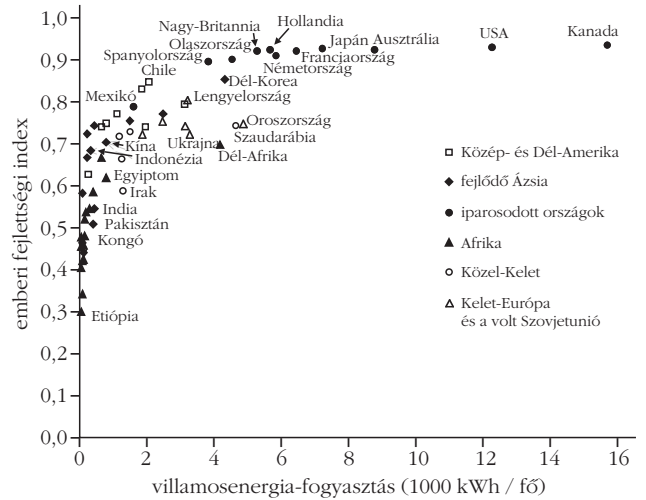
Az emberi fejlettség és a villamos energia

Azt gondolhatnánk, hogy több energia felhasználása nagyobb jóléttel párosul, ami azonban csak általánosságban igaz. Ha egy ország lakossága növekszik, a többletenergiát a nagyobb népesség azonos (vagy csökkenő) életszínvonalon tartására is fel lehet használni. Az életszínvonal növelésére csak abban az esetben lehet esély, ha a többletenergia előállítás és felhasználása hatékonyabb a jelenleginél. Az ENSZ a tagországai statisztikai mutatóiból létrehozta az „emberi fejlettségi” indexet (*Human Development Index, HDI*) [3]. A HDI egy ország átlagos eredményeit az emberi fejlődés következő területeinek helyzetét szintetizálva fejezi ki: hosszú és egészséges élet, tudás és tisztességes életszínvonal. A 2. ábra a világ 60 legnépesebb országának HDI-jét mutatja a villamosenergia-felhasználásuk függvényében (az ábrán olyan országok szerepelnek, amelyekre létezik HDI). Az ábrából látható, hogy a HDI körülbelül 4000 kWh éves fogyasztás felett egy állandósult magas értéket mutat. Annak ellenére, hogy minden ország helyzete egyedileg kezelendő, ez a korreláció évtizedekre visszamenőleg érvényesnek tűnik. Mind ebből az a következtetés vonható le, hogy a szegény országok jólétének növelése jelentősen nagyobb energiafogyasztást fog igényelni a jelenlegi előrejelzéseknél [4].

Az éghajlatváltozás globális természete és hatása mára megkérdőjelezhetetlen. Azt is látni kell azonban, hogy a világ országai az ok kiváltásában nem egyformán vettek részt, ugyanis a gazdag (OECD) országok bocsátották ki az üvegházhatású gázok többségét. A szegény országok érintettsége viszont fokozottabb, amit földrajzi helyzetük, a mezőgazdaságtól való erősebb függésük és – természeti erőforrásaik hiányában – sebezhetőségük magyaráz. Ez a helyzet kettős egyenlőtlenségre mutat rá: egyrészt a gazdag országok felelősségére a jelenlegi helyzet miatt, másrészt, hogy a következmények erősebben érintik a szegény országokat [5]. Ennek az egyenlőtlenségnek a kezelése nem nélkülözheti az etikai megközelítést.

Az energiaigények kielégítésének hierarchiája

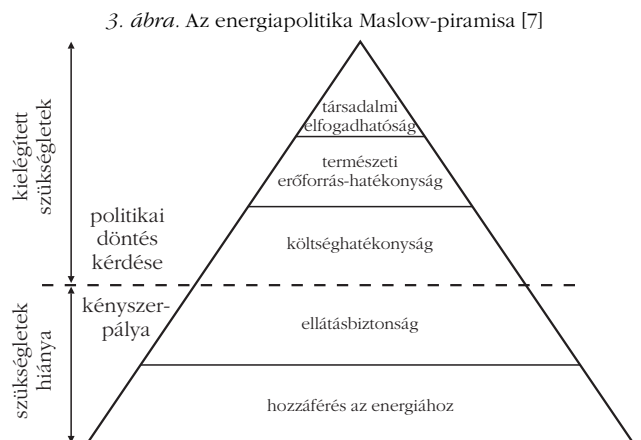
Maslow, egy amerikai pszichológus a múlt század közepén alkotta meg elméletét az emberi igények motívációs szerkezetéről. Az igényeket csoportokba rendezte és definiálta ezek hierarchiáját, amit vizuálisan a róla elnevezett Maslow-piramis szemléltet [6]. Ennek lényege, hogy az ember csak a fizikai és szellemi jóléttel kapcsolatos alacsonyabb rendű igényei kielégítését követően törődik személyisége fejlődésének magasabb rendű igényeivel. Visszatekintve az egyes nemzetek energiapolitikájának kialakulásra és fejlődésére, megállapítható, hogy a piramismoddal alkalmazható az energiapolitikára is. Csak miután az energiához való hozzáférés biztosított volt, került át a hangsúly az ellátás biztonságára, majd csak ezt köve-



2. ábra. Emberi fejlettségi index a villamosenergia-fogyasztás függvényében [4]

tően vették figyelembe az egyes országok a költségek hatékonyságát. Az iparilag fejlett országok az 1970-es évek végétől kezdtek figyelni a természeti erőforrásaik hatékonyságának kérdésére, és csak ezután a társadalmi elfogadhatóságra. A 3. ábra az energiapolitika Maslow-piramisát mutatja be [7]. Amennyiben érvényesnek tekintjük az emberi igények hierarchiájával való analógiát, akkor nyilvánvaló, hogy az egyes prioritások közötti egyensúly kialakítása politikailag korlátozottan, és kizárólag a magasabb rendű társadalmi igények biztosítása esetében lehetséges.

Az előzőekből következik, hogy ameddig az ellátásbiztonság dominál (vagy jelen van) a nemzetközi energiapolitika színpadán, addig erősen kétséges a nemzetközi megegyezés a magasabb rendű igények kérdésében (*Kyoto-jegyzőkönyv*). Tény, hogy világszerte még mindig körülbelül másfél milliárd ember nem jut villamos energiához. Fontos kérdés az ellátásbiztonság fogalmának helyes értelmezése. A közvélemény ellátásbiztonsággal kapcsolatos felfogása ugyanis nemcsak tényeken nyugodhat, hanem bizonyos mértékben érzelmi alapokon is. Mindaddig, amíg az ellátásbiztonság megfelelő szintjében nincs egyetértés, addig a magasabb rendű igények tükrében megkérdőjelezhető érdekcsoportok a „félelem takti-



3. ábra. Az energiapolitika Maslow-piramisa [7]

káját” alkalmazva azt sugallhatják, hogy az ellátásbiztonság adott szintje nem megfelelő, és a figyelmet a magasabb rendű igényekről áterelhetik pusztán az ellátásbiztonság kérdéseire.

Szendioxid-kibocsátás nélküli technológiák

Évente 18 000 TWh villamos energiát állítanak elő, ami gigatonnában mérhető mennyiségű szén-dioxid kibocsátásával jár. A széndioxid-kibocsátás nélküli technológiák közül a vízerőművek, az atomerőművek és a szélerőművek sorolhatók az érett technológiák közé. A képet a biomassa, a geotermikus energia, továbbá a Nap és az óceán energiája teszi teljessé. Nyilvánvaló, hogy a növekvő energiaigény kielégítésére és a globális éghajlatváltozásra adandó „globális” válasznak ezekre a technológiákra kell építenie. Részigazságot tartalmaz, és az atomenergiával szembeni előítéllettel terhelt az a megfogalmazás, amelyik a globális éghajlatváltozás válaszát a megújuló energiaforrásokban látja.

A széndioxid-kibocsátás nélküli technológiák értékelése több szempontból lehetséges és szükséges. Ilyen szempontok például: a primerenergia-hordozó, valamint a technológia rendelkezésre állása, a létesítés és üzemeltetés költsége, az energiaátalakítás hatásfoka, környezeti, biztonsági, elfogadási szempontok stb. Erről számtalan értékelést, rangsorolást lehet olvasni, akár magyar nyelven is – például [8, 9] –, amelyeket azonban befolyásolhatnak a különböző érdekcsoportok (utalunk itt az előző pontban írottakra). A közelmúlt egyik tárgyilagos elemzése olvasható a [10] hivatkozásban. Meggyőződésünk, hogy az atomenergia magában hordozza annak lehetőségét, hogy tartósan részt vállaljon az energiaprobléma alapvető kérdéseinek megoldásában.

Az atomenergia alkalmazásának ellenzése

Az atomenergia békés alkalmazását kezdettől fogva árnyak kísérik, ami kihat a technológia alkalmazása jövőjének a megítélésére. Az alkalmazásra a legsötétebb árnyékot a Hirosimára és Nagaszakira ledobott bombák vetik. Ennek eredményeként az atomenergiát a világ kezdettől fogva nem a tudomány egyedülálló vívmányának tekintette, mert az emberekben az atomenergia fogalmával való találkozás elsősorban az atomháborútól való félelmet asszociálta. Ezt az asszociációt csak erősítette a múlt század közepén a hidegháború atomfegyverkezési versenye, majd megkoronázta az atomenergia-ellenes mozgalmak megjelenése a nyugati demokráciákban. Ez utóbbiaknak sokkal inkább társadalmi mozgatórugói voltak, mint az atomenergia békés alkalmazásának tényleges elutasítása. A mozgalmak az Amerikai Egyesült Államokban a kormány külpolitikáját ellenző mozgalmakból nőttek ki, Nagy-Britanniában a szociálpolitikai problémák adtak lendületet nekik, és szinte mindenütt a pop-kultúra részeivé váltak. Mind-

ezeket kiegészítették a 90-es évek energiaipari liberalizálási és privatizálási folyamatai, amelyeket úgy lehet röviden jellemezni, hogy a közgazdász gondolkodás úrrá lett a mérnöki gondolkodáson [11]. Az atomerőmű-építkezések világméretű megtorpanásához tehát több különböző tényező hozzájárulása kellett, amelyek együttes hatása lényegesen jelentősebb volt, mint például a TMI atomerőmű balesete, ami egyébként ugyan ebben az időszakban történt.

Az atomenergia ellentmondásos megítéléshez az előző – elsősorban érzelmileg és politikailag motivált – okokon túl több, a társadalom szemében irracionális elem is hozzájárul. Ezek a tudománynak (elsősorban a fizikának) a huszadik század első felében lezajlott azon jelentős szemléletváltásával hozhatók összefüggésbe, amely nélkül a nukleáris energia sem katonai, sem polgári alkalmazást nem nyert volna. A viszonylag egyszerűen befogadható newtoni mechanika mellett megjelent a hétköznapi ember szemében misztikus einsteini relativitáselmélet és a kvantummechanika. Az érthető determinisztikus szemlélet mellett megjelent a jelenségek valószínűségi szemlélete és az ennek törvényszerűségeit leíró elmélet. Az ellentmondásos megítéléshez jelentős mértékben hozzájárul az is, hogy a nukleáris technológia olyan technológia, amelyhez hozzátartozik a radioaktív sugárzás. Megjelent tehát egy olyan veszélyforrás, amit az emberi érzékszervek nem észlelnek. A példaként említett jelenségek a tudósok számára érthetőek, de a hétköznapi emberek döntő többsége számára felfoghatatlanok, ezért gondolkodásukban zűrzavart okoznak. A zűrzavar mesterségesen fokozható, lásd az előző bekezdésben írottakat. Ennek a zűrzavarnak a társadalmi gondolkodásban való tartós uralkodása szorosán összefügg az ismeretek hiányával, ami felhívja a figyelmet – a természettudományos) oktatás jelentősége mellett – a korrekt és mindenki számára érthető tájékoztatás szükségességére. Az előzőek alapján talán érthető, hogy egy ilyen komplex kérdésben nehezen képzelhető el társadalmi méretű egyetértés. A társadalmi egyetértés hiányát pótolhatja politikai akarat, ami viszont megoszthatja a társadalom eltérő módon gondolkodó csoportjait.

Érdeemes elgondolkodni azon, hogy a nyugati világban megtorpan (jelenleg újraéledésének jeleit mutató) atomenergia-felhasználás miért nem vesztette el hitelét Ázsiában. Különösen érdekes a kérdés felvetése Japán esetében, amely elszenvetde az egyetlen atomcsapást. Ugyan eltérő berendezkedésű országokról van szó, ha Indiát, Kínát, Koreát vagy Japánt tekintjük, de nem hagyható figyelmen kívül az a hatalmas kulturális örökség, amely ezen országokra jellemző. Indiai tudósok szerint az energiaprobléma megoldásának záloga a keleti és nyugati filozófia alappilléreinek együttes, előítélet-mentes és kiegyensúlyozott figyelembe vétele lehet [12], ami hozzájárulhat egy valódi paradigmaváltáshoz. Itt energia, élelem, ivóvíz, föld, egészség komplex módon kezelendő, ami az etikai, ökológiai, emberi jogi kérdések együttes figyelembe vételével jár. A kérdés ilyen megközelítésének

igényét alátámasztja, hogy érzékelhető a jelei annak, hogy ahogyan a 20. század műszaki fejlődésének gyökerei Európában voltak, úgy a 21. század fejlődését Ázsiában fogják írni.

Következtetések

Az energiaprobléma megoldása és ezen belül az atomerőművek hosszú távú szerepének megszilárdítása jelentős erőfeszítéseket igényel az emberiségtől. Az erőfeszítéseket több síkon kell kifejteni. Egyrészt az energiaprobléma nem kezelhető más globális problémáktól elszigetelve, másrészt nem szűkíthető le egyszerű műszaki vagy gazdasági kérdésekre. Egyre többször találjuk magunkat szembe a kérdés etikai vonatkozásaival, amelyek kezelése nélkül a megnyugtató megoldás nehezen képzelhető el. Úgyszintén megkerülhetetlenek azok a filozófiai vonatkozások, amelyek a keleti és nyugati kultúra egymástól eltérő gyökerein alapulnak. Az atomenergiától való indokoltan félelem eloszlatására előrelépés szükséges az oktatásban és a tárgyilagossá információs szolgáltatásban. A probléma sikeres megoldásához, egyúttal az atomenergia jövőjéhez az egész világra kiterjedő (globális)

együttgondolkodásra van szükség. A globális együttgondolkodás feltétele egy „fejlett” civilizáció, és a fejlett jelzőt itt nem gazdasági vagy ipari, hanem annál lényegesen szélesebb értelemben kell érteni.

Irodalom

1. M. Rees: *Our Final Century*. William Heinemann, London, 2003.
2. A. A. Bartlett: Thoughts on Long-Term Energy Supplies: Scientists and the Silent Lie. *Physics Today*, July 2004, 53–55.
3. <http://hdr.undp.org/en/statistics/>
4. S. G. Benka: The Energy Challenge. *Physics Today*, April 2002, 38–39.
5. *The Economics of Climate Change: The Stern Review*. Cambridge University Press, 2007.
6. A. Maslow: A theory of human motivation. *Psychological Review* (1943) 370–396.
7. C. W. Frei: The Kyoto protocol – a victim of supply security? or: if Maslow were in energy politics. *Energy Policy* 32 (2004) 1253–1256.
8. Vajda Gy.: *Kockázat és biztonság*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1998.
9. Fazekas A. I.: *Villamosenergia-termelési technológiák jellemzői*. Magyar Atomforum Egyesület, Budapest, 2005.
10. Q. Schiermeier, et al: Electricity without Carbon. *Nature*, 14 August 2008, 816–823.
11. W. J. Nuttall: *Nuclear Renaissance: Technologies and Policies for the Future of Nuclear Power*. Institute of Physics Publishing, London, 2005.
12. B. Raj: *Ethics, Equity and Energy*. Presentation to Academia NDT International, Shanghai, China, 26 October 2008.

IGAZÁBÓL MI VAN AZ LHC-VEL?

Horváth Dezső
MTA KFKI RMKI, Budapest
és ATOMKI, Debrecen

Felfedezés és pontosság

A protonütköztetőknek óriási a felfedezési potenciálja. A CERN Nagy hadron-ütköztetője (Large Hadron Collider, LHC) hamarosan protonokat fog ütköztetni 7 TeV¹ energián. A protonban úszó alkatrészek, a kvarkok és a kölcsönhatásukat közvetítő gluonok sokféle energiával ütközhetnek, ezért rengeteg információt adnak az elérhető energiatartományban lehetséges folyamatokról. A gyenge kölcsönhatást közvetítő W[±] és Z⁰ bozont a CERN proton-antiproton ütköztetőjénél fedezték fel 1983-ban, és komoly reményeket fűzünk a Higgs-bozon és egyéb új fizika felfedezéséhez az LHC-nél.²

Habár erről több cikkben is írtam már [1], a továbbiak jobb megértéséhez célszerű felidézni a CERN mostani gyorsítórendszerét (1. ábra).

A Standard modell diadalmenetét a két elektron-pozitron ütköztetőnek köszönhetjük, a CERN LEP és a stanfordi SLC gyorsítóknak. Valamennyi komoly ré-

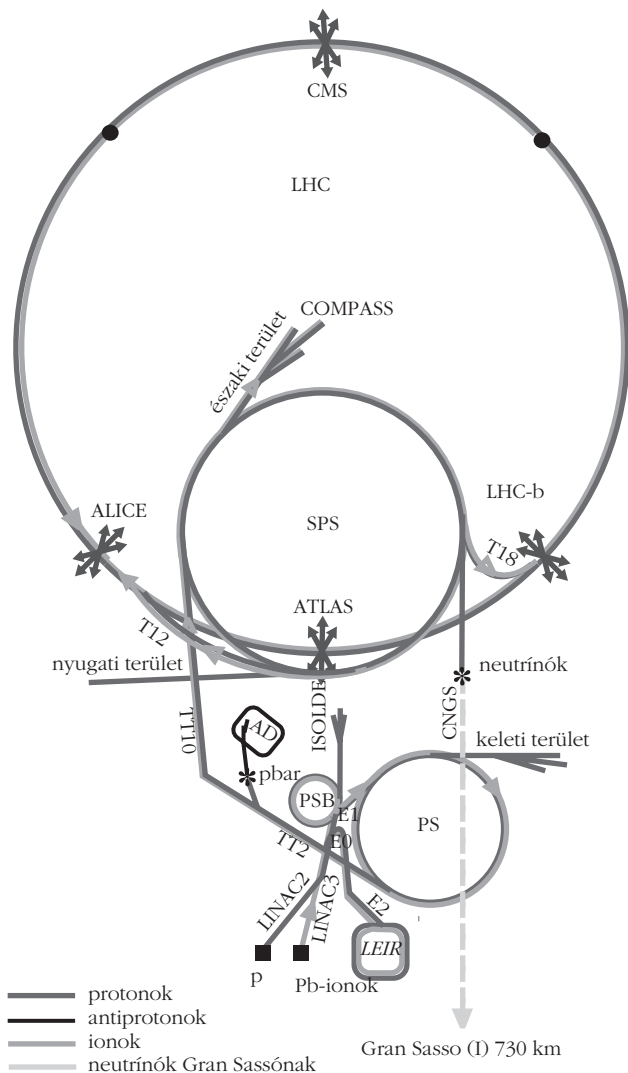
szecskefizikai kísérlet több ezer adata igen jól, statisztikus szóráson belül illeszthető a Standard modell 19 paraméterével (a neutrínók tömegét ilyenkor el szoktuk hanyagolni, annyira kicsik). A modell valamennyi elemi részecskéjét, a leptonokat, kvarkokat és a kölcsönhatásokat közvetítő bozonokat sikerült kísérletileg megfigyelni és azonosítani. A Higgs-bozon az egyetlen még nem megfigyelt alkotóelem, de az is egészen jól behatárolt: a Standard modell legújabb illesztése [2] szerint tömege nagy valószínűséggel 114 és 160 GeV között van.

De miért van szükségünk még nagyobb gyorsítókra (és egyáltalán részecskefizikusokra :-), ha egyszer a Standard modell olyan csodálatosan leírja a Természetet?

Amint azt a Standard modellről szóló cikkemben [3] jómagam és sokan mások leírták, az elméletnek van egy sereg elvi problémája. Hogy csak néhányat említsünk: nincs meg a Higgs-bozon és sokmindent nem értünk: nem tudni, miért van éppen három fermion-család, mi alkotja a Világegyetem sötét anyagát, hova lett az ősrobbanás után az antianyag és mitől van a gyenge kölcsönhatás bal-jobb aszimmetriája [4]. Rendkívül zavaró az úgynevezett hierarchia-probléma: a Higgs-bozon tömegének 100 GeV nagyságrendű értékét természetellenesen nagy, 10 nagyságrenddel nagyobb értékek különbségeként kapjuk meg.

¹ 1 eV (elektron-volt) energiát nyer egy elektron 1 V feszültség hatására. Az atomfizikai folyamatok (röntgensugárzás) energiája kilo-eV (1 keV = 10³ eV) körüli, a részecskefizikusok giga-eV-ban (1 GeV = 10⁹ eV) gondolkodnak, a legújabb nagy részecskegyorsítók (az amerikai Tevatron és a CERN LHC-je) tera-eV (1 TeV = 10¹² eV) energiát érnek el.

² Csoportunk tevékenységét a CMS-kísérletben az NK67947. számú NKTH–OTKA pályázat támogatja.



1. ábra. A CERN gyorsítókomplexuma 2008 után. A proton-szinkrotron (PS) protont és nehéz ionokat gyorsít a szuper-proton-szinkrotron (SPS) és a Nagy hadron-ütköztető (LHC), valamint protont az Antiproton-lassító számára. Az SPS saját kísérletein és az LHC táplálásán kívül neutrínónyalábot (CNGS) indít a földkérgen keresztül az Olaszország közepén, a CERN-től 730 km-re található Gran Sasso föld alatti neutrínólaboratórium felé.

A fenti problémákra rendkívül ígéretes megoldást kínál a szuperszimmetria elmélete [5], és sok más alternatív elméletet is felállítottak, de az általuk megjósolt új részecskéket, jelenségeket nem látjuk. Igen csak reménykedünk benne, hogy az LHC-nál sikerül a Higgs-bozont vagy -bozonokat, szuperszimmetrikus részecskéket vagy egyáltalán, valamilyen új jelenséget felfedeznünk.

Az LHC tervezése 1984-ben kezdődött, 5 évvel a LEP indulása előtt. Világos volt ugyanis, hogy a szinkrotronsugárzás miatt, amely áldás az anyagtudományban és – kevés kivétellel – átok a részecskefizikában, a LEP, a Nagy elektron-positron ütköztető lesz a legnagyobb elképzelhető, kör alakú elektrongyorsító. A szinkrotronsugárzási energiavesztés körönként

$$\Delta E = -\frac{4\pi}{3} \frac{Q^2 \beta^2 \gamma^4}{\rho}, \quad (1)$$



2. ábra. Az LHC és kísérletei. A két kisebb kísérlet, az ALICE és az LHCb elfért az L3 és DELPHI LEP-kísérletek barlangjában, de a két nagy, a CMS-nek és az ATLAS-nak új gödröt kellett ásni.

ahol a részecske töltése Q , a vákuumbeli fénysebességhez viszonyított sebessége $\beta = v/c$, relativisztikus tényezője $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$ és pályasugara ρ . Ez azt jelenti, hogy, például, ugyanazon körülmények között az elektron 13 nagyságrenddel több energiát veszít szinkrotronsugárzás következtében, mint a proton.

Az LHC-t igen csak ambíciózusan tervezték és építették meg. Genf mellett, a svájci-francia határon, a Jura-hegység lábánál 40–100 m mélyen fúrt 27 km hosszú alagutat (2. ábra) lényegében megtöltötték szupravezető mágnesekkel. A 7 TeV-es protonokat körpályán tartó 1232 szupravezető mágnes (3. ábra) egyenként 15 m hosszú, 35 tonna súlyú és 1,9 K hőmérsékleten 8,3 T teret tud tartani. A gyorsítógyűrűben 40 MHz az ütközési gyakoriság, tehát a detektorokban 25 ns-onként találkoznak a nyalábok és mindegyik találkozáskor 10–20 proton-proton ütközés várható, amikor az LHC eléri teljes intenzitását. Az összesen 9300 mágnes ellenőrzése, levitele és beillesztése (4. ábra) 6 évig tartott és 2008 elején fejeződött be. Utána le kellett hűteni a sokezer tonnányi mágnes 1,9 K hőmérsékletre, hidegebbre, mint a világűr (annak a kozmikus háttérsugárzás 2,7 K-es hőmérsékletét tulajdonítjuk).

3. ábra. Az LHC eltérítő-mágnesének keresztmetszete a CERN Mikrokosmosz kiállításán. Az egymással szemben keringő és az észlelőrendszerek középpontjában ütköztetett, 7 TeV energiájú protonnyalábot két szupravezető dipólus-mágnes tartja körpályán 8,3 T téréll.





4. ábra. Mágnes beillesztése a gyorsítóba. Technikusok az előtérben végződő dipólusmágnes vákuum- és hűtőrendszerét, csatlakozóit hegesztik.

2008. szeptember 10. volt a nagy nap, amikor óriási felhajtás közepette először vitték körbe a protonokat – egyelőre gyorsítás nélkül, az SPS 450 GeV-es energiáján – az LHC gyűrűjében. Elvben az egész világ egyenes adásban láthatta az LHC indulását a Világhálón keresztül, de a hálózat annyira túl volt terhelve, hogy mi itthon csak *Simon Tamás* origós szerkesztő mobiltelefon leadott helyszíni tudósításából értesültünk a fejleményekről. Budapesten az RMKI, Debrecenben az Egyetem Kísérleti Fizikai Intézete aznap este előadótulást szervezett, ahol komoly érdeklődés mellett mondtuk el, mi történt és mi nem. Az utóbbi óvatlan kollégáink elejtett megjegyzései alapján keltett rémhír volt arról, hogy az LHC nagyenergiájú ütközéseinél olyan fekete lyukak keletkezhetnek, amelyek aztán elnyelik a Naprendszert, de legalábbis a Földet. Ismét elmondtuk, hogy tekintettel arra, hogy a Holdat évmilliárdok óta bombázzák az LHC-nál sok nagyságrenddel nagyobb energiájú kozmikus sugarak és még megvagyunk, ez nem valószínű (de majd meglátjuk :-).

A nagy napon készült az LHC vezérlőtermében az 5. ábra fényképe. A figyelmes olvasó észreveheti, hogy a jelenlevő többszáz ember közül ketten vagy hárman dolgoznak, a többi tanácsokat ad, nézi vagy szurkol. Mindenesetre az a nap óriási siker volt, délutánig mindkét irányban körbementek a protonok, sőt még a gyorsítás rádiófrekvenciáját is sikerült jól beállítani, úgyhogy a részecskecsomagok sokezerszer körbementek.

A következő lépés a mágnesek áramának fokozatos felvitele volt az első évre tervezett 5+5 TeV energiához szükséges 9000 A-re. Ezt szektoronként csinálták, az LHC gyűrűje ugyanis 8 szektorra van bontva, a 8 lejártnak megfelelően (közülük négyben van ré-

szecskeütközés és érzékelőrendszer). A nyolc szektorból hétnek sikerült az áramát felhozni, de szeptember 19-én elengedett egy illesztés két szupravezető mágnes között. Az illeszték ellenállása az eredeti néhány nanoohmról makroszkopikusra nőtt, a keletkező feszültség ívet húzott és kilyukasztotta a hűtővezetékét. A hűtésre szolgáló szuperfolyékony héliumból több tonna robbanásszerűen kifújt, rakétahatással kilökve helyéről az érintett soktonnás, lebetonozott mágneset úgy, hogy az az alagút faláról pattant vissza.

Ez a katasztrófa több mint egy évvel késleltette az LHC igazi indulását. Eleve hetekig tartott, amíg sikerült az érintett szektort annyira felmelegíteni, hogy meg lehessen nyitni (6. ábra). Utána ki kellett szabadítani és a felszínre hozni 39 terelőmágneset és 14 több kisebb mágneset tartalmazó egységet. Szerencsére a tartalékokból sikerült pótolni őket. A felhozott mágnesek nagy részt ki lehet majd javítani, hogy tartalékul szolgáljanak. Ellenőrizték az ohmos kapcsolatot minden mágnes körül és kijavították a gyanúsán viselkedőket. Gondoskodni kellett arról, hogy hasonló bal eset többé ne forduljon elő, ezért az átütések megakadályozására beépítettek sokezer védőellenállást a mágnesek közé. Sokszáz kilométernyi kábelt kellett lefektetni az addigiakon kívül.

Ez a munka mostanra (2009 októbere) gyakorlatilag befejeződött, az LHC-t novemberben újra elindítják. A tervek szerint kezdetben gyorsítás nélkül, a 450 GeV belövési energián fogják a protonokat ütköztetni. Utána, karácsony előtt, vagy új év után, elkezdik a gyorsítást, kezdetben csak 3,5 TeV nyalábenergiára, 7 TeV-es ütközésekre kell tehát készülnünk. A 14 TeV-es végső energia és a tervezett teljes ütközési hozam (*luminozitás*) eléréséhez valószínűleg több év kell. Jövő év végén a nehézionos programot is elindítják, egyelőre kis luminozitás mellett.

Mivel minden jel arra vall, hogy a Higgs-bozon tömege 114 és 160 GeV között van, kimutatása az LHC-nál sokáig eltarthat. Nehezebb Higgs-bozont sokkal könnyebb lenne felfedezni és azt a Tevatron már talán meg is találta volna. Az LHC egyelőre kis energiája és luminozitása miatt a nagyobb felfedezések 2010

5. ábra. Az LHC vezérlőterme az LHC indulásakor, 2008. szeptember 10-én.





6. ábra. LHC-mágnesek tönkrement csatlakozása a 2008. szeptember 19-i baleset után, a mágnesek megnyitása előtt és után.

után várható. Távlatilag az LHC luminozitása sokkal nagyobb energia mellett nagyságrendekkel nagyobb lesz a Tevatronénál. Azt tervezik, hogy az utóbbit leállítják, mielőtt az LHC hozza paramétereit.

Irodalom

1. Horváth D.: Szimmetriák és részecskék. in: *Szemelvények a nukleáris tudomány történetéből.* (Szerk. Vértes Attila), Akadémiai kiadó, Budapest, 2009, 285–328.
2. <http://cern.ch/lepwww> – a LEP Elektroyenge munkacsoportjának honlapja
3. Horváth D.: A részecskefizika anyagelmélete: a Standard modell. *Fizikai Szemle* 58/8 (2008) 246–254.
4. Trócsányi Zoltán: Az eltűnt szimmetria nyomában. *Fizikai Szemle* 58/12 (2008) 417–424.
5. Horváth D.: Szuperszimmetrikus részecskék keresése a CERN-ben. *Magyar Tudomány* (2006/5) 550–554.

A FIZIKA TANÍTÁSA

BLAISE PASCAL, A FRANCIA KÍSÉRLETI FIZIKA MEGTEREMTŐJE

Kovács László

Nyugat-Magyarországi Egyetem, Szombathely

A francia szellem jeles képviselője

Blaise Pascalt (1623–1662, 1. ábra) a szépirodalom és a teológiai irodalom művelői és olvasói sokkal, de sokkal jobban ismerik, mint a fizikusok. „A finom ízlésű elmék... a francia nyelv századának legtökéletesebb írójaként csodálják... Minden tolla alól kikerült sort drágakőként tartanak számon.” (*Joseph Bertrand*) „Amikor őt olvasom, úgy érzem, mintha saját magamat olvasnám.” (*Stendhal*)

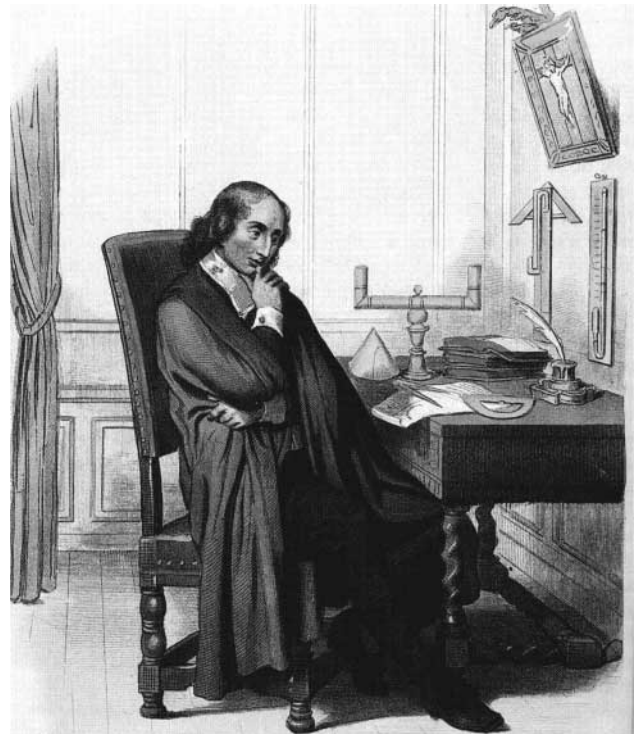
„A végtelen tér örök hallgatása megrémít.” – ez Pascal egyik legtöbbször idézett mondata. Ez a mondat túlmutat az irodalmon, ez már a filozófia és a teológia körébe tartozik. Ugyanis első olvasatában csak arra gondolhatunk, hogy a végtelennek és üresnek gondolt tér megijeszti a gondolkodó embert, azonban a *hallgatás* több, mint a *csend*, ahogyan néhány más fordításban olvashatjuk. *Isten* hallgat a végtelen tér mélyén, s azon kell elmélkednünk, hogy Ő miért nem szól hozzánk. (Egyébként nagyon nehéz a lendületes, alig tagolt kézírás olvasni. Egy-két betűtévésztes teljesen megváltoztathatja a mondat értelmét. Gyakran emlegetett példa: „az ateizmus a szellemi erő *jele* [marque], ez a helyes olvasat, nem pedig a sok helyen szereplő ... *biánya* [mangue].)

Híres mondatának filozófiai értelmezését Ő maga adja meg egy más helyen: „Mert mi végre is az ember? Semmi a végtelenséghez, minden a semmihez viszonyítva, közép a semmi és a minden között.”

A hivatásos teológusokat megszegényítő tudású szakemberré képezte ki magát. A mai napig az egyhá-

zi emberek sokkal többet írnak róla, mint a matematikusok és fizikusok, teológiai tárgyú gondolatait sokkal többször jelentetik meg, mint természettudományos írásait. Szent Ágoston tanait vallotta, a janzeniz-

1. ábra. Pascal dolgozik (*Pierre Lauginie* gyűjtéséből)



mus híve lett. Bűnösnek tekintette például saját tudományos kutatásait: „az elme bujaságát” látta bennük. Nézeteivel és írásaival a jezsuiták üldözött ellenségévé vált. *A levelek vidékre (Lettres Provinciales)* című művét, a francia irodalom egyik legnagyobb alkotását, *Louis Montalte* álnéven jelentette meg.

Három ismert író véleményével jellemezzük ezt a művét: „A komédiaíró kincsestára.” (*Racine*) „Nevetségessé teszi a jezsuitákat.” (*Voltaire*) „A tréfás logika mesterműve.” (*Balzac*)

A bölcsészek sokkal jobban elkényeztetik olvasóikat, mint a fizikusok, hiszen sorra jelentetik meg az eredeti francia szövegeket, illetve a német, angol és magyar fordításokat. *Némethné Pap Kornélia* fizikatanár tanítványom utánanézett az interneten, hogy a jelentősebb magyar könyvtárakban milyen régi kiadású Pascal-műveket találhatunk. Íme, egy kis ízelítő. A nem összefüggő, tehát töredékeket tartalmazó hatalmas mű, a *Gondolatok (Pensées)* halála után, 1670-ben jelent meg először. A rákövetkező évek és évszázadok néhány itthon fellelhető kötete (a kiadás éveivel): Somogyi Könyvtár, Szeged (1678, 1765, 1842); Ráday Gyűjtemény (1678); Klimó Könyvtár, Pécs (1788, 1831); Miskolci Városi Könyvtár (1845). *A levelek vidékre (Lettres Provinciales)* című művének hazánkban elérhető néhány példánya: Somogyi Könyvtár, Szeged (1658, 1842); ELTE (1664); Országos Széchényi Könyvtár (1700); Klimó Könyvtár, Pécs (1738, 1775); Ráday Gyűjtemény (1739); Fővárosi Szabó Ervin Könyvtár (1773); Reguly Antal Műemlékkönyvtár, Zirc (1775).

A valóságban ennél jóval több Pascal-mű pihen a könyvtárak polcain, hisz csak részleges az állományok elektronikus feldolgozása. Példaként a Szombathelyi Egyházmegyei Könyvtárat említem, ahol a *Gondolatokból* három különböző időpontban megjelent korabeli példány van. Hangsúlyozom az évszázadokkal ezelőtti kiadást, hiszen a 19. és a 20. század fordulóján világszerte és a rendszerváltás után idehaza a nagy francia író műveinek valóságos reneszánszát láthatjuk.

Ezzel szemben nem vásárolták meg a könyvtárak Pascal fizikai tárgyú műveit, és tudomásom szerint nem is fordították le azokat magyarra.

Pascal a projektív geometria és a valószínűségszámítás megteremtője, a differenciál- és integrálszámítás előkészítője, a teljes indukció módszerének felismerője, feltaláló (talicska, omnibusz, számológép), és még nem szóltunk a jól ismert, róla elnevezett, a kúpszeletekre vonatkozó tételéről (aminek egymaga 400 következményét dolgozta ki), az aritmetikai (Pascal-) háromszögről és a hidrosztatika Pascal-törvényéről.

A hidrosztatika és az aerosztatika megalapozója

„Huszonhárom évesen kimutatta, hogy a levegőnek súlya van” – írta róla *Chateaubriand*. Csak úgy, saját szórakoztatására kiszámította a Föld légkörének teljes tömegét: $4 \cdot 10^{18}$ kg értéket kapott. A helyes szorzótényező 5,13 – tehát tévedése mindössze 30 százalékos.

EXPERIENCES NOUVELLES TOUCHANT LE VUIDE,

Faites dans des Tuyaux, Syringues, Soufflets,
& Siphons de plusieurs longueurs & figures:
Avec diuerses liqueurs, comme vif-
argent, eau, vin, huyle, air, &c.

Avec un discours sur le mesme sujet.

Où est montré qu'un vaisseau si grand qu'on le pourra
faire, peut estre rendu vuide de toutes les matieres
connues en la nature, & qui tombent sous les sens.

Et quelle force est necessaire pour faire admettre ce vuide.

Dedie à Monsieur PASCAL Conseiller du
Roya en les Conseils d'Etat & Priué.

Par le sieur B. P. son fils.

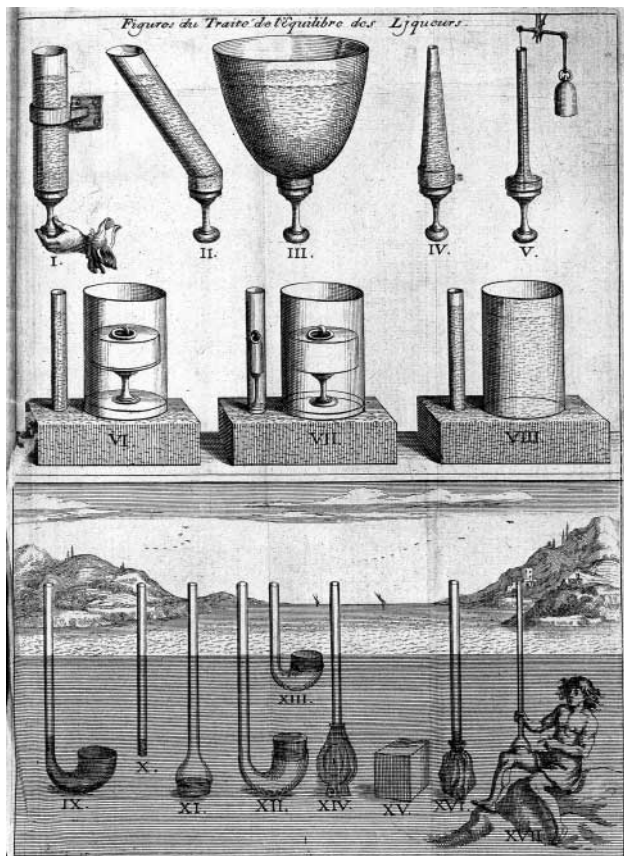
Le tout reduit en Abbregé, & donné par aduance d'un
plus grand traité sur le mesme sujet.



A PARIS, Chez PIERRE MARGAT, au Quay de
Gefvres, à l'Oyseau de Paradis.
M. DC. XLVII. Avec Permission.

2. ábra. Az 1647-ben kiadott Pascal-mű címlapja.

Az úrré vonatkozó új kísérletek... (*Expériences nouvelles touchant le vuide...*) című nagy jelentőségű műve – ábrák nélkül – 1647-ben, 31 oldalon jelent meg. Ez az 1913-as kiadású *Pascal összes műveiben* is mindössze négy kéthasábos oldal. A kor szokásainak megfelelően azonban annál hosszabb a cím, ugyanis abban az időben szokás volt megadni a tárgykört is (2. ábra), s csak utoljára említeni a címben a szerzőt: *Új kísérletek a vákuumról (légtüres térről), amelyeket csövekben, fecskendőkből, sípokban és szifonokban végeztünk, (melyek hossza és alakja különböző volt) különböző folyadékokkal, mint a higany, a víz, a bor, az olaj, a levegő stb., mellékelünk egy előadást ugyanerről a tárgyról, amelyben kimutatjuk, hogy egy edény – amilyen nagynak csak meg lehet csinálni – minden ismert természeti anyagtól őrössé tehető, ami magától értetődő, és arról hogy mekkora erő kell ennek a vákuumnak az előállításához. Ezt a művet Monsieur Pascalnak, a királyi tanácsosnak ajánlja Pascal Balázs, a fia. Az egészen rövidített értekezést egy nagyobb munka előzetes közleményének kell tekinteni, amely ugyanezt a tárgykört fogja érinteni (Abonyi Iván fordítása).* A sokszor idézett ábrák a halála utáni, összevont, kibővített 1663-as első vagy az 1664-es második kiadásból valók (*Traité de l'équilibre des liqueurs et de la pesanteur de la masse de l'air...*). Ennek oldalszáma 232. Ide másoltuk a hidrosztatikai paradoxont, a fenéknyomást kimutató „Pascal-mérleg”-et és a hidraulikus sajtót ábrázoló képet (3. ábra), valamint a „nyolc kísérlet”-hez tartozó illusztrációt (4. ábra). Pascal ugyanis nyolc kísérletet tervezett és végzett el annak bizonyítására, hogy a természet nem irtózik az ürtől, ahogy

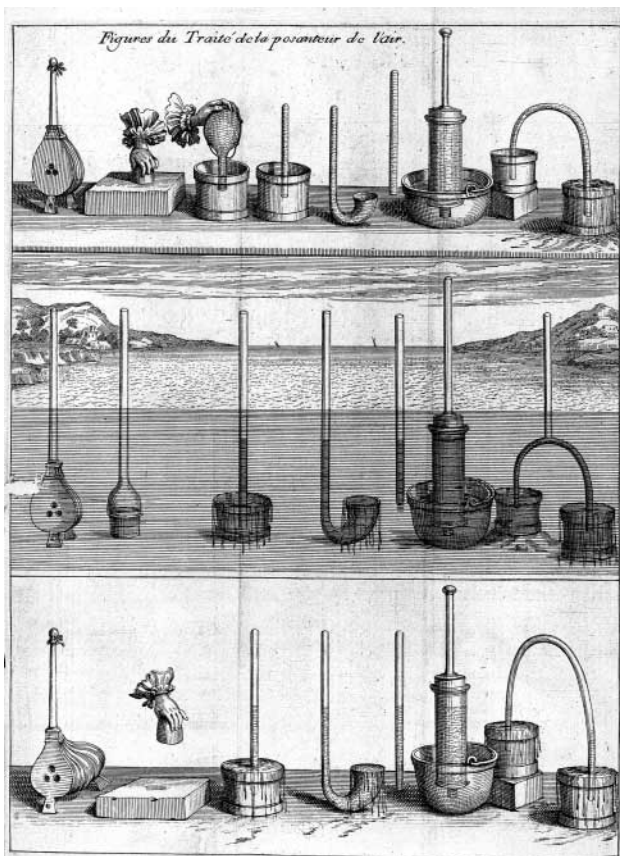


3. ábra. A hidrosztatikai paradoxon ábrái, a „Pascal-mérleg” és a hidraulikus sajtó rajza.

addig gondolták, hanem egyszerűen arról van szó, hogy a levegő nyomása nem képes a vizet 10 méternél, a higanyt 76 centiméternél magasabba feljuttatni. Rendkívül szellemesek a kísérleti megoldások, meggyőzőek az eredmények. Hangsúlyozni szeretnénk, hogy az eredeti Torricelli-féle elrendezésnél lefelé jön a csőben a higany, a víz, s egy adott szintnél megáll. Pascal több kísérletében felfelé kúszik a folyadék, mégpedig úgy, hogy közben nem történik emberi munkavégzés, például szivattyúzás, csupán a levegőnek lesz lehetősége arra, hogy a folyadékkal úgy érintkezzen, hogy kifejtesse nyomóerejét.

1. Természetesen azzal kezdi Pascal, hogy megismétli Torricelli kísérletét, amelynek hírért meghozták neki. Egyértelmű tehát, hogy az alapötlet nem az övé.

Azt kérték Pascaltól, bizonyítsa be, hogy a higany feletti térrészben valóban nincs semmi. (Tudjuk, higanygőz van ott, de az ellenfelek ezenkívül még valami különleges anyag, az éter jelenlétét tételezték fel ott is.) Pascal úgy válaszolt, hogy valaminek a *létét* kell bizonyítani, s nem a *hiányát*, tehát a többiek bizonyítsák azt, hogy tényleg van ott valami. Ennek ellenére Pascalnak, a szárnyaló francia szellem képviselőjének az a zseniális gondolata támadt, hogy megméri a vákuum súlyát. Emlékeztetünk rá, hogy a német Otto von Guericke, a légszivattyú felfedezője, a német kísérleti fizika megteremtője Pascal számos kísérletét megismételte, sőt kétkarú mérleggel közvetlenül megméri a levegő



4. ábra. A 8 kísérlethez tartozó ábra, ráismerhetünk a fűjtatóra, a „barométerre”, az egyenlőtlen szárú, lefelé fordított U-csőre, s van utalás a folyadékok és a szilárd testek által kifejtett nyomás közti különbségre.

súlyát. Kiszivattyúzta a mérlegen kiegyensúlyozott nagy üveggömbből a levegőt, s azt tapasztalta, hogy a mérleg egyensúlya megbomlik.

Pascal viszont megméri a teljes Torricelli-elrendezés súlyát akkor, amikor még tele volt higanyal a cső, s akkor is, amikor már vákuum volt a cső felső végén. Mindkét esetben azonos eredményt kapott.

Egy szegedi egyetemi filozófus adjunktus fordításában azt olvashatjuk, hogy Pascal a Torricelli-kísérletet „folyékony ezüsttel és kémcsővel” végezte el.

Valójában – többek közt – hatalmas üvegfecskendővel dolgozott, s megállapította, hogy két láb három hüvelyk, azaz közelítőleg 76 cm magasságig emelkedett csak a higany. Belém költözött Pascal játékos, titkolódzó szelleme, és gimnazista tanulóként írtam levelet a fordítónak. Jött hamar a válasz: higany szerepel az eredeti szövegben. Újabb tanuló levelet küldtem Szegedre, segítséget kértem fizika házi dolgozatom elkészítéséhez: a nyolc kísérlet leírásának fordítását kértem. (Sajnos tényleg nem tudok franciául.) Megjött a fordítás. Nagyon hálás vagyok érte, mert nem hiszem, hogy valahol is megtalálható magyarul nyomtatásban a híres nyolc kísérlet leírása, s elnézést kérek a játéktért.

2. Rouen utcáin folytatódta a kísérletek hajóárboc-hoz kötött 15 méteres csövekkel és hordókkal, a csövekben víz, olaj, vörösbor. „A 46 láb hosszú csővel folytatott kísérlet. A csövet vörösborral kell megtölte-

ni (hogy jobban lássék). Majd a zárt végén lassan megemelni úgy, hogy közben a nyílt vég a borral töltött kádba érjen. Tapasztalat: a bor nem folyik ki a csőből *egészen*, ha a zárt végét fokozatosan függőlegesre emeljük, *hanem* csak mintegy 13 lábnyi úrt hagy a zárt végén! Ha visszafordítjuk vízszintesre, a bor (stb.) visszafoglalja az egész csövet. Ez a jelenség a szabálytalan keresztmetszetű (változó keresztmetszetű) csövek esetében is észlelhető ugyanígy.” (Ez a rész Abonyi Iván kivonatos fordítása.)

Fogadást lehetett kötni, hogy a vörösbor marad-e magasabban vagy a víz. A közönség – helytelenül – a vízre szavazott. A *Fizikai Szemle* 2009. évi januári számából tudjuk, hogy Csongrádon is elvégezték ezt a kísérletet, s ott a víz maradt magasabban. Ennek magyarázata az, hogy a cső felső, (hangsúlyozzuk) rövid, „vákuumos” részében nagyobb a víz és az alkoholgőzök együttes nyomása, mint a másik csőben a vízgőzé. Ez a nagyobb nyomás nagyobb mértékű folyadékszint-süllyedést okoz, mint amennyi emelkedéskülönbség a bor kisebb sűrűsége alapján a bor javára várható volt. Pascal valószínűleg gondolt erre, s ezért dolgozott 15 méteres csövekkel, azaz hosszú vákuumos résszel. Későbbi kísérleteiknél a csongrádiak is megnövelték a cső hosszát, így a folyadék feletti nagy térfogatban eleinte olyan kicsi lett a nyomás, hogy érvényesülni tudott a sűrűségkülönbség hatása.

Vízzel kísérletezett Pascal előtt az olasz *Gasparo Berti* (1600–1643), a lengyel *Valerian Magni* (1647. július 18-án), s mint említettük időben utána *Otto von Guericke*.

3–4. Üvegfecskendőt, illetve levegőfújtatót tett víz alá, és kihúzta a dugattyút, illetve szétnyitotta a fújtatót befogott véggel, majd normálisan. Azt tapasztalta, hogy befogott csővég esetén, nehezen ugyan, de elvégezhető volt a tervezett mozgás. Ha a természet nem engedte volna, hogy létrejöjjön a vákuum, akkor nem lehetett volna kijebbi húzni a dugattyút vagy szétnyitni a fújtatót.

5. Egyenlőtlen szárú U-csövet megtöltött vízzel. A száruk 15 m és 13,5 m hosszúak voltak. (Több helyen írt arról Pascal, hogy milyen sok pénzébe került ezeket az eszközöket elkészíttetnie!) A csővégeket lezárta, majd lefelé fordította az U-csövet úgy, hogy a végeket vízzel telt dézsákba dugta. Az egyik dézsa másfél méterrel magasabban volt, mint a másik. A csővégeket szabaddá tette, s azt tapasztalta, hogy mindkét csőben a saját dézsájában levő víz szintje

fölött körülbelül 10 méter magasán állt meg a víz. A borászatban jártas franciák azt várták, hogy az U-cső szivornyaként átszívja majd a vizet a felül levő edényből. Ha az alul levő szárat nem tennék vízzel telt dézsába, akkor valóban ez történe: a nedvesítés, illetve egy kis egyensúlyzavar miatt szépen folyna lefelé folyamatosan a víz. Én magam fizika órán, illetve a ház körül szoktam is így vizet leereszteni tartályból, hordóból, ha nem akartam megszívni a „slag”-ot.

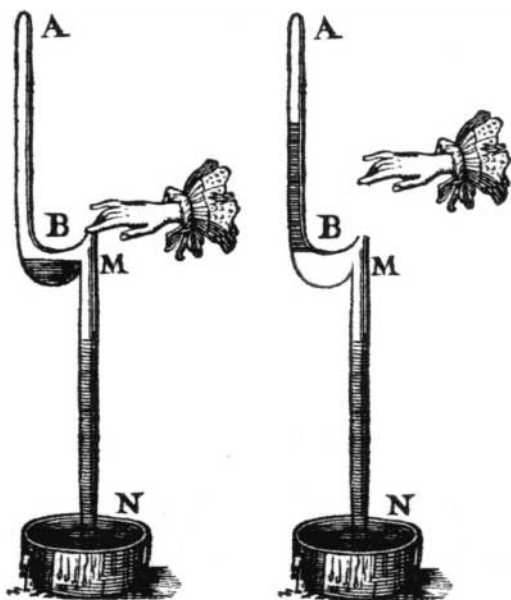
6. Pascal elvégezte a fenti kísérletet higannyal is, 30 cm szárhosszkülönbségű U-csővel. Úgy is tekinthetjük ezt az elrendezést, mint két Torricelli-csővet, amelyeket az azonos, vákuumos végüknél összekötöttek, elektromos hasonlaltal azt mondhatnánk, hogy „párhuzamosan”.

7. Pascal kihasználta azt a tényt, hogy a higany nem nedvesíti az edény falát, nem nedvesíti a kötelet, a víz viszont bele tud jutni a csőbe a kenderkötél mellett. Most szinte szó szerint idézzük Pascalt: „Egy egyik oldalán (alul) lezárt, tizenöt láb hosszú üvegcsőbe vezessünk egy szintén tizenöt láb hosszú kötelet, amelynek a végére kössünk egy madzagot, amellyel később kihúzhatjuk a kötelet. Majd az üvegcsőbe töltünk vizet, és (a csövet megfordítva) állítsuk egy higannyal telt kádba. Ezt követően lassan húzzuk ki a kötelet a csőből. Ennek során azt tapasztaljuk, hogy ha kihúztuk a kötelet, a higany beáramlik a csőbe, egészen két láb és három hüvelyk magasságig. Ezek után azonban a higany nem emelkedik tovább, hanem a cső tetejében lévő víz ereszkedni kezd, fölötte pedig látszólag új keletkezik.” (a szegedi fordítás).

8. A hatos számú, egyenlőtlen szárú U-csöves kísérlet megismétlése, belehelyezett kötéllel, az indulásnál vízzel töltve. Amikor lefelé fordítva a csövet a szárat higannyal teli dézsákba tesszük, s kihúzzuk a kö-

5. ábra. Két híres légnyomásmérő hely. Balra Florin Périer és társai Puy-de-Dôme hegyen, ahogy *Louis Figuier Les merveilles de la science* (1867) 1. kötetének 33. oldalán ábrázolja. Périer és társai nem csupán a hegyet mászták meg, hanem még időutazást is tettek, amint a 18. századi ruhaviseletük sugallja. Jobbra a roueni katedrális, amelyet Monet 1894-ben készült festményével idézünk fel.





6. ábra. Az ABMN cső M szintben történő megnyitásával az AB cső-részben (felkúszik majd) fenn marad a higany, és pedig az M pontban megjelenő külső légnyomás miatt. Meg kell jegyeznünk, hogy az eredeti kiadásban szereplő ábra (bal oldali rajz) téves, pontosabban a sikertelen kísérletet szemlélteti. Az ábrát azzal kell pontosítanunk, hogy a higanynak el kell érnie a hajlított cső felső részét. A jobb oldali ábrát pedig azzal pontosítjuk, hogy a függőleges részben nem lesz higany.

telet, a higany mindkét szárban az ismert magasságig felemelkedik és a felül még ott maradt víz pedig két-téválik, s ott fent légüres tér keletkezik.

Az első francia kísérleti fizikus

Méltán viselheti ezt a büszke címet Pascal, hiszen ő mondta Franciaországban először, hogy az elmélet helyességét kísérlettel kell eldönteni, és egyetlenegy kísérlet nem elegendő. Tervezett is további pompás kísérleteket. Így okoskodott: ha a levegő súlya okozza a Torricelli-csőben a higany emelkedését, akkor – a folyadékokhoz hasonlóan – kisebb vastagságú levegőnek kisebb lesz a nyomása.

Menjünk fel a hegyre, és végezzük el ott is a Torricelli-kísérletet! A hegy tetején nem fog olyan magasra emelkedni a higany, azaz nagyobb lesz a légüres tér, az pedig biztosan nem igaz, hogy fent már kevésbé irritózik az űrtől a természet.

Pascal maga beteg volt, nem mehetett hegyet mászni, ezért sógora, Périer úr vezetésével került sor a tervezett kísérletre 1648. szeptember 19-én. Váratlan eredmény született: az 1,5 km magas Puy-de-Dôme hegy (5.a ábra) tetején 82,5 mm-rel lett alacsonyabb a higany szintje, mint a hegy lábánál. Felfelé menet, s lejövet is, összesen tizenhét mérést végeztek, s gondosan dokumentáltak. Ők maguk, s a hír hallatán maga Pascal is megismételte a kísérletet a legközelebbi templomtoronyban, talán éppen a Monet által csodálatosan megfestett roueni katedrális tornyában (5.b ábra). Kiderült, hogy már egy torony magassága is elegendő a hatás kimutatásához!

Németországban Guericke a Harz-hegység tetejére, a Brockenre akarta felvinni a Torricelli-csővet, de a cső társa kezében nem sokkal az indulás után összetörtött, így a mérés elmaradt – olvashatjuk az *Otonis de Guericke Experimenta nova (ut vocantur) Magdeburgica de vacuo spatio* (Amsterdam, 1672) című műben.

Három gyönyörű Pascal-kísérletet ismertetünk még.

J. Attali Blaise Pascal, *avagy a francia szellem* című könyvében leírja, hogy Roberval mutatott egy érdekes kísérletet Pascalnak, amit először egyikük sem tudott értelmezni. Roberval ponty-úszóhólyagot tett üvegfecskendő belsejébe, befogta a cső végét, kihúzta a dugattyút, s a hólyag megduzzadt. Pascal később megértette a jelenséget, amikor elvégezték az analóg kísérletet úgy, hogy a pontyhólyagot felvitette egy hegyre.

A második kísérletnek sem tudom az eredeti megjelenési helyét, azt *Gingyikin Történetek fizikusokról és matematikusokról* című könyvében olvastam (Typotex, 2003. p. 169) a Simon Stevin (1548–1620) által elsőként leírt hidrosztatikai paradoxon szemléltetésére: „100 fontnyi teherre van szükség ahhoz, hogy egy uncia víznek az edény aljára gyakorolt nyomását kiegyensúlyozzák. A kísérlet során a víz megfagy, és ezután elegendő egy uncia teher. Pascal sajátos pedagógiai érzékkel rendelkezett.”

1960 óta foglalkozom tanári demonstrációval, de most olvastam először erről a kísérletről. Én magam azóta – a roueni kísérletek tiszteletére és a jól láthatóság miatt is – víz helyett ostorosi vörösbort használok.

A harmadik kísérlet az „úr az űrben”, „vide dans le vide”: egy Torricelli-csőben elhelyezett másik Torricelli-csőről van szó. *Simonyi Károly A fizika kultúrtörténete* című könyvében a meglehetősen bonyolult elrendezés rajzát és leírását láthatjuk. Az említett 1663-as Pascal-könyvben azonban – kicsit hibás rajzzal ugyan – egy igen szellemes, egyszerű kivitel látható (6. ábra). Képzelnünk el két egyenlőtlen szárú U-csővet, amelyeket rövidebb száruknál összeillesztünk. A – mondjuk – bal oldali, felül hosszabb szárú cső vége lezárt, a jobb oldalon, alul levő hosszabb szár nyitott, ez nyúlik bele a higanyal telt edénybe. Ha az U-csövek szára nem párhuzamos, s ez előfordulhatott az 1600-as évek üvegekészítői kezében, akkor akár egy inflexiós ponttal nem rendelkező, azaz két lokális szélső értékkel bíró harmadfokú függvény „középső” darabjára is gondolhatunk. Most azt mondhatjuk elektromosságtani hasonlaltal, hogy „sorba van kötve” a két Torricelli-cső. Kezdetben csak a jobb oldali „függőleges” szárban van higany az ismert 76 cm magasságban, valamint a bal oldali rész U-csővének alsó részén (a lokális minimum környékén) megfelelően sok (ellentétben a korabeli, de nyilván nem Pascal által vázolt ábrával). Természetesen az U-cső mindkét szárban egyenlő magasan áll a higany. (Érdeemes átgondolni, hogy hogyan lehet ezt a kiindulási állapotot elérni.) Mindenütt másutt vákuum van a „harmadfokú” csőben. Ezek után kinyitjuk a jobb oldalon felül, a lokális maximumnál levő csapot (arról eddig nem szóltunk, hogy ilyet is beépí-

tett Pascal). A jobb oldali hosszú szárban teljesen lesüllyed a higany, a bal oldali hosszú szárban azonban emelkedik: most veszi csak fel a szokásos Torricelli-csőves 76 cm-es magasságot. Ha elég ügyesek vagyunk, s csak kevés levegőt engedünk a rendszerbe, akkor elérhetjük, hogy a szint nem megy le telje-

sen a jobb oldali szárban, s nem lesz egészen 76 centiméteres a szintkülönbség a bal oldalon. A lényeg az, hogy nem történt emberi munkavégzés, például szivattyúzás. A levegő beengedése miatt ment *fel* a higany a bal oldali szárban. Kiváló tudós, kiváló tanár zseniális kísérlete.

AZ ORSZÁGOS SZILÁRD LEÓ FIZIKAVERSENY MEGHIRDETÉSE A 2009/2010. TANÉVRE

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, a Szilárd Leó Tehetséggondozó Alapítvány és a paksi Energetikai Szakközépiskola és Kollégium a 2009/2010. tanévre meghirdeti az Országos Szilárd Leó Fizikaversenyt az általános és a középiskolák tanulói számára.

A verseny résztvevői

I. kategóriában a versenykiírás tanévében a rendes érettségi vizsgát tevő évfolyam, vagy az azt közvetlenül megelőző évfolyam tanulói,

II. kategóriában az általános és középiskolák 7–10. osztályos tanulói vagy a 13. évfolyammal befejeződő középiskolai képzésben a 11. évfolyamos tanulók nevezhetnek.

A versenyre a hazai és határon túli iskolák nevezését egyaránt várjuk. Nevezési díj nincs, a versenyen a részvétel ingyenes.

Az iskolák a versenyre 2010. január 15-ig jelentkezhetnek a www.szilardverseny.hu honlapon vagy levélben a Szilárd Leó Tehetséggondozó Alapítványnál (7030 Paks, Dózsa György út 95. Tel.: 75-519-326) a versenyzők kategóriánkénti létszámának, valamint az iskolai kapcsolattartó fizikatanár elérhetőségeinek (név, postai cím, telefonszám, e-mailcím) megadásával.

A verseny kétfordulós. Az első forduló időpontja 2010. március 1. 14–17 óráig.

A feladatlapokat a javítókulccsal együtt a Versenybizottság küldi meg a benevező iskoláknak a jelentkezések számának megfelelően.

A versenyen való részvétel kizáró okai

A versenyfeltételek be nem tartása a versenyből való kizárást eredményezheti. Például:

- A versenykiírásban kiírt kategóriától eltérő kategóriában való indulás.
- Nem megengedett segédeszköz használata.

A verseny témája, ismeretanyaga, felkészüléshez felhasználható irodalom

A verseny a középiskolás tananyag modern fizikai – elsősorban magfizikai és sugárvédelmi – fejezeteinek

alkalmazás szintű tudását és környezetvédelmi alapismereteket kér számon.

A kijelölt témakörök a következők:

Mikrorészecskék leírásának alapjai, az anyag kettős természet.

Hőmérsékleti sugárzás törvényei, fotonok, fényelektromos jelenség, Compton-jelenség.

De Broglie-összefüggés, elektronok interferenciája.

Heisenberg-féle határozatlansági összefüggés.

A hidrogénatom hullámmoddellje.

A kvantumszámok szemléletes jelentése: 's', 'p', és 'd' állapotok.

Az elemek periódusos rendszerének atomszerkezeti magyarázata.

Az atommag és szerkezete: proton, neutron. Rendszám és tömegszám. Magerők és kötési energia. Radioaktivitás: felezési idő, gamma-, béta- és alfa-bomlás.

Maghasadás, neutron-láncreakció. Atombomba. Atomreaktor, atomerőmű. Atomenergia felhasználásának lehetőségei, szükségessége és kockázata. Sugárvédelmi alapismeretek. Magfúzió, a Nap energiatermelése.

Hevesy György (radioaktív nyomjelzés), Szilárd Leó, Wigner Jenő (atomreaktor) munkássága.

Részecskegyorsítók működési elvei.

Környezetvédelmi alapismeretek: például CO₂ és az üvegházhatás, ózonlyuk, radonprobléma, radioaktív hulladék elhelyezése.

A felkészülésre javasolt segédanyagok

Országos Szilárd Leó Fizikaverseny feladatai és megoldásai 1998–2004.

Marx György: *Atommagközelben*. MOZAIK Oktatási Stúdió, Szeged, 1996.

Marx György: *Éltrevaló atomok (Atomfizika biológusoknak)*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1978.

Tóth Eszter, Holics László, Marx György: *Atomközelben*. Gondolat Kiadó, Budapest, 1981.

Radnóti Katalin (szerk.): *Így oldunk meg atomfizikai feladatokat*. MOZAIK Oktatási Stúdió, Szeged, 1995.

Radnóti Katalin (szerk.): *Modern fizika emberközelben*. Feladatok és megoldások CD-n.

A továbbjutás feltétele, a továbbjutottak értesítésének módja az egyes fordulókban

A feladatlapokat a javítókulccsal együtt a Versenybizottság küldi meg a benevező iskoláknak a jelentkezések számának megfelelően.

Az I. forduló írásbeli dolgozatainak megírására a versenyre jelentkező iskolákban kerül sor, amelynek időtartama 3 óra. A versenyzők minden szokásos segédeszközt (füzetek, könyvek és zsebszámológépek) használhatnak.

Az első forduló dolgozatait a szaktanárok javítják és a *pontbatárt elért dolgozatokat* legkésőbb 2010. március 8-ig postázzák a Budapesti Műszaki Egyetem Nukleáris Technikai Intézete (1521 Budapest, Műegyetem rkp. 9.) címére.

Pontbatárok: I. kategória: a maximális 60%-a, II. kategória a maximális pontszám 40%-a. A versenybizottság a beküldött dolgozatokat ellenőrzi, majd az első forduló eredményéről az értesítést legkésőbb 2010. március 26-ig postázza a döntőbe jutott tanulók iskoláinak. A versenybizottság a II. fordulóra az I. kategóriából maximum 20 tanulót, míg a II. kategóriából maximum 10 tanulót hív be.

A 2. forduló (döntő) 2010. április 23–25. között kerül megrendezésre az Energetikai Szakközépiskola és Kollégiumban, Pakson.

A 2. fordulóban a tanulók elméleti, mérési és számítógépes feladatokat oldanak meg.

Az eredmények közzétételének módja

A döntőben a nyertes versenyzők a díjaikat a versenyt közvetlenül követő ünnepélyes eredményhirdetésen vehetik át, amelyre a helyi média képviselői is meghívást kapnak.

Az egyes fordulók eredményei megtekinthetők a www.szilardverseny.hu honlapon. A versenyről beszámoló cikk készül a *Fizikai Szemle* részére.

Díjazás

Az országos döntőbe bejutott tanulók könyvjutalomban részesülnek.

Kategóriánként 1–3. helyezettet a Szilárd Leó Tehetséggondozó Alapítvány egyszeri ösztöndíjban részesíti.

A szervezők elérhetősége

A versenybizottság vezetője: *Dr. Sükösd Csaba* tanácskezelő egyetemi docens, BME Nukleáris Technika Tanszék. Címe: 1521 Budapest, Műegyetem rakpart 9. E-mail: sukosd@reak.bme.hu. Tel.: 1-463-2523, fax: 1-463-1954.

A verseny felelőse: *Csajági Sándor*, az Energetikai Szakközépiskola és Kollégium tanára. Címe: 7030 Paks, Dózsa György utca 95. E-mail: csajagi@eszi.hu. Tel.: 75-519-326, fax: 75-414-282.

KUTATÓ LESZEK EGY NAPRA

Részecskefizikai Diákműhely 2010

2010 tavaszán immár hatodszor kerül megrendezésre a középiskolás diákok számára szervezett nemzetközi részecskefizikai diákműhely. Az esemény rendezője az Európai Részecskefizikai Ismeretterjesztő Csoport (European Particle Physics Outreach Group, EPPOG). A rendezvények keretében több tucat ország mintegy száz egyeteme és kutatóintézete fogadja egy-egy napra a sok ezer 16–18 éves középiskolás diákot, hogy megismertessék őket a modern részecskefizika legújabb eredményeivel.

A foglalkozás egy egész napot vesz igénybe: a tanulók délelőtt előadásokat hallgatnak, megtekintik az intézmény egy jellemző berendezését, majd ebéd után számítógépek segítségével szemügyre veszik és elemzik a nagyenergiájú elektron-pozitron ütközések kiváltotta eseményeket, amelyeket a CERN 27 km-es gyorsítógyűrűjében az OPAL- és DELPHI-kísérletek észleltek. A nap végén internetes videokonferencián hasonlítják össze és vitatják meg eredményeiket az adott napon szereplő 5–6 ország diákjaival, ugyanúgy, mint a nagy nemzetközi együttműködések részecskefizikusai.

A hazai események színhelye a Budapesti Műszaki Főiskola székesfehérvári központja (február 18.), a Debreceni Egyetem Kísérleti Fizikai Intézete (március 3.) és a budapesti KFKI Részecske és Magfizikai Kutató Intézete (március 3.). Intézményenként 20–20, iskolánként 2 (esetleg 4) diákot tudunk fogadni. A diákok kiválasztását a jelentkező iskolák tanáraitra bízuk. Érdeklődő, aktív gyerekeket várunk, részecskefizikai előismeret nem, de minimális angolnyelvtudás kívánatos.

A jelentkezéseket január 20-ig kérjük a rendezők e-mail címére elküldeni, azokat a beérkezés sorrendje szerint fogadjuk. További információt az EPPOG <http://www.physicsmasterclasses.org> honlapján, valamint a megadott helyi honlapon találunk.

Budapest: *Jancsó Gábor*, jancso@rmki.kfki.hu, web: http://www.rmki.kfki.hu/~jancso/Reszecskefizikai_Diakmuhely_RMKI

Debrecen: *Ujvári Balázs*, ujvarib@delfin.klte.hu, web: <http://fizika.ttk.unideb.hu/HPP/>

Székesfehérvár: *Horváth Árpád*, horvath.arpad@roik.bmf.hu, web: <http://www.roik.bmf.hu/diakmuhely>
Horváth Árpád, Jancsó Gábor, Ujvári Balázs

FIZIKAI NOBEL-DÍJ – 2009

Takács Sándor
villamosmérnök, Budapest

A Svéd Királyi Tudományos Akadémia illetékes bizottsága az idei fizikai Nobel-díjat október 6-án megosztva (fele-fele arányban) *Charles K. Kao* (Honkongi Egyetem), illetve *Willard S. Boyle* és *George E. Smith* (mindketten Bell Laboratórium, USA) tudósoknak ítélte oda az optikai kábelben történő távközlés alapjainak kidolgozásáért, valamint az elektronikus képalkotásban új távlatokat nyitó félvezető CCD-érzékelő kifejlesztéséért. Mindkét eredmény jelentősen elősegítette a 20. század második felében a távközlés lényeges átalakulásának kibontakozását. Ezúttal közvetlen technológiai hasznossággal járó kutatásokat ismertek el Nobel-díjjal. Mivel kutatásaik fizikai alapjai eltérőek, célszerűnek látszik eredményeik méltatásának elkülönítése.

Távközlési optikai kábel

A távközlés fejlődésének fő hajtóereje a mind nagyobb mennyiségű információ egyre nagyobb távolságokra való eljuttatásának igénye volt és maradt. Ez megkívánta az elektromágneses vivőhullám frekvenciájának szakadatlan növelését és az ehhez szükséges eszközök folyamatos fejlesztését. A múlt század 60-as éveiben már a 10–20 GHz-es mikrohullámú sáv sem látszott elegendőnek a jelentkező igények kielégítésére. A további fejlődés a látható és az infravörös optikai hullámok irányába mutatott. Erősítette ezt a tendenciát az első lézerek üzembe helyezése, mivel általuk a szükséges koherens optikai fényforrások egyre nagyobb választékban álltak rendelkezésre. A fő gondot az átviteli közeg okozta. A szabadtéri átvitel az atmoszféra igen tág határok között változó tulajdonságai miatt nem bizonyult eléggé stabilnak és megbízhatónak. Az akkor már ismert és szűk körben speciális célokra megfelelő optikai szálak a 100 dB/km nagyságrendű csillapításuk miatt nem voltak távközlésre alkalmasak.

Ekkor lépett a színre a Londonban frissen doktorált Ch. K. Kao, aki akkor már a Standard Telecommunication Laboratories-ban dolgozott, és tüzetes vizsgálatnak vetette alá 40 gyártó cég optikai szálait, hogy az elképesztően nagy csillapítás okait felfedje. Fiatal társával, *George A. Hockham*mal együtt 1966-ban közölték megállapításukat [1], amelyek szerint az igen nagy csillapítást a kvarc alapanyag szennyezettsége (különösen a vas) okozza. Célul tűzték ki a 20 dB/km-es érték elérését, mert számításaik szerint – az akkor rendelkezésre álló fényforrások és detektorok mellett – az ilyen szál már alkalmas lehet távközlési célokra. Lelkesedésük ráragadt sok más kutatóra és gyártóra is. A nagy tisztaságú kvarc előállítása nehéz feladatnak bizonyult. A kvarc olvadáspontja körülbelül 2000 °C, és ebből az olvadékból kellett a hajszálnál is vékonyabb üvegszálát ellenőrizhető

módon állandó vastagsággal húzni. Négy évvel később, 1971-ben a (máig piacvezető) Corning Glass Works (USA) szakemberei bonyolult kémiai eljárással előállították a célul kitűzött 20 dB/km-es, néhány évvel később pedig a 4 dB/km-es szálakat is 0,85 μm-en. Tíz éven belül elérték az 1 dB/km-nél is kisebb csillapítást. Napjainkban 1,55 μm-en ez a jellemző 0,2 dB/km-nél is kisebb, ami igen közel van az elméleti határhoz. Ez volt Kao nagy teljesítménye, amelyet most Nobel-díjjal ismertek el.

1971-ben a Leningrádi Ioffe Intézetben előállították az első szobahőmérsékleten is folyamatosan működésre képes félvezető lézert. (Ezt a teljesítményt is Nobel-díjjal ismerték el.) Az optikai szál, a félvezető lézer és a GaAs fotodióda alkotta hármas képeztek az úgynevezett első generációs optikai távközlési rendszerek alap-elemeit (első optikai ablak). Mivel a csillapítás a hullámhossz függvényében erősen változik, és a következő lokális minimuma körülbelül 1,3 μm-nél van, a második generációs eszközöket már erre a hullámhosszra optimalizálták (második optikai ablak). A ma használatos nagy rendszerek az 1,55 μm-es hullámhosszon működnek. Itt a csillapításnak abszolút minimuma van, a fényforrás pedig InGaAsP lézertióda (harmadik optikai ablak). Az első 6000 km-es transzatlanti kábelt 1988-ban fektették le. Azóta a Földet behálózó optikai kábelek hosszúsága meghaladta az 1 milliárd km-t. A globális távközlés, különösen az internetforgalom és a nagy-távolságú távbeszélő-forgalom ma már döntő hányadában optikai kábeleken bonyolódik. Az optikai vivőhullám használatának fő előnye az igen nagy adatátviteli sebesség. Manapság egyetlen egymódusú szálon több Tbit/s is elérhető, ami 1 milliószor nagyobb az 50 évvel ezelőtti rádióhullámokkal megvalósítható értéknel. Ezek az adatok meggyőzően igazolják a 40 éve elindított fejlesztések páratlan sikerét.

Charles K. Kao a Standard Telecommunication Laboratories-ban az 1960-as években. (foto: EPA)





Az 1969-ben készült felvételen a Bell Laboratórium két kutatója Willard S. Boyle (balra) és George E. Smith (jobbra) megvitatják, hogy mire lehet használni az általuk kifejlesztett CCD-érzékelőt. A diszkusszió kevesebb mint egy óra alatt megszületett. (Foto: AP)

CCD optikai érzékelő

A 2009-es fizikai Nobel-díj másik felén W. Boyle és G. Smith (AT&T Bell Laboratories) osztoznak a CCD képalkotó szenzor kifejlesztéséért. Ez az eszköz az optikai szállal csak annyiban rokon, hogy mindkét esetben a fény a főszerplő, és az optikai kábeleken továbbított információk nagy többsége ma már kép. A feltalálók eredetileg képtelefon előállításán dolgoztak és – a mágneses buborékmemória analógiájára – félvezető buborékmemóriát akartak készíteni. Létre is hozták az általuk töltés buborék eszköznek (Charge Bubble Device) nevezett felépítést. A működés lényege az a képesség volt, hogy töltést tudott végigvinni egy félvezető lapka felületén. Ez az eszköz csak egy bemeneti regiszteren keresztül kapott töltést, analóg jelek tárolására és továbbítására volt alkalmas. Hamarosan világossá vált, hogy az apró elemekből (pixelekből) álló mátrix egyes elemeit fotoeffektus révén is fel lehet tölteni, ha azokat fotodiódával kombinálják: minél több fény jut a fotodiódára, annál nagyobb áram folyik át rajta, s ezáltal

nagyobb mértékben töltődik a vele sorba kapcsolt miniatűr kondenzátor, vagyis az egyes csatolt kondenzátorokból álló IC felületén a rávetített kép töltés-reliefje jön létre. A CCD (Charge Coupled Device, töltéscsatolt eszköz) chip a kilépő elektronok számát, vagyis a képpontok intenzitását pixelről-pixelre összegezi. Külső áramkör segítségével mindegyik kondenzátor képes átadni töltését a szomszédjának, így módon a tárolt kép kiolvasható. Az így nyert analóg jelet digitalizálják, s az ismert képfeldolgozó eljárásokkal kezelhetővé teszik.

A CCD-k nagy előnye a rendkívüli érzékenység, hogy a beeső fotonok körülbelül 90%-ára képesek reagálni. Ezért széles körben alkalmazzák mikroszkópos eljárások és spektroszkópiai kutatások területén. Hatalmas a jelentősége a Világegyetem vizsgálatánál, a Hubble-teleszkópot számos CCD-vel szerelték fel. A hétköznapokban leginkább a digitális fényképezőgépek és kamerák tömeges elterjedése révén vált széles körben ismertté, gyakorlatilag csaknem teljesen kiszorítva a hagyományos filmes eljárásokat.

A jelenlegi CCD-érzékelők csak a fény intenzitását képesek érzékelni, a színét nem. Színes kép előállításához RGB (vörös, zöld, kék) szűrőkkel – a színes filmekhez hasonlóan – elsődleges alapszínekre bontják fel a képet, s mindegyik intenzitását külön rögzítik. Általában még egy további zöld szűrőt is elhelyeznek a CCD-mátrixon, a kontraszt javítása céljából. A végső képben egy-egy pixel színét a szomszédosan elhelyezkedő pixelek által felfogott fény intenzitásából számítják ki a színszűrők által átengedett színek figyelembe vételével. A fenti eljárás következtében romlik a kép élessége, ennek korrigálását azonban megfelelő maszk használatával a fényképezőgépek elvégzik. Meg kell végül jegyezni, hogy a CCD-érzékelők fogyasztása aránylag nagy, 5–6 W is lehet, szemben a manapság igen jó minőségben előállított CMOS-érzékelőkkel (0,5 W), amelyeknek más előnyös tulajdonságaik is vannak.

Irodalom

1. K. C. Kao, G. A. Hockham: Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies. *Proc IEE* 113/7(1966) 1151.

EMLÉKEZÉS SZÓBAN ÉS TETTEN...

Tíz évvel ezelőtt, 1999. november 16-án halt meg *Kapuy Ede*, a magyar kvantumkémikusok kiemelkedő személyisége, aki a Szegedi Egyetemen volt az elméleti fizika professzora, a World Association of Theoretical Organic Chemistry (WATOC) tagja, a Nemzetközi Elméleti Kémiai-Fizikai Társaság (International Society for Theoretical Chemical Physics) alapító tagja, 1994-től a Társaság magyarországi tagozatának direktora.

Halála alkalmával sokan emlékeztek meg róla, beszéltek elért eredményeiről és az őt jellemző vonásokról. A lényeghez az a méltatója került a legközelebb,

aki a professzorsághoz elvárhatóan tartozó tudományos teljesítmény számszerűsíthető adatainak leválasztása után arról írt, ami ezen túl található: *Kapuy Ede az elméleti fizika professzora volt Szegeden, noha vegyész oklevelet szerzett. De ezzel a kémikusi diplomával Gombás Pál aspiránsa lett, tehát kijárhatta a világos modellalkotás és az elszánt numerikus számolások egyik legjobb hazai iskoláját. Ő maga a modellezést választotta, az atomi szerkezet felderítésének legbatásosabb matematikai módszerét kereste.*

Néhány könyvnek is szerzője vagy társszerzője volt, de ami igazán fontos, hogy Török Ferencsel kö-

zösen valóban nagyszerű kvantumkémiai könyvet írtak magyarul – olyat ami egyszerre tankönyv és monográfia...

Ami ezen túl van, az már csak barátai, munkatársai számára létezett (pontosabban létezik, hiszen az élet kiterjesztésének ez az első köre, a kortársi emlékezet). Legjellemzőbb vonása a világ iránti mohó érdeklődés, amit csak fokozott a megszerzett tudás. Ebhez szerencsésen társult egy adottság, az átlagot messze meghaladó memória. A könyvtár legszorgalmasabb látogatójaként a megszerzhető információkat átrostálta, a használhatót megjegyezte...

Olvasottsága, logikája, memóriája segítségével nagyszerűen eligazodott az egyes emberek deklarált céljai és személyes indítékai között. A tudomány területén fellépő adminisztrátorokat adminisztrátoroknak, a szélbámosokat szélbámosoknak látta és láttatta, hogy a fennmaradó kevesekről magától értetődő elismeréssel szólhasson. Aki megbízott ítéletében – és ilyenek sokan voltunk – nagy csalódásuktól kímélhetete meg magát.

Minthogy nem járta le a lábát térdig, kitüntetéseinnek száma csekély: Akadémiai díj II. fokozat 1970-ből, Kiváló munkáért 1980-ból és ELFT Nívódíj 1983-ban. Ezzel szemben az utóbbi tíz évben is nem csökkenő számban hivatkoznak munkáira, a Kapuy-közelítés, a Kapuy-módszer a kvantumkémia megszo-kott fogalmi lettek. Az ELTE Elméleti Kémia Tanszéke 2000-től mindmáig évente a szakma kiválóságait hívja meg előadónak az *Ede Kapuy Memorial Lecture*-höz.

Ezek után nem mondható aránytévésztséne, hogy Kapuy Ede özvegye alapítvány létrehozására gondolt és ezt hamarosan meg is valósította.

A KAPUY EDE Elméleti fizikai és kémiai eredmények alkalmazása a gyakorlatban ALAPÍTVÁNY 2001 decemberében létrejött. Az alapítvány célja: Kutatók és/vagy egyetemi, PhD-hallgatók támogatása, akik olyan tudományos eredményt érnek el, melyek az elmélet fizikában és kémiában a gyakorlati alkalmazást elősegítik, illetve annak irányába mutatnak. A támogatás jelenti – többek között – a szakmailag színvonalas diákköri pályázatok és diplomamunkák díjazását, erre érdemes PhD-hallgatók, kutatók és gyakorlati alkalmazók tudományos konferenciákon való részvételének lebetővé tételét.

Azért érdemes a hiteles szöveget idézni, hogy nyilvánvaló legyen az alapítvány céljának időszzerűsége és fontossága. Ezt minden intézmény, szervezet és felsőoktatásért, tudományért felelősséget érző és/vagy viselő személy belátta a köztársasági elnöktől az MTA vezetésén át az illetékes tanszékvezetőig, és tőlük telhető eréllyel támogatták az alapítvány célkitűzéseit és magát az Alapítványt. Pénzt azonban nem sikerült szerezni (a financiális források nem nyíltak meg). Így azután nyolc év alatt semmilyen valószínű támogatásra nem nyílt mód.

Halála után tíz évvel Kapuy Edére emlékezünk. Tudományos teljesítménye állja az idő próbáját, a róla elraktározott személyes emlékek pedig az idő rostáló tevékenysége folytán egyre értékesebbek lesznek. Az alapítvánnyal meg valószínűleg az a baj, hogy nem kérhettük ki róla a névadó véleményét. Lehet, hogy mindenekelőtt diákköri dolgozat témájaként javasolta volna a *p-nél nagyobb valószínűséggel eredményesen működő alapítványok szervezése feltételeinek* kiírását.

Füstöss László

A KOPPENHÁGA BUDAPESTEN

Fizikusok régóta szerepelnek a színpadon, gondoljunk csak Brecht vagy Németh László Galileijére, majd Dürrenmatt *A fizikusok* című darabjára. A Múzeumok Őszi Éjszakáján az Elektrotechnikai Múzeumban a Műegyetem volt és jelenlegi mérnök-fizikus és matematikus hallgatói adták elő Bohr és Heisenberg barátságának történetét, Michael Frayn *Koppenhága* című kvantum-lélektani drámáját.

Természetesen semmilyen értelemben nincs új a nap alatt. *Fizikusok a színpadon* címmel majd tíz évvel ezelőtt Jéki László számolt be a *Fizikai Szemle* öt számában modern fizikusokról írt, a mai fizikából kiinduló darabokról. E szerint az utóbbi időben már nem feltétlenül az atombomba köré szerveződnek a fizikus-darabok: a *Q.E.D.* (Quantum Electrodynamics) című darabban a kvarkokról ugyan esik szó, de a darab Feynmanról szól, míg van olyan Hamlet parafrázis, amely a húrelméltre települt.

A jó darabok és neves szerzők közül is kiemelkedik Frayn *Koppenhágája*. Frayn elismert szerző, kvalitásairól magyar nyelven is meggyőződhetünk. A rendszeresen játszott *Még egyszer hátulról* (*Noises off*) jól megszerkesztett komédia, a *Balmoral* pedig olyan találóan jellemzi az angol sajtóságokat, hogy ötlete alapján született *Hamvai Kornél Szigliete*, amely évek óta a budapesti Nemzeti Színház egyik legnagyobb sikere.

Visszatérve a *Koppenhágához*; Frayn talán legelismertebb művéről van szó. Jéki László 2002-ben ezt írta: „A Copenhagen London után New Yorkban is nagy siker volt, a darab nyomán újraéledt a vita Heisenberg háborús szerepéről. A koppenhágai Niels Bohr archívum eddig nem közölt dokumentumokat tárt a nyilvánosság elé. A közlést eredetileg csak jóval későbbre, 2012-re tervezték, de a nagysikerű színdarab nyomán fellángoló viták miatt a család nem várt tovább. (Bohr 1962-ben halt meg, 50 évre tervezték a dokumentumok

zárolását.) ... Heisenberg önértékelését korábban sokan nem fogadták el, saját szerepe utólagos megszüpítésének minősítették. Többen úgy vélték, hogy Heisenberg valójában meg akarta csinálni az atombombát, csak tévedett a számításaiban és zsákutcába tévedt. Most »megszólt« a hajdani beszélgetés másik résztvevője és a visszaemlékezések megegyeznek.”

Heisenberg *A rész és az egész*ben így idézi fel ezt a találkozót: „Ha jól emlékszem, októberben értem Dániába, és tüstént meglátogattam Nielst carlsbergi otthonában, de egészen az esti séta időpontjáig nem hozakodtam elő a veszedelmes témával. Jó okom volt hinni, hogy Niels német ügynökök megfigyelése alatt áll, azért a legnagyobb körültekintéssel beszéltem. Célzásokat tettem rá, hogy elvben nincs többé akadály a atombombák építésének, gyakorlatban azonban emberfeletti technikai erőfeszítéseket igényel az ügy, ám a fizikusok mindenképpen odáig jutottak, hogy fel kell tennünk önmagunknak a kérdést: szabad-e tovább kutatni e téren? Igen ám, de amint a bomba pusztaság lehetőségét említettem, Niels annyira megrémült, hogy beszámolóim legfontosabb részét, tudniillik a technikai nehézségeket már meg sem hallotta. Már pedig számomra tényleg ez volt a döntő mozzanat: ez adta a fizikusok kezébe a döntés lehetőségét, hogy próbáljunk vagy ne próbáljunk atombombát építeni. Adhattunk volna ugyanis olyan tanácsot kormányainknak, hogy a bomba semmiképp nem készülhet el a háború végéig, és így fölöslegesen kötné le a technikai potenciál jelentős részét, de mondhattuk volna azt is, hogy a legnagyobb erőfeszítések árán esetleg még éppen időben vethetnénk be. Végső soron mindkét nézetet egyenlő meggyőződéssel hangoztathattuk volna; valóban, mint később kiderült, még Amerika sem készült el az atombombával – a maga összehasonlíthatatlanul kedvezőbb körülményei között – a német kapituláció napjáig.”

Bencze Gyula 2000 novemberében így foglalta össze véleményét a *Természet Világában*: „A *Copenhagen* című darab számos történeti tévedése és a tények kissé önkényes csoportosítása ellenére igyekszik az emberi érzelmek felől megközelíteni a fizika két nagy alakjának viszonyát, és annak fényében

Werner Heisenberg és Niels Bohr



Stenszky Dávid (Werner Heisenberg), Hudáky Zsuzsanna (Margrethe Bohr) és Papp Gergely (Niels Bohr)

megérteni, mi is történhetett azon a híres-hírhedt koppenhágai találkozón. Frayn emberileg szimpatizál Heisenberggel, akit a történelem valóban nem hozott túlságosan irigylésre méltó helyzetbe.

Nos akkor mi az igazság a koppenhágai találkozóval kapcsolatban, és milyen ember is volt Heisenberg? Sajnos ezt Frayn érdekes szindarabjából sem tudhatjuk meg, azonban a darab érdeme, hogy gondolkodásra készítet.”

A *Koppenhága* jelen változatának további érdeme, hogy egyetemisták, illetve frissen végzettek adják elő: a Műegyetem idén végzett matematikusa *Hudáky Zsuzsanna* (Margrethe Bohr) és mérnök-fizikusa *Papp Gergely* (Niels Bohr), valamint *Stenszky Dávid* (Werner Heisenberg) mérnök-fizikus hallgató. Nagyon jól, mert nem kísérelnek meg bevetni színészi eszközöket, hanem érthetően, kevés gesztikulálással mondják a szerepüket. A jellegzetesen nonprofit előadásban kellékek és smink nélkül aligha jeleníthetnék meg a 40 éves Heisenberget és a 60 éves Bohrt, és igen helyesen meg sem kísérlék. A közmegegyezés szerint kortalannak tételezett feleség alakja adott valamennyi lehetőséget színészi ábrázolásra, és az örök kételkedő *Margrethe Bohr* valóban megjelenik a színen. A néhány székből és egy asztalból álló színen, ami a célnak tökéletesen megfelelt.

A szöveg magyarra fordítása *Cziegler István* érdeme, aki az ELTE fizikus hallgatójaként fordította le a darabot nem sokkal megjelenése után. Az első hazai színpadra állítás is az ő nevéhez fűződik; 2003 és 2004 során két másik egyetemi hallgatóval többször előadták különböző alkalmi, többnyire szakmai helyszíneken. A Cziegler-féle amatőr színtársulat megszűnése után *Sükkösd Csaba* kezdeményezte a Műegyetem Természettudományi Karának hallgatói között a darab felújítását. A jelen felállásban is már több előadást ért meg a darab.

A tervek szerint lesznek még előadások. Hogy hol? Ami a helyet illeti, idézzük a darabból Bohr szavait az Univerzumból: „...nincs is precízen meghatározható, objektív Világmindenség. Csak azok között a határok között létezik, melyeket a vele való kapcsolataink határoznak meg. Csakis az ember fejében lakozó megértés által.” (FL)

