

fizikai szemle

2009/5

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-mailcíme:

szerkesztok@fizikaiszemle.hu

A lapba szánt írásokat erre a címre kérjük.

A folyóirat honlapja:

<http://www.fizikaiszemle.hu>

A címlapon:

**Magnetit nanokristályok egy
mágneses baktérium sejtben. Elektron
hologramok alapján készült mágneses
indukció térkép, amelyen az indukció
irányát a szín, intenzitásának
változását a kontúrvonalak sűrűsége
mutatja. Ed Simpson (University of
Cambridge) felvétele.**

TARTALOM

<i>Fenyvesi András, Fényes Tibor:</i> Spallációs és fragmentációs atommag-reakciók	157
<i>Kádár György:</i> A ferromágneses hiszterézis	163
<i>László János:</i> Fájdalomcsillapítás mágneses térrel	169
<i>Pósfai Mihály:</i> Mágneses baktériumok	174
<i>Szőke Larisza:</i> Teljesítménynövelés a paksi atomerőműben	178
<i>Nagy Dénes Lajos:</i> Jéki László (1942–2009)	180
<i>Jéki László:</i> Feketelyuk-sugárzás	182
<i>Radnai Gyula:</i> Séta az Aulában	190

A FIZIKA TANÍTÁSA

<i>Daróczy Csaba Sándor:</i> Kulcsok a fizikához	184
--	-----

VÉLEMÉNYEK

	187
--	-----

HÍREK – ESEMÉNYEK

	188
--	-----

A. Fenyvesi, T. Fényes: Nuclear reactions resulting in spallation and fragmentation
G. Kádár: Ferromagnetic hysteresis
J. László: Dolor soothing with magnetic fields
M. Pósfai: Magnetotactic bacteria
L. Szőke: Power boosting in the Paks Nuclear Power Plant
D. L. Nagy: L. Jéki (1942–2009)
L. Jéki: Black hole radiation
J. Radnai: Walking about in Budapest Eötvös University's Aula

TEACHING PHYSICS

Cs. S. Daróczy: Keys to physics

OPINIONS, EVENTS

A. Fenyvesi, T. Fényes: Kernreaktionen, die zu Spallation und Fragmentation führen
G. Kádár: Ferromagnetische Hysterese
J. László: Schmerzlinderung mit magnetischen Feldern
M. Pósfai: Magnetotaktische Bakterien
L. Szőke: Leistungssteigerung im Atomkraftwerk Paks
D. L. Nagy: L. Jéki (1942–2009)
L. Jéki: Die Strahlung schwarzer Löcher
J. Radnai: Ein Spaziergang in der Aula der Budapester Eötvös-Universität

PHYSIKUNTERRICHT

Cs. S. Daróczy: Schlüssel zur Physik

MEINUNGSÄUSSERUNGEN, EREIGNISSE

A. Фэнйвеш, Т. Фэнйеш: Ядерные реакции ведущие к спалляции и фрагментации
Д. Кадар: Ферромагнитный гистерезис
Я. Ласло: Ослабление боли с помощью магнитных полей
М. Пошфай: Магнитные бактерии
Л. Сёке: Повышение мощности в АЭС Пакш
Д. Л. Надь: Ласло Еки (1942–2009)
Л. Еки: Радиация чёрных дырь
Д. Раднаи: Прогулка в актовом зале Будапештского Университета им. Этвеша

ОБУЧЕНИЕ ФИЗИКЕ

Ч. Ш. Дароци: Ключи к физике

ЛИЧНЫЕ МНЕНИЯ, ПРОИСХОДЯЩИЕ СОБЫТИЯ

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 őrünk meg és nem küldünk vissza. A szerzőknek tiszteletpéldányt küldünk.

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

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

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

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

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

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

LIX. évfolyam

5. szám

2009. május

SPALLÁCIÓS ÉS FRAGMENTÁCIÓS ATOMMAG-REAKCIÓK

Fenyvesi András, Fényes Tibor
MTA ATOMKI, Debrecen

A spallációs és fragmentációs reakciók kiemelkedő jelentőségűek mind az atommagfizikai alap kutatásban, mind az alkalmazásokban. Az alap kutatásban azért, mert még több ezer atommag vár felfedezésre, és az új izotópok előállításának jelenleg leghatékonyabb módszere a nagyenergiájú nehéz ionokkal létrehozott fragmentáció [1]. A nehéz atommagok spallációja ugyanakkor kitűnő neutronhozamot biztosít széles energiatartományban, ami számos alkalmazásra nyújt lehetőséget az energetika, élettudományok, anyagvizsgálatok, szerkezetkutatások stb. területén.

A következőkben röviden összefoglaljuk a spallációs és fragmentációs reakciók legfőbb jellemzőit. Tárgyaljuk a reakciótermékek hozameloszlását, a spallációs neutronok sajátosságait (hozam, szögeloszlás, energiaspektrum) és áttekintést adunk néhány fontosabb spallációs neutronforrás jellemzőiről.

Több száz MeV-es könnyű részecskékkel (p , d , α stb.) bombázva atommagokat, jellegzetes reakció játszódik le, amit spallációnak nevezünk. A reakció első fázisában a bombázott atommagban ütközési kaszkád alakul ki, aminek eredményeként neutronok, protonok és (a mezonokeltés küszöbe felett) π -mezonok lépnek ki a magból, a maradék mag meg erősen gerjesztődik. A reakció következő fázisában a gerjesztett magból nukleonok párolognak el.

Kis valószínűséggel atommagok például (${}^4\text{He}$, ${}^{12}\text{C}$) is kilépnek az atommagból. Ez utóbbi folyamatot fragmentációnak nevezzük. Növekvő bombázórészecske-energiánál a fragmentáció valószínűsége nő.

A reakciótermékek hozameloszlása

A rendelkezésre álló kísérleti adatok szisztematikus vizsgálata alapján Rudstam [2] megalkotott egy többparaméteres formulát, ami jó leírást ad a spallációs reakció hatáskeresztmetszetére széles bombázóener-

gia- és céltárgy-atommag tartományban. E szerint egy Z rendszámú és A tömegszámú reakciótermék $\sigma(Z, A)$ individuális hatáskeresztmetszete¹ a következőképpen függ a bombázó részecske E energiájától, valamint a céltárgymag A_t tömegszámától:

$$\sigma(Z, A) \approx F(A_t) f_2(E) \frac{P(E) \times \exp[-P(E) \times (A_t - A)]}{1 - \frac{0,3}{P(E) \times A_t}} \times \exp[-R(A) \times |Z - SA + TA|^n],$$

ahol az $F(A_t)$, $f_2(E)$, $P(E)$, $R(A)$ függvények közelítő alakját az 1. ábra mutatja. A $P(E)$ paraméter csak a bombázó részecske energiájától függ, nem függ a típusától, értéke p , n , d és α -részecskékre ugyanaz. Az állandók numerikus értékei a következők: $n = 1,5$, $S = 0,486$, $T = 0,00038$. A formula $PA_t \geq 1$ -re érvényes.

Példaképpen a 2. ábra bemutatja a ${}^{181}\text{Ta} + 660$ MeV-es proton spallációs reakció individuális hatáskeresztmetszetét – $\sigma(Z, A)$ – görbéit a termékek rendszámának (Z) és tömegszámának (A) függvényében. Számos más céltárgy-atommagra is található numerikus adatok Rupp, Fényes [3] közleményében. A nagyenergiájú magreakciók részletesebb tárgyalását lásd például Feshbach összefoglaló munkájában [4], valamint [5]-ben.

A fragmentációs reakciót sematikusan a 3.a ábrán ábrázoltuk. A közbeeső tömegű fragmensek rendszám szerinti hozameloszlását¹ különböző reakciókra a 3.b ábra mutatja.

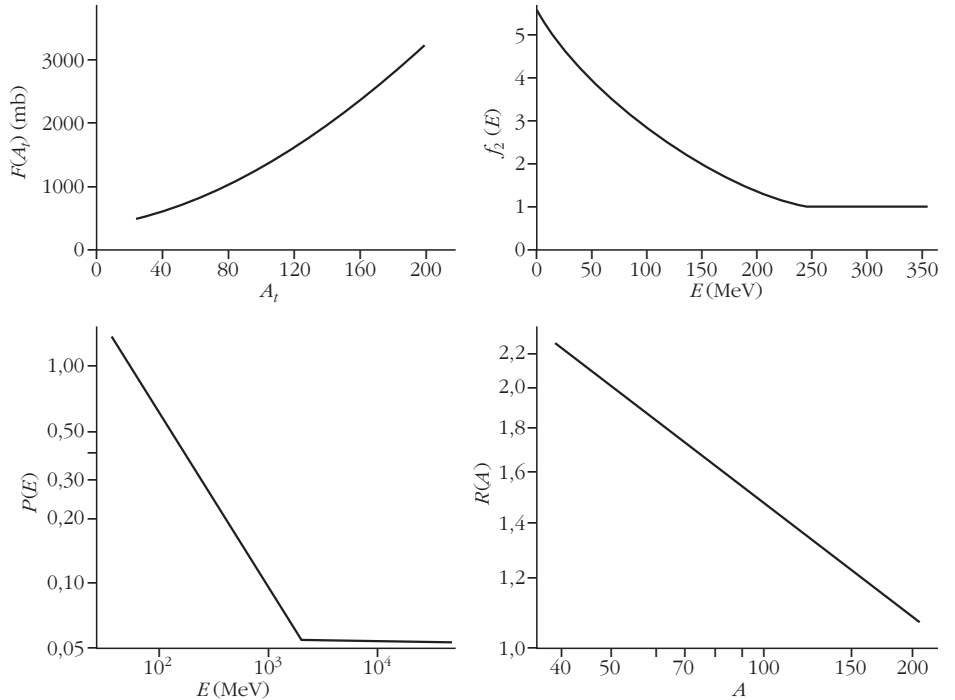
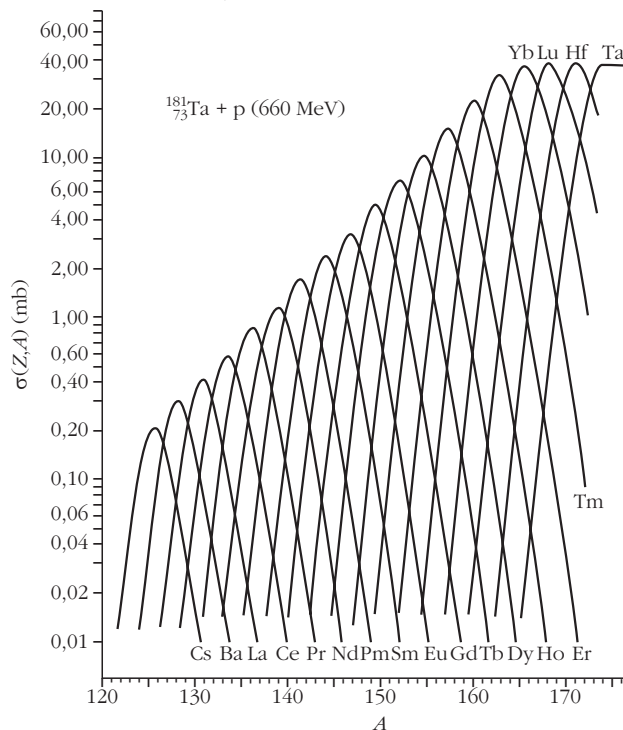
¹ A reakcióhozam (Y) definíció szerint: $Y \equiv \Delta N/N_0$, ahol N_0 a céltárgyra időegység alatt eső bombázó részecskék számát, a ΔN pedig a létrejött magreakciók számát jelöli. A hatáskeresztmetszet $\sigma \equiv \Delta N/(N_0 n_s)$, ahol n_s a felületegységre eső céltárgy-atommagok száma. A σ egysége a barn ($1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$).

A fragmensek tömegeloszlása a $10 \leq A \leq 40$ tartományban jól leírható az $Y \sim A^{-\tau}$ hatványfüggvénnyel, ahol Y a hozamot, A a fragmens tömegszámát jelöli. A τ kitevő a gerjesztési energia függvénye, értéke 2–3 között van, ha a termikus gerjesztési energia körülbelül 3–9 MeV/nukleon. A rendszám szerinti hozameloszlás (3.b ábra) is elég jól közelíthető a hatványfüggvénnyel.

A közbeeső fragmensek ($3 \leq A \leq 20$) töltéseloszlását a statisztikus modell jól leírja. A részleteket illetően lásd *Karnaukhov* közleményét [6].

Erősen neutrontöbbletes atommagok előállítására kitűnően alkalmasak a fragmentációs (és a bombázó részecske hasadási) reakciók. Ez jól látszik a 4.a és a 4.b ábrán, ahol a nátrium izotópokra vonatkozó hatáskeresztmetszet-, illetve hozamarányok vannak feltüntetve különböző nagyenergiájú reakciókra [7]. A fragmentációs reakciók kiemelt szerepét a stabilitási

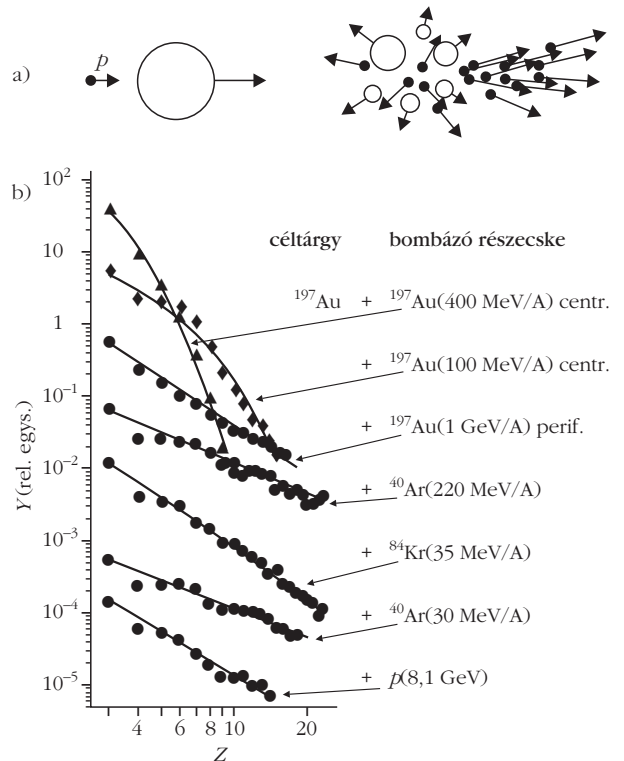
2. ábra. A $^{181}\text{Ta} + 660$ MeV-es proton spallációs reakció individuális hatáskeresztmetszet-görbéi a tömegszám (A) és rendszám (Z) függvényében. Az adatok a Rudstam-formula alapján lettek számolva. Rupp és Fényes [3] alapján.

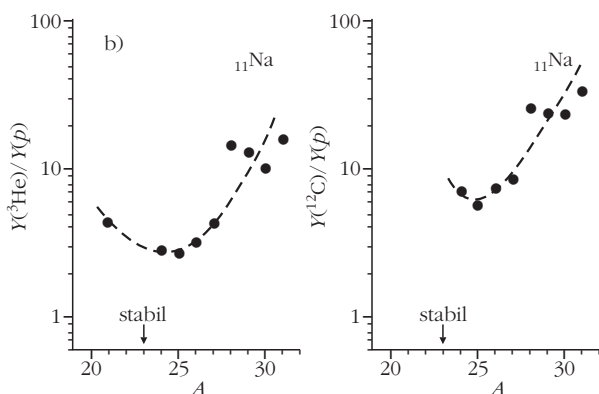
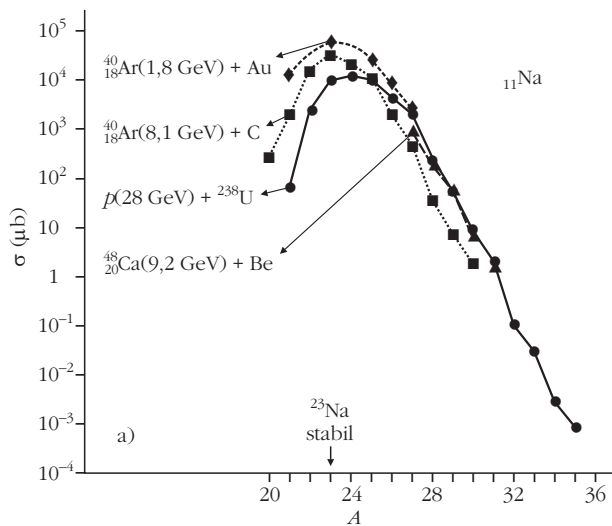


1. ábra. Az $F(A_i)$, $f_2(E)$, $P(E)$ és $R(A)$ paraméterek értékei a spallációs reakció hatáskeresztmetszetét leíró formulában. A a spallációs termék tömegszáma, a többi szimbólum jelentését lásd a szövegben. Rudstam [2] alapján.

sávtól távolieső atommagok előállításában egy korábbi közleményben részletesebben tárgyaltuk [1].

3. ábra. a) Nagyenergiájú proton ütközése nehéz atommaggal. A fragmentációs reakció vázlatos ábrázolása. b) A közbeeső fragmensek ($3 \leq Z \leq 20$) hozameloszlása (Y) a rendszám (Z) függvényében a $^{197}\text{Au} + ^{197}\text{Au}$, $^{197}\text{Au} + ^{40}\text{Ar}$, $^{197}\text{Au} + ^{84}\text{Kr}$ és $^{197}\text{Au} + p$ fragmentációs reakciókra. Karnaukhov [6] alapján.



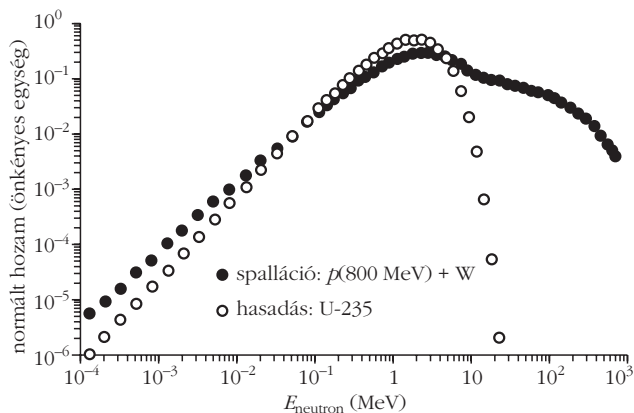
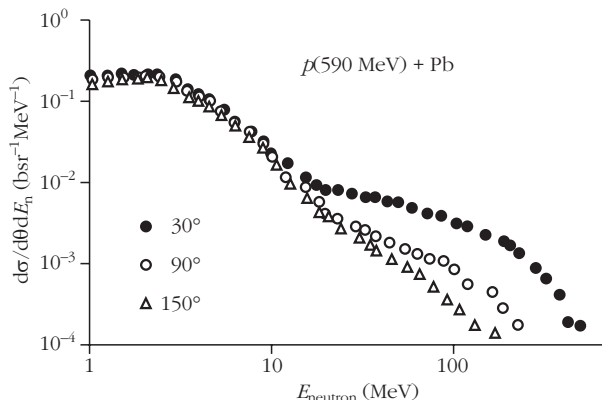


4. ábra. a) Na izotópokhoz vezető fragmentációs reakciók hatáskeresztmetszetei. b) A fragmentációs reakciók $Y(^3\text{He})/Y(p)$, illetve $Y(^{12}\text{C})/Y(p)$ hozamarányai nátrium izotópokra, ha urán céltárgyat 86 MeV/A energiájú ^3He , illetve ^{12}C nyalábokkal és 600 MeV-es protonokkal bombázunk. Bennett és mts. [7] alapján.

Spallációs neutronforrások

A spallációs, illetve fragmentációs reakciók alkalmasak intenzív neutronnyalábok előállítására is. Ezért fontos szerepet játszanak a gyorsítóval üzemeltetett

6. ábra. 590 MeV energiájú protonok által Pb céltárgyban kiváltott spallációs reakció $d\sigma/(d\Theta dE_n)$ neutronkibocsátási differenciális hatáskeresztmetszete az E_n neutronenergia függvényében, a bombázónyáláb irányához viszonyított 30° , 90° és 150° szögeknél [8].



5. ábra. Egy spallációs, valamint egy hasadási neutronforrás által kibocsátott neutronok hozamának eloszlása (spektruma) a neutronenergia függvényében. Mindkét spektrum azt adja meg, hogy az összes neutronok hanyadrésze esik egy-egy energiatartományba.

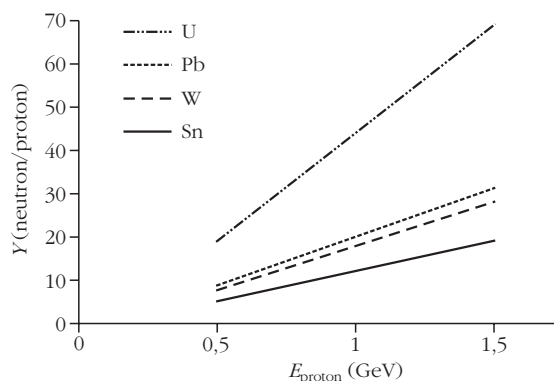
energiasokszorozóban, továbbá a szilárdtestfizikai célokra épített spallációs neutronforrásokban.

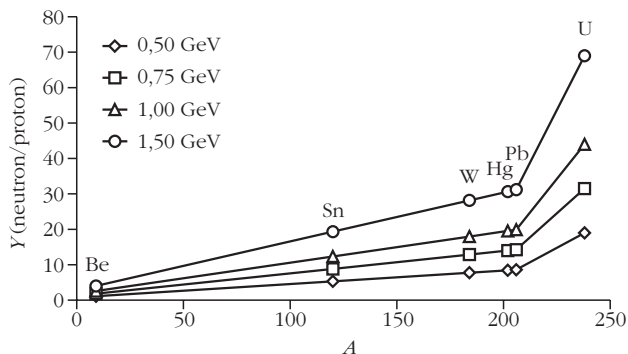
A spallációs reakcióban keletkező neutronok hozamát a neutronenergia függvényében az 5. ábra mutatja. Az ábrán az is látható, hogy a spallációs reakció jóval szélesebb energiatartományban szolgáltat neutronokat, mint a hasadási reakció.

A spallációs reakció során a magból kilépő nagyenergiájú neutronok szög szerinti eloszlása jelentős anizotrópiát mutat a laboratóriumi rendszerben. Kis neutronenergiákon az anizotrópia jóval kevésbé szembetűnő. Erre utal 6. ábra, amely 590 MeV energiájú protonok által bombázott Pb céltárgy esetén adja meg a $d\sigma/(d\Theta dE_n)$ neutronkibocsátási differenciális hatáskeresztmetszetet az E_n neutronenergia függvényében különböző szögeknél [8].

A 7. ábra azt mutatja be, hogy az egy proton által keltett spallációs neutronok száma (Y) hogyan függ a bombázó proton energiájától (E_{proton}) különböző céltárgyanyagok esetén. A 8. ábra az egy protonra eső neutronhozamot (Y) ábrázolja a céltárgy tömegszámának (A) függvényében különböző bombázóenergiáknál (E_{proton}). Fraser és munkatársai [9] az egy proton által keltett spallációs neutronok számára, vagyis

7. ábra. Az egy proton által keltett spallációs neutronok hozama a bombázó proton energiájának függvényében különböző tömegszámok esetén. A protonokkal bombázott hengeres céltárgyak átmérője 10,2 cm, hosszúsága 61 cm volt. Fraser és Bartholomew [12] alapján.





8. ábra. Az egy proton által keltett spallációs neutronok hozama a céltárgymag tömegszámának függvényében különböző bombázó-energiáknál. A protonokkal bombázott hengeres céltárgyak átmérője 10,2 cm, hosszúsága 61 cm volt. Fraser és Bartholomew [12] alapján.

a neutronhozamra vonatkozóan a következő összefüggéseket állapították meg:

$$Y(E, A) = \begin{cases} 0,1 (E - 0,12) (A + 20) & \text{hasadóanyagok} \\ & \text{kivételével} \\ 50 (E - 0,12) & {}^{238}\text{U} \text{ esetén,} \end{cases}$$

ahol E GeV-ben értendő. A vizsgálatokat az 500 MeV $< E < 1,5$ GeV tartományban végezték 10,2 cm átmérőjű és 61 cm hosszúságú hengeres céltárgyakat használva. Amikor az átmérőt 10,2 cm-ről 20,3 cm-re növelték változatlan hossz mellett, mintegy 20%-kal megnőtt a neutronhozam.

A céltárgy optimális átmérője elvileg csak a bombázóenergia által meghatározott internukleáris kaskád hossz- és sugárirányú kiterjedésétől, a neutronelnyelődéstől és a neutronkiszökéstől függ. A gyakorlatban azonban figyelembe kell venni a céltárgyban disszipáló hő elvezetésével járó mechanikai, hidraulikai és más technikai korlátokat is.

magreakció	neutronhozam	hőleadás a céltárgyban (MeV/neutron)
$T(d, n)$ ($E_d = 0,2$ MeV)	$8 \times 10^{-5} n/d$	~2500
$W(e, n)$ ($E_e = 35$ MeV)	$1,7 \times 10^{-2} n/e$	~2000
${}^9\text{Be}(d, n)$ ($E_d = 15$ MeV)	$1,2 \times 10^{-2} n/d$	~1200
${}^{235}\text{U}(n, f)$ maghasadás	~1 n /hasadás*	~200
(T, d) fúzió	~1 n /fúzió	~3
Pb spalláció ($E_p = 1$ GeV)	20 n/p^{**}	~23
${}^{238}\text{U}$ spalláció ($E_p = 1$ GeV)	40 n/p^{**}	~50

* Hasadásonként átlagban 2,4 neutron keletkezik, de ebből ~1,4 neutron a láncreakció fenntartásához és a különböző veszteségek (elnyelődés, kiszökés stb.) pótlásához szükséges.

** 10,2 cm átmérőjű és 61 cm hosszúságú hengeres céltárgy esetén.

Az 1. táblázat áttekintést ad arra vonatkozóan, hogy a különböző magreakciókkal milyen neutronhozamok érhetőek el. A táblázat jól mutatja, hogy a spallációs neutronforrások hozama kiemelkedően nagy, miközben az 1 neutron keltése során disszipáló hő kicsi. Emiatt a neutronintenzitás növelésének lehetősége terén jelentős tartalékok vannak más típusú neutronforrásokkal szemben. Az intenzitásnövelésnek természetesen vannak korlátai. A céltárgy hűtésének fentebb említett problémáján kívül számításba kell venni a céltárgy és környezete sugárkárosodását, a sugárvédelmi szempontokat, valamint a technikai megoldások és az üzemeltetés gazdaságossági szempontjait is.

A 2. táblázat a spallációs céltárgyként használt néhány anyag jellemzőit mutatja. A táblázatból kitűnik, hogy az ólom és a bizmut, valamint ezek eutektikus (LBE) ötvözeete igen kedvező a neutronabszorpció

céltárgy anyaga	tömegszám (A)	neutronelnyelési hatáskeresztmetszet (barn)	hővezetési állandó ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)*	olvadáspont (K)
Ta	181	21	54	3270
W	184	19,2	180	3380
Hg	201	375	8,3	234
Pb	207	0,17	35 (16 – 623 K esetén)	600
Bi	209	0,034	8,5 (11,3 – 573 K esetén)	544
Pb-Bi eutektikus ötvözet		0,094**	9,3 (423 K esetén)	398
Th	232	7,4	41	1968
${}^{\text{nat}}\text{U}$	238	7,59	25	1406
${}^{238}\text{U}$	238	2,7	25	1406

* 273 K esetén, ha nincs más megadva.

** Effektív hatáskeresztmetszet.

Néhány spallációs neutronforrás technikai jellemzői

berendezés	céltárgy anyaga	bombázó nyaláb teljesítménye (kW)	céltárgy mértékadó hőterhelése	hűtőközeg a primer körben	moderátorok
NTOF (CERN, Genf, Svájc) H ⁺ ($E = 20$ GeV, $I = 7 \times 10^{12}$ proton/impulzus) $t = 6$ ns, $\nu = 0,06\text{--}0,42$ Hz	Pb	1,4 – 10 (22,4 kJ/impulzus)	10 kW	H ₂ O	H ₂ O (300 K)
SINQ (PSI, Villigen, Svájc) H ⁻ ($E = 570$ MeV, $I = 1,3$ mA) folyamatos üzemmód	Pb	750	750 kW	D ₂ O	D ₂ O (300 K) D ₂ -folyadék (25 K)
MEGAPIE (PSI, Villigen, Svájc) H ⁻ ($E = 570$ MeV, $I = 1,3$ mA) folyamatos üzemmód	LBE	1000	1000 kW	LBE	
ISIS (RAL, Didcot, Egyesült Királyság) H ⁻ ($E = 800$ MeV, $I = 200$ μ A) $t = 100$ ns, $\nu = 50$ Hz	W	160	90 kW	H ₂ O	H ₂ O (316 K) CH ₄ -folyadék (100 K) H ₂ -folyadék (20 K)
Mark-2 (Lujan Center, LANSCE, LANL, Los Alamos, NM, USA) H ⁻ \rightarrow H ⁺ ($E = 800$ MeV, $I = 135$ μ A) $t = 125$ ns, $\nu = 20$ Hz	W	108	108 kW	H ₂ O	H ₂ O (283 K) H ₂ -folyadék (20 K) szilárd D ₂ (5 K)
SNS (ORNL, Oak Ridge, TN, USA) H ⁻ ($E = 1$ GeV, $I = 1,4$ mA) $t = 695$ ns, $\nu = 60$ Hz	Hg	1400	24 kJ/impulzus	Hg	H ₂ O (300 K) H ₂ -folyadék (20 K)
JSNS (J-PARC, Tokaimura, Ibaraki, Japán) H ⁻ ($E = 3$ GeV, $I = 333$ μ A) $t = 1$ μ s, $\nu = 25$ Hz	Hg	1000	40 kJ/impulzus	Hg	H ₂ O (300 K) H ₂ (20 K, 1,5 MPa, 100% para állapot)
ESS (helyszínről 2009-ben várható döntés**) H ⁺ ($E = 1$ GeV, $I = 150$ mA) $t = 2$ ms, $\nu = 16$ 2/3 Hz	Hg*	5000	300 kJ/impulzus	Hg	H ₂ O (300 K) H ₂ -folyadék (20 K)

Jelmagyarázat: E : nyalábenergia, I : nyalábfáram, t : a nyaláb makroimpulzusainak hossza, ν : a makroimpulzusok ismétlődési frekvenciája.

* LBE és W céltárgyakra is készülnek elemzések.

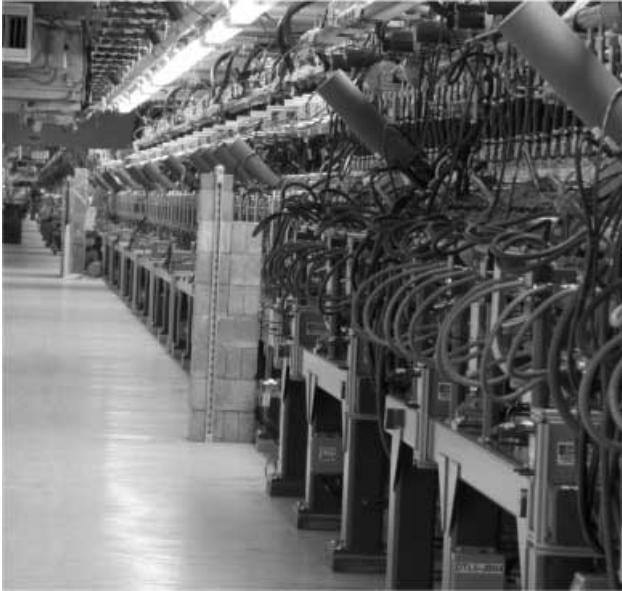
** Jelöltek: Debrecen, Magyarország; Bilbao, Spanyolország; Lund, Svédország (legvalószínűbb helyszín).

szempontjából. Ezen anyagok szilárd és olvadék céltárgy használatát egyaránt lehetővé teszik. Az LBE ötvözet céltárgyként és/vagy hűtőközeggként való használata kedvező több, már jelenleg is létező, valamint a még fejlesztés szakaszában levő nukleáris technológia esetén is (gyorsreaktorok, spallációs céltárgyak hosszú felezési idejű radioaktív hulladékok transzmutációjához, radioizotópok termelése stb.). A bizmutból azonban polónium izotópok is keletkezhetnek, ezért rendkívül biztonságos és igen költséges technológiák alkalmazására van szükség. Az Európai Unióban nemzetközi együttműködésben fejlesztették ki, és 2006 óta a Paul Scherrer Intézetben (Villigen, Svájc) üzemeltetik az olvadt LBE ötvözetet tartalmazó MEGAPIE spallációs céltárgyat. Az 1 MW hőteljesítmény elviselésére tervezett rendszerrel tanulmányozni lehet az LBE ötvözet használatával járó technológiai megoldásokat.

Ciklotronok, szinkrotronok és lineáris gyorsítók mellett egyaránt épültek spallációs neutronforrások. A gyorsítók mellett szerzett tapasztalatok alapján az adódott, hogy a H⁺- és H⁻-ionok gyorsítására kifejlesztett nagyáramú lineáris gyorsítók mellett érhető el a legnagyobb neutronintenzitások legkisebb költségek mellett.

Néhány spallációs neutronforrás technikai jellemzőit a 3. táblázat mutatja.

A bombázórészecskék gyorsítása több lépésben történik más-más típusú gyorsítókkal. A részecskék a gyorsítók belsejében igen nagy frekvenciájú elektromágneses mezőktől nyerik az energiájukat. Az egyes fokozatok típusától függően a gyorsítófeszültség frekvenciája a MHz–GHz tartományba esik. A céltárgyat valójában a legelső gyorsító fokozat frekvenciájának megfelelő részecskecsomagok (mikropulzusok) sorozatával bombázzák. A legtöbb spallációs neutronforrást azonban nem folyamatos üzemmódban használják. Sokkal nagyobb neutronintenzitások érhetőek el, ha egy rövid t időtartamban sokszorosára növelik a bombázórészecskék áramát, majd annyi ideig szüneteltetik a besugárzást, ami elegendő a céltárgyban disszipált nyalábenergia elvezetésére. Csak azt követően érkezik a következő mikropulzus-sorozat (makroimpulzus, röviden impulzus) a céltárgyra. A rövid impulzusú spallációs neutronforrások esetén $t \approx 1\text{--}2$ μ s, míg a hosszú impulzusú források esetén $t \approx 1\text{--}2$ ms. A besugárzási periódusok ν ismétlődési frekvenciájának tipikusan az elektromos hálózat frekven-



9. ábra. Az Oak Ridge-ben működő SNS (Spallation Neutron Source) mintegy 300 méter hosszú lineáris gyorsítója, mely az eredendően 2,5 MeV energiájú H^- -ionokat 1 GeV energiára gyorsítja.

ciáját vagy annak felét-harmadát választják. Az impulzus üzemmód különösen szigorú követelményeket támaszt a céltárggyal, a gyorsítórendszerrel és az elektromos energiaellátó hálózattal szemben. A besugárzási impulzus t ideje alatt a pillanatnyi nyalábteljesítmény a rövid impulzusú források esetén elérheti a több tíz GW nagyságrendet is, míg a hosszú impulzusú források esetén néhány MW nagyságrendű.

Az anyagszerkezeti kutatások céljára szolgáló rövid impulzusú spallációs neutronforrások esetén a szükséges μ s-os impulzusok elérése érdekében két módszert alkalmaztak eddig. Az egyik módszerben az utolsó fokozatként szolgáló lineáris gyorsítóból (linac, 9. ábra) kilépő protonok egy tárológyűrűbe kerülnek, ahol már nem nő tovább az energiájuk, hanem csak a protoncsomagok összenyomása történik meg. Ezt a technikai megoldást alkalmazzák az Oak Ridge-ben található SNS-nél (Spallation Neutron Source) is, ahol a tárológyűrűből kivont 1 GeV-es protoncsomagokkal bombázzák a spallációs céltárgyat (Hg). Más módszert alkalmaznak a Tokaimurában található J-PARC (Japanese Proton Accelerator Research Complex) mellett működő JSNS (Japanese Spallation Neutron Source) spallációs neutronforrás esetén. Ott egy lineáris gyorsító által táplált nagyfrekvenciájú szinkrotronban 3 GeV energiát érnek el a protonok, miközben megtörténik a protoncsomagok összenyomása is. A JSNS higany céltárgyát bombázzó 3 GeV energiájú protonokat a szinkrotronból vonják ki. (Megemlítendő, hogy ez a 3 GeV-es szinkrotron táplálja a J-PARC harmadik fokozatát, az 50 GeV-es szinkrotront is, amelyet nagyenergiájú fizikai kísérletek céljára használnak.)

Az anyagszerkezeti vizsgálatok céljára használt spallációs neutronforrásokat különböző neutronlassító (moderátor) és reflektáló közegek kombinációjával veszik körül. Legkívül a sugárvédelmi árnyékolás van, amely a forrás spektrumától és intenzitásától függően

akár több méter vastagságot is elérhet. A forrás és a besugárzóhelyek között csatornákat, neutronvezetőket alakítanak ki. Ezekben jutnak el neutronok a detektorhoz vagy a vizsgálandó mintához. A forrás közvetlen közelében elhelyezett, megfelelően kialakított moderátorokból szóródnak a csatornába a kívánt energiatarományba lelassult neutronok. Termikus neutronok ($E_n \approx 0,025$ eV) előállítására céljából rendszerint szobahőmérsékletű vizet vagy nehézvizet (D_2O) szokás használni. Hideg neutronok (300 neV $< E_n < 250$ meV) előállításához 20–25 K hőmérsékletű gáz vagy folyadék halmazállapotú hidrogént, deutériumot vagy metánt használnak. Az úgynevezett ultrahideg neutronokat ($E_n < 300$ neV) 5 K hőmérsékletű fagyott D_2 darabkákból álló moderátorban való termalizálás és szuperfolyékony 4He atomjaival való ütköztetés segítségével állítják elő. A termikus és hideg neutronok gyakorlati alkalmazásainak száma igen nagy. Az ultrahideg neutronok főleg alapvető részecskefizikai állandók meghatározásához szükségesek.

Akár a 10^{-6} – 10^9 eV energiatarományban is elő lehet állítani neutronokat spallációs források mellett. A 15 nagyságrendet lefedő energiataromány és az elérhető neutronintenzitások számos új alapkutató és alkalmazást tesznek lehetővé ugyanazon laboratóriumban. A spallációs neutronforrások létesítése iránti igények ezért világszerte növekednek, amit jól mutat az is, hogy nemrég helyezték üzembe Oak Ridge-ben az SNS-t és Tokaimurában a JSNS-t. Több, korábban meghatározó szerepet játszó forrás továbbfejlesztésén is dolgoznak jelenleg. A remények szerint néhány éven belül az Európai Unió területén is elkezdődhet az ESS (European Spallation Source) [10] építése, amely a jelenlegi elképzelések szerint a Mezei Ferenc alapötletét megvalósító hosszúimpulzusú spallációs neutronforrás lehet [11].

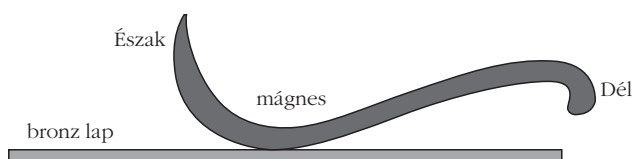
Irodalom

1. Fényes T.: Atommagok a nukleonleszakadási határ közelében. *Fizikai Szemle* 58 (2008) 323.
2. Rudstam G., *Zeitschrift für Naturforschung* 21a (1966) 1027.
3. Rupp E., Fényes T., *Szobcsenyija OJAI* (Dubna) 6-4998 (1970).
4. Feshbach H.: *Theoretical nuclear physics. Nuclear reactions*. Wiley, New York, 1992.
5. *GEANT4 Physics Reference Manual*. CERN, Geneva, Switzerland, December 9, 2005. (<http://geant4.web.cern.ch/geant4/G4UsersDocuments/UsersGuides/PhysicsReferenceManual/html/PhysicsReferenceManual.html>)
6. Karnaukhov V. A., *Particles and nuclei (ECHAYA)* 37(2006).
7. Bennette R. et al.: Radioactive nuclear beam facilities. *NuPECC Report 2000* CERN – ISOLDE, Geneva, Switzerland.
8. Cierjacks S. et al., ICANS V, *Proc. 5th Meeting of Intern. Collaboration on Advanced Neutron Sources*, KFA-Jülich, 1981.
9. Fraser J. S. et al., *Physics in Canada* 21/2 (1965) 17.
10. ESS Council, *The ESS Project, Volume III – Update, Technical Report Status December 2003*. ISSN 1433-559X, December 2003.
11. Mezei F., Tindemans P., Bongardt K.: *Current ESS proposal, The 5 MW LP ESS; best price-performance, an EU FP7 Preparatory Phase Project, 2009*. (<http://ess-neutrons.eu/index.php/current-proposal>)
12. Fraser J. S., Bartholomew G. A.: Spallation Neutron Sources. In Cierjacks S. (editor): *Neutron Sources for Basic Physics and Applications*. – an OECD/NEA Report, A Nuclear Energy Agency Nuclear Data Committee (OECD) Series, Volume 2, Pergamon Press, Oxford – New York – Toronto – Sydney – Paris – Frankfurt, 1983.

A mágnesség titokzatos jelensége több mint 3000 éve izgatja a kíváncsi emberek fantáziáját. *Plinius* római történetíró idézett egy legendát, amely szerint egy *Magnesz* nevű görög pásztor tapasztalta először, hogy hegyi legelőjén egy kődarab magához ragadja vashegyű botja végét. Azt a *mágnés-vasérc* (*magnetit*) darabot bizonyára egy villám erős árama tudta olyan vonzóvá, mágnessé tenni. *Szókratész* megemlíti, hogy a mágnés-vasércel mágnesezni lehet egy vaspálcát. Az ókori Egyiptomban úgy tartották, hogy a mágnés-vasérc a Föld istennő unokájának csontja és *Kolumbusz* előtti maya legendák is szólnak a mágnéses vasércről. Korábban más jelenségeknél nem volt tapasztalható mágnesezésekhez hasonló rejtélyes erő, amikor két test látható összeköttetés nélkül vonzhatja és közvetlen érintés nélkül taszíthatja egymást. Ez a kétféle (északi és déli) pólusra sarkított anyagdarabok között ható *titokzatos erő* aztán sok babonás hiedelemnek és tudományoskodó téveszmének is forrása volt. Érdekességként említhetjük, hogy mágnéses elven működő „örökmozgó” szerkezetek ötleteinek hosszú sorát írták le, sőt szabadalmaztatták az elmúlt évszázadokban.

Arról is tudunk, hogy mintegy kétezer esztendeje a *kínaiak* használtak egy „Délre mutató” eszközt, egy mágnés-vasérből készült kanalat. Az *1. ábrán* látható kanál – súlyeloszlása miatt – egyetlen ponton érint-

1. ábra. „Délre mutató” mágnéses kanál



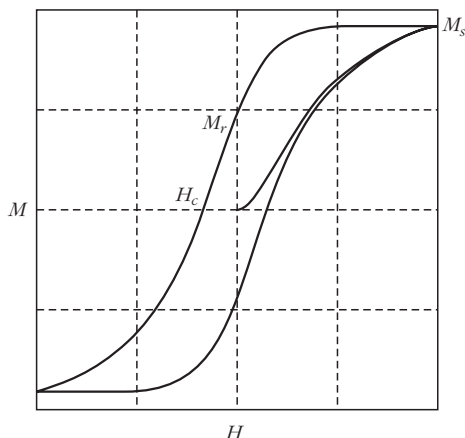
kezett a vízszintes asztallal, és bármilyen időjárás mellett a delelő Nap irányába tudott fordulni. Ma is úgy tudjuk, hogy az Északi Sarkcsillag irányát a végtelen tengerek bármely pontján borús időben is biztonsággal kijelölő *iránytű* kínai találmány. Ez tette lehetővé *Kolumbusz Kristóf* vállalkozását a Föld körülhajózására és így Amerika felfedezését 1492-ben, az újkor hajnalán.

A mágnesség jelenségének és a mágnéses anyagoknak a tudományos igényű megfigyelése és vizsgálata ezután, az újkorban, a 16. században kezdődött el. *Sir William Gilbert* angol tudós gömb alakú magnetitgolyók vizsgálata során arra a következtetésre jutott, hogy „Magnus magnes ipse est globus terrestris”, vagyis „Maga a Föld glóbusza egy hatalmas mágnés”. A Föld mágnességének, északi és déli mágnéses pólusainak felismerése mellett azt is megállapította, hogy a mágnéses anyagok elég magas hőmérsékleten elveszítik a mágnességüket.

A mágnéses pólusok (és az elektromos töltések) között ható erők törvényszerűségét a 18. század végén *Coulomb* állapította meg gondos mérési eredményei alapján. *Hans-Christian Oersted* dán tudós érdeme az *áram mágnéses hatásának* felismerése 1820-ban. *André Marie Ampère* még ugyanabban az évben a jelenség kísérleti vizsgálata nyomán leírta a természetes mágnesség eredetére vonatkozó elméletét. Eszerint a mágnéses anyagok *parányi elektromágnesekből* épülnek fel, amelyeket az anyagban folyó *köráramok*, vagyis önmagába visszatérő pályán perdülő mozgású elektromos töltések hoznak létre. A ferromágneses (megmaradó állandó mágnesezettségű) anyagokban ezek a kicsiny mágnések mind ugyanabba az irányba állnak be, így az anyag teljes térfogata mágnéses lesz. Ez a kép lényegét tekintve – mutatis mutandis – ma is helytálló.

A 19. század második felében *Michael Faraday* kísérleti és *James Clark Maxwell* elméleti munkájával, a Maxwell-egyenletek felfedezésével alakult ki a modern elektromágnesség klasszikus elmélete, amely megadja az elektromosság, a mágnesség és a fizikai fénytán jelenségeinek matematikai leírását. A 20. században folytatódott a mágnéses anyagok és jelenségek megismerésére irányuló, fontos új eredményeket hozó kísérleti és elméleti alapkutatás.

A kvantumelmélettel összefüggő meglepő megállapítás, a Bohr-deLeuwen-tétel szerint a klasszikus fizika fogalmi kereteiben a mágnéses térbe helyezett elektronok rendszerének összegzett mágnesezettsége mindig nulla, vagyis az ismert anyagi mágnéses jelenségek (dia-, para-, ferro-, ferri-, antiferromágneses stb. anyagok) nem értelmezhetők a kvantummechanikai impulzusmomentum és mágnéses momentum fogalmi nélkül. A mágnesség témakörét sok kitűnő kézikönyv tárgyalja, például [1, 2].



2. ábra. A mágnesezési folyamat hiszterézisgörbéje

Mágnesezési folyamatok

Az utóbbi évtizedekben a mágneses anyagok műszaki alkalmazása terén elért kutatási eredményeknek is nagy jelentőséget tulajdoníthatunk. A ferromágneses anyagok mérnöki alkalmazásai szempontjából fontos szerepet kapott a mágnesezési, másképp hiszterézis-görbék, vagyis a kívülről alkalmazott H mágneses tér függvényében változó M mágnesezettség tanulmányozása.

Mágneses egységekből (egyedi spinekből, spin-csoportokból, finom részecskékből, szemcsékből, doménekből stb.) összetett rendszerek, a mágneses anyagok viselkedése sok tekintetben alkalmas arra, hogy modellje legyen kölcsönható elemi egységek rendszereiben lezajló kollektív jelenségek különböző típusainak. Egy ferromágneses anyag mágnesezési görbéje például meg tudja jeleníteni az irreverzibilis átalakulási folyamatok széles osztályának jellemző vonásait.

A mágneses hiszterézis sztatikus, vagyis a reverzibilitástól való eltérést nem időbeli dinamikai fejlődés okozza. Az átmenetet jellemző makroszkopikus paraméterek közvetlenül nem érzékenyek a mikroszkopikus részletekre. Az irreverzibilis viselkedés a mágneses paramétereknek egy véges átmeneti tartományára korlátozódik, ahol a két végállapot (ferromágnesben a két ellentétes irányban telített állapot) közötti folytonos átmenet változási iránytól függően két különböző értékű függvény mentén megy végbe, ezek határolják hurokszerűen a paraméterek értékeit.

A mágneses anyagokban mérhető $M(H)$ hiszterézisfüggvény egy jellegzetes példáját a 2. ábra mutatja. A vízszintes tengelyen a változó H külső mágneses teret árammal átjárt tekercsben hozhatjuk létre. Ennek hatására a tekercsben elhelyezett mágneses anyagnak változik az M mágnesezettsége, ami a mágneses hatást jellemző mágneses momentum összegzett értékének térfogati sűrűsége. A nulla mágnesezettségű „szűz” állapotból indulva H növelésével M is növekszik, majd elég nagy térben a mágnesezettség már nem növekszik tovább, telítésbe (M_s) megy.

Innen visszafelé csökkentve a külső tér nulla értékénél a mágnesezettség nem csökken nullára, megmaradó értékét remanens mágnesezettségnek (M_r) nevezzük. Negatív térérték, a koercitív erő (H_c) értéke kell ahhoz, hogy a mágnesezettség nullára csökkenjen. A mágnesezési görbe szimmetrikus, negatív tereknél $-M_s$ értéken telítődik, $-M_r$ a remanens érték és $-H_c$ a koercitív erő. A kétféle irányban felvett görbék az $M(H)$ síkon egy hiszterézishurok területét zárják be, és ennek az energia dimenziójú területnek a nagysága a teljes mágnesezési ciklusban keletkezett hőveszteséget jellemzi.

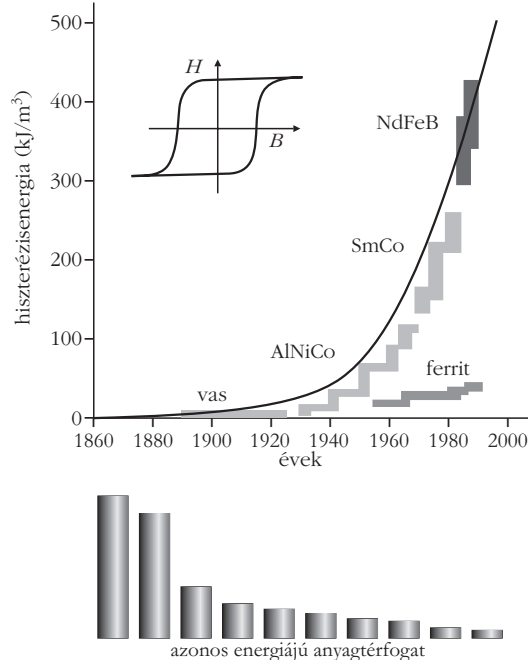
Ennek a legkülső nagy főhuroknak a belsejében az M mágnesezettség értékei a H mágneses tér változásának az irányától és előtörténetétől is függenek. A rendszer aktuális állapotait egy elágazó, többértékű függvény írja le, amely nem-reverzibilis ugyan, de mégis egyértelműen meghatározott, ha az előtörténet minden részletét megfelelően figyelembe vesszük.

Néhány alkalmazási példa

Kemény mágnesek

Az elektromos motorokban általában állandó mágnesek és szabályozott áramú elektromágnesek vonzó és taszító mechanikai kölcsönhatásának célszerű váltakoztatásával érik el a forgó mozgást. Itt az állandó mágnesnek minél erősebbnek (nagy M_s és nagy M_r) és minél stabilabbnak (nagy H_c), tehát a hiszterézishuroknak minél nagyobb területűnek kell lennie. A 3. ábrán a kemény mágnesek minőségének másfél évszázados javítási eredményeit ábrázoltuk. Manapság a legnagyobb energiatartalmú állandó mágnesek ritka-földfém-vas ötvözetek (pl. NdFeB).

3. ábra. Az állandó mágnesek vagy kemény mágnesek tulajdonságainak fejlődése



Digitális memóriák

A számítógépi háttérmemóriák ellentétes irányban mágnesezett kisterületű tartományokban (mágneses doménekben) tárolják a 0 és 1 bitekből álló információt. Itt a mágneses anyag kiválasztásánál a hiszterézishurkot négyzet alakúra célszerű választani, ami nulla térben a beírt információ határozott megtartását, és a koercitív erő értékénél a mágnesezettség határozott átfordulását biztosítja.

Analóg memóriák

A szórakoztatóiparban használt mágneses adathordozó audio- és videoszalagokon a beírt jelekkel arányos, stabilan megmaradó, jól kiolvasható mágneses állapotokat kell előállítanunk. A hiszterézishurok lineáris felmenő ágán a mágnesezettség a bemenő jellel arányos lesz a szalag beíró feje körüli kis tartományban. A továbbfutó szalagon nulla mágneses térben megmaradó mágnesezettség hordozza a később kiolvasható audio- vagy videojelet.

Transzformátor vasmagok

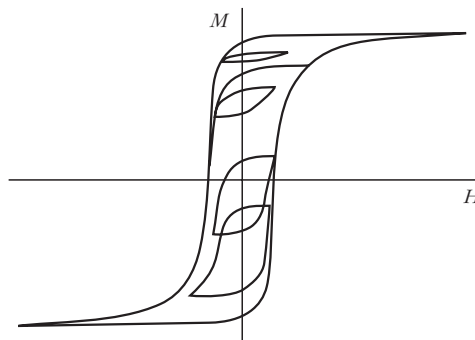
Az elektromos hálózati energiát nagy távolságokra célszerű nagy feszültséggel és kis árammal szállítani, viszont a háztartásokban érdemes alacsonyabb feszültségen nagyobb árammal működő, kevésbé veszélyes berendezéseket használni. A magyar mérnökök (*Déry-Bláthy-Zipernovszky*) által kifejlesztett váltóáramú transzformátorral szokás a feszültséget transzformálni a villamosenergia-ellátó hálózatokban, valamint a mindennap használt számítógépeink alacsony feszültségű egyenáramú tápegységeiben is. A transzformátorok primer és szekundér tekercsei egy mágnesre (vasmagra) vannak tekercselve és másodpercenként 50-szer váltakozik bennük az áram iránya és nagysága. Nyilvánvaló, hogy a vasmag átmágnesezése a hiszterézishurok területével arányos energia-veszteséget okoz (vasveszteség). Célszerű tehát, ha a vasmag úgynevezett lágy mágneses anyagból készül, amelyben a telítési mágnesezettség ugyan elég nagy, de a koercitív erő, ezzel a hiszterézishurok területe a lehető legkisebb.

A Rayleigh-Preisach-modell

A mágnesezési folyamat hiszterézisgörbéjéről tehát megállapítottuk, hogy elágazó, többértékű függvény, amelynek menete ugyan nem-megfordíthatóan függ a változás irányától, de mégis egyértelműen meghatározott függvény, ha az előtörténet minden részletét megfelelően figyelembe vesszük.

Hogyan lehet egy ilyen többértékű, előtörténettől függő, mégis determinisztikus függvényt leírni?

A függvénygörbék a fordulópontoknál ágaznak el egymástól, ahol a paraméterek változásának iránya ellenkezőre fordul. Tapasztalat szerint a mágnesezettség értékének változási sebessége (a differenciális szuszceptibilitás) a külső tér függvényében fokozatosan növekszik az egyik irányban haladva, majd a ha-

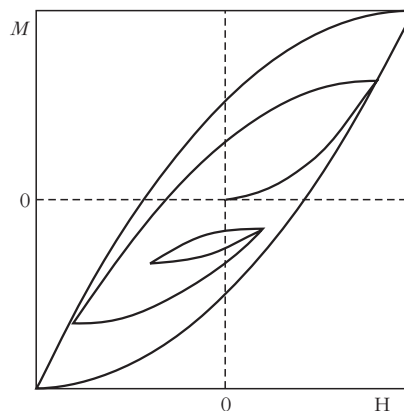


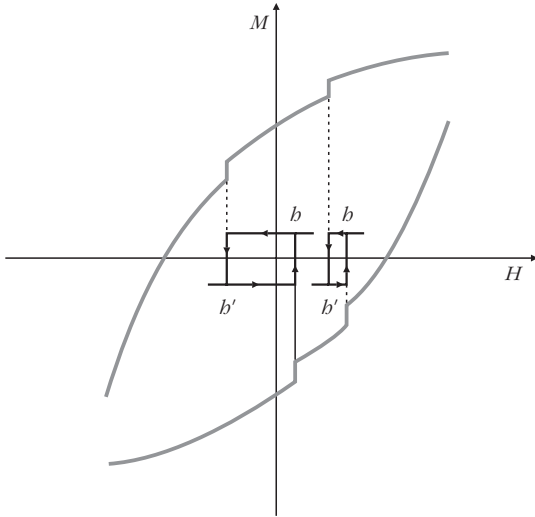
4. ábra. Hiszterézis alhurkok a főhurok belsejében

ladási irány megváltoztatásával alacsonyabb értékre csökken mindegyik fordulópontnál. Így érthető, hogy az állapotfüggvény visszafelé nem követheti ugyanazt a pályát: elágazás következik. Ilyen módon a főhurok belsejében – a paraméterek ciklikus változtatásával – az előtörténettől is függő, kisebb zárt hurkok, úgynevezett alhurkok jönnek létre. Ez a változási iránytól függő elágazási tulajdonság sok más átalakulási folyamathoz is jellemző sajátossága, például elsődrendű fázisátalakulásokban az extenzív paraméterek hőmérséklettől való függésének, piezoelektromos anyagokban a deformáció elektromos feszültségtől való függésének, ferroelektromos anyagokban a polarizáció elektromos tértől való függésének stb. Az átmeneti tartomány határain kívül a többértékű függvényhurok záródik, a folyamat reverzibilis, a mágnesezettség az átmeneti szakasz mindkét oldalán egyértékű függvénye a mágneses térnek.

A mágneses hiszterézishurkok részleteinek kiszámítására *Preisach Ferenc*, akkor Németországban dolgozó [3] magyar mérnök javasolt 1935-ben számítási módszert [4]. Felismerésének előzménye *Lord Rayleigh* négyzetes törvénye [5], amely szerint a H - M sík origója közelében elegendően kicsiny H és M értékeknél a mágnesezettség a külső térrel parabolaszakaszok mentén változik és irányváltásokkal váltakozó előjelű parabolaszakaszok egymáshoz illesztésével kapott többértékű függvénygörbe írja le a mágnesezési folyamatot. Könnyen belátható, hogy a 4. ábrán látható mért hiszterézishurkok topológiai szerkezete hasonlít a parabolikus Rayleigh-törvény szerinti 5. ábra szerkezetéhez.

5. ábra. Rayleigh-hurkok az origó közelében





6. ábra. Elemi hiszteronok mágnesezettségének apró ugrásai (Barkhausen-zaj) alakítják a mágnesezési görbét.

A parabolaszakaszokat felfoghatjuk úgy, mint egy $P(b, b') = 1$ állandó kettős integrálját.

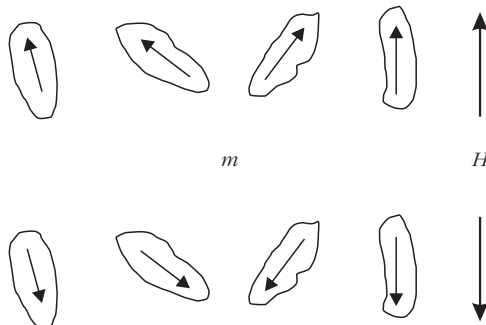
$$M(H) - M(H_0) = \int_{H_0}^H P(b, b') db \int_{H_0}^b db' = \int_{H_0}^H db (b - H_0) = \left[\frac{b^2}{2} - b H_0 \right]_{H_0}^H = \frac{H^2}{2} - \frac{H_0^2}{2} - H H_0 + H_0^2 = \frac{(H - H_0)^2}{2}.$$

A H_0 fordulópontból indulva tehát H növekedésével $M(H)$ négyzetesen növekszik. Csakhogy a parabola nem tud telítődni, mint a valóságosan mért mágnesezési görbék.

A hagyományos Preisach-modell elemi hiszteronjai

Preisach Ferenc azt ismerte fel, hogy ha lenne egy kétváltozós $P(b, b')$ eloszlásfüggvény, amely a két független változó megfelelően nagy értékeinél nullává válna, akkor az integrál nem növekedne tovább és a telítés állandó értékén megállapodna. Már csak az a kérdés, hogy Preisach-féle $P(b, b')$ minek lehetne a statisztikus eloszlásfüggvénye.

7. ábra. Egy-doménés anizotróp elemi szemcsék mágnesezettsége ugrásszerűen vált előjelet.



Joggal feltételezhető, hogy a tömbi mágnesezés során a mágnesezettség változása kisméretű mágnesezési elemek átmágneseződésével történik. Erre utal az úgynevezett Barkhausen-effektus, amely a mágnesezési folyamat akusztikus megjelenítésével kísérleti úton azt bizonyítja, hogy a hiszterézis függvénygörbéje a mágnesezettség ugrásszerű apró változásából adódik össze (6. ábra). Tételezzük fel tehát, hogy a mágnesezési elemi mágnesezési egységek léteznek, nevezzük őket hiszteronoknak, amelyeket két, mágnesezési tér dimenziójú mennyiség, a b felugrási és a b' leugrási tér jellemez. A mágnesezés során növekedő külső térben $H = b$ tértől a hiszteron egy növekedést okozó elemi ugrást, csökkenő külső térben pedig $H = b'$ tértől egy csökkentő elemi ugrást okoz a mágnesezettség értékében. Nyilvánvaló, hogy ferromágneses anyagokban a felugrás tere mindig nagyobb, mint a leugrásé: $b \geq b'$.

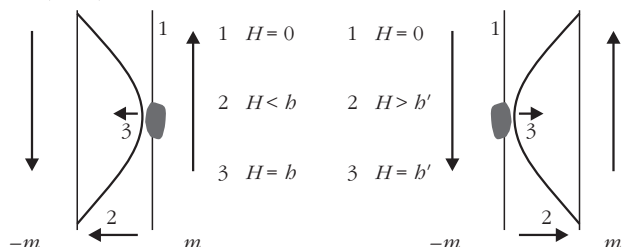
Az elemi mágnesezési hiszteron sokféle mechanizmus működésének eredménye lehet, két jellegzetes példa egyszerűen elképzelhető.

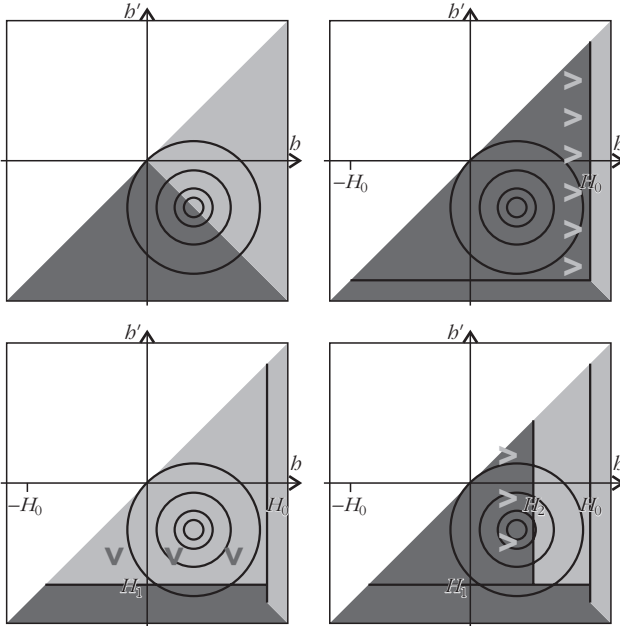
Az egyikek egy szemcsés anyag tű-alakú homogén mágnesezettségű úgynevezett egydoménés szemcséje, amelyből a 7. ábra több különböző orientációjú, ennek megfelelően különböző (b, b') paraméterpárral jellemezhető elemet ábrázol. E szemcsék alak-anizotrópiája kétféle mágnesezési állapotot és köztük ugrásszerű átmágnesezést enged meg. Ha a mágnesezési anyag ilyen szemcsék sokaságából áll, akkor az egyes szemcsék alakja, nagysága és kölcsönös egymásra hatása eredményeként az átmágnesezéshez szükséges felugrási és leugrási terkek értékei szerint egy $P(b, b')$ statisztikus eloszlási függvénnyel jellemezhetjük a sokaságot, ahol a kétváltozós függvény értéke az olyan egymáshoz hasonló szemcsék gyakoriságát, statisztikus súlyát adja meg, amelyeknek egyaránt b a felugrási és b' a leugrási terkek.

A hiszteron működésének egy másik lehetséges példája egy homogén mágnesezési anyagban a doménfal mozgásával történő átmágnesezés akadályozottsága egy szennyező zárvány által, amint a 8. ábra bal és jobb oldala vázlatosan bemutatja.

A mágnesezési növelésével a zárványon megtapadt mágnesezési doménfal a pozitív mágnesezettségű térfogat növelése végett balra szeretne elmozdulni. A letapadás miatt azonban egy pontja a zárványon rögzítve marad egészen addig, amíg a külső tér el nem

8. ábra. Balra: növekedő külső térrel a doménfal elhajolva, balra ugrással válik el a zárványtól. Jobbra: csökkenő térrel a doménfal elhajolva jobbra pattan el a zárványtól.





9. ábra. A pozitív mágnesezettségnek megfelelő (sötét) integrálási terület a mágneses tér növekedésével a b -tengely mentén függőleges határral növekszik, a mágneses tér csökkenésével a b' -tengely mentén vízszintes határral csökken.

éri a b felugrási teret, amikor a meghajlott doménfal kiegyenesedése ugrásszerű mágnesezettségnövekedéssel jár.

A mágneses tér csökkentésével viszont a negatív mágnesezettségű térfogatnak kellene növekednie, a doménfal jobbra igyekszik elmozdulni. A zárvány visszatartó hatása miatt a letapadt doménfal most ellenkező görbülettel hajlik meg és csak akkor tud ugrásszerűen kiegyenesedni, ha a külső tér kisebb lesz, mint a b' leugrási tér. Ugyanazon zárvány esetében sem szükségszerű, hogy a felugrási és a leugrási tér nagysága azonos legyen, a letapadó doménfal is alkalmas modell a $P(b, b')$ kétváltozós eloszlási függvénnyel jellemzett, általános tulajdonságú hiszteron példájának bemutatására.

A hagyományos Preisach-modell számítási eljárása

Nyilvánvaló, hogy a felugrási térnek van egy maximuma, amely fölött a $P(b, b')$ kétváltozós eloszlási függvény nulla kell legyen, ugyanis a hiszterézis főhurok záródásáig, a mágnesezési görbe reverzibilis szakaszának kezdetéig mágnesezett anyagban a tovább növelt külső tér már nem tud további ugrásszerű át-mágnesezést okozni. A főhurok az $M(H)$ sík origójára nézve középpontosan szimmetrikus, ezért ugyanígy a leugrási térnek viszont van egy minimuma, amely alatt nincs ugrásszerű további csökkenés a mágnesezettségben.

A $P(b, b')$ Preisach-féle eloszlásfüggvénnyel a felszálló hurokágban a következő képlettel tudjuk kifejezni a mágnesezettség függését az alkalmazott külső mágneses tértől [6]:

$$\begin{aligned} M(H_i) &= M(H_{i-1}) + \int_{H_{i-1}}^{H_i} db \int_{H_{i-1}}^b db' P(b, b') = \\ &= M(H_{i-1}) + E(H_{i-1}, H_i). \end{aligned}$$

A kétváltozós integrált szakirodalmi hagyomány szerint Everett-integrálnak is nevezzük [7].

A 9. ábrán egy példával illusztráljuk a Preisach-modell alkalmazási módját. A nulla mágnesezettségű alapállapotból indulunk, majd a pozitív telítés felé H_0 -ig növeljük, azután H_1 -ig csökkentjük, végül H_2 -ig ismét növeljük a mágneses teret, és közben a koncentrikus körökkel jelzett $P(b, b')$ eloszlási függvényt az ábra szerinti területeken integráljuk:

$$\begin{aligned} M(H_2) &= \frac{1}{2} \int_{-H_0}^{H_0} db \int_{-H_0}^b db' P(b, b') - \\ &- \int_{H_0}^{H_1} db' \int_{H_0}^b db P(b, b') + \int_{H_1}^{H_2} db \int_{H_1}^b db' P(b, b'). \end{aligned}$$

A leszálló hurokág mágnesezettségének negatív változása abszolút értékben azonos a vele szimmetrikus pozitív ág változásával. Ezt a számításoknál ki is használjuk, miközben ez a szimmetria az Everett-integrálok egyenletének formális átalakításával egy függvényegyenletet szolgáltat $P(b, b')$ függvényalakjára nézve:

$$\begin{aligned} \int_{H_{i+1}}^{H_i} db' \int_{H_{i+1}}^b db P(b, b') &= \int_{-H_{i+1}}^{-H_i} db \int_{-H_{i+1}}^b db' P(-b', b), \\ P(b, b') &= P(-b', b). \end{aligned}$$

A kapott függvényegyenlet alkalmas arra, hogy a kétváltozós eloszlásfüggvény megfelelő feltételek mellett egyváltozós függvények szorzataként jelenjen meg a változók szeparálásával vagy a definíciók megváltoztatásával. Kétféle forma is kielégíti a függvényegyenletet:

$$\begin{aligned} P(b, b') &= \varphi(b) \varphi(-b') \quad \text{vagy} \\ P(b, b') &= \psi(b - b') \chi(|b + b'|). \end{aligned}$$

Természetesen létezhet bonyolultabb függvényforma is, amely kielégíti a kapott függvényegyenletet. Ha ismernénk az eloszlásfüggvényt, az Everett-integrálok sorozatának kiszámításával – elvben – bármilyen bonyolult mágneses tér változási függvényhez elő tudnánk állítani a mágnesezettség függvényét.

A mért mágnesezési hiszterézis főhurokból az eloszlásfüggvény előállításához direkt számítógépi algoritmussal vagy szimulációs modell paramétereinek illesztésével juthatunk.

A hagyományos Preisach-modell az esetek többségében nem tud elég jól illeszkedni a mérési adatokhoz, különösen a főhurok belsejében mért értékekhez. Az egyik szembevetendő fogyatéka az úgyne-

vezett egybevágósági tulajdonság, amely szerint két alhurok mindig egybevágó, ha ugyanazon mágneses tér értékhatárok közt vesszük fel. A mérések szerint azonban az ilyen alhurkok annál „soványabbak”, minél nagyobb az átlagos mágnesezettségük, vagyis alakjuk függ a mágnesezési folyamat korábbi lépéseitől. Másrészt a modell szerint a mágneses tér változásának fordulópontjaiban a görbék mindig vízszintesen indulnak, a fordulóponti meredekség mindig nulla, és a mérési adatok ezt sem igazolják. Ezeknek a tulajdonságoknak az oka az, hogy az Everett-integrálok kiszámítása során minden mennyiség csak a mágneses tértől függ. Ez nyilvánvalóan kitűnik az integrálok differenciálhányadosának alakjából:

$$\frac{dM_n}{dH_n} = \int_{H_{n-1}}^{H_n} db' P(H_n, b').$$

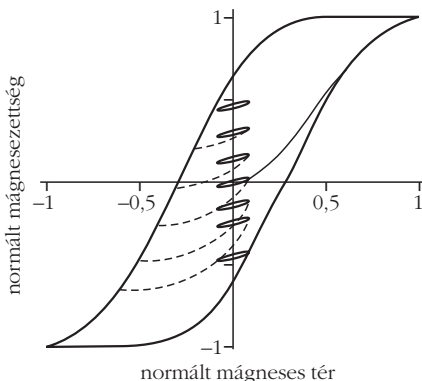
A differenciális szuszeptibilitásnak ez a formája nem hozza magával a korábbi előélet „terhét”, és adott Preisach-függvény mellett csak a legutóbbi fordulópont és a végpont mágneses tér értékétől függ. Ez biztosítja az említett egybevágósági tulajdonságot és azt is, hogy a fordulópontokban a mágnesezettség görbéje mindig vízszintesen indul és elég nagy tereknél, amikor a Preisach-függvény nullává válik, vízszintesen folytatódik. A 10. ábrán a hagyományos Preisach-modell szerint számított mágnesezési görbék, a főhurok és az egybevágó alhurkok láthatók a Preisach-függvény $P(b, b') = \varphi(b) \varphi(-b')$ egyszerű bilineáris alakjának feltételezésével.

A Szorzat Preisach Modell

A mérési adatokkal nem igazolható említett tulajdonságok megváltoztatása céljából javasoltuk a Preisach-modell differenciális szuszeptibilitásának módosítását [8, 9]. A mágnesezettséget a telítési értékkel normálva ($m = M/M_s$), a szuszeptibilitás új formája:

$$\frac{dm(b)}{db} = R(m) \left[\beta + \varphi(b) \int_{b_0}^b db' \varphi(-b') \right].$$

10. ábra. Egybevágó alhurkok a hagyományos Preisach-modell számítási módszere szerint



Az $R(m)$ határoló függvény a mágnesezettség nulla értékénél maximális és a telítéshez közeledve nullára csökken, ezzel biztosítva az alhurkok mérési adatokkal igazolt „soványodását”, általánosan a mágnesezési folyamat függését a mágnesezettségtől. A zárójelen belül már csak a mágneses tértől függő kifejezések vannak, az irreverzibilis járulékokat kifejező integrál mellett a legfeljebb a tértől függő β -val kifejezett reverzibilis mágnesezési folyamat része lehet a módosított „Szorzat Preisach Modell”-nek.

A szorzat alakú differenciális szuszeptibilitás formálisan azt jelenti, hogy ebben az esetben a mágnesezettség a mágneses térnek közvetett függvénye:

$$m(b) = G(\mu(b)).$$

Ekkor:

$$\begin{aligned} \frac{dm(b)}{db} &= \frac{dm}{d\mu} \frac{d\mu}{db} = \frac{dG(\mu(b))}{d\mu} \frac{d\mu(b)}{db} = \\ &= R(m) \left[\beta + \varphi(b) \int_{b_0}^b db' \varphi(-b') \right]. \end{aligned}$$

A kívánt tulajdonságú határoló függvény egyik lehetséges egyszerű alakja: $R(m) = 1 - m^2$. Vizsgáljuk a differenciális szuszeptibilitás így kifejezett alakját abban az esetben, ha nincs irreverzibilis folyamat, az integrál nulla. Ekkor a

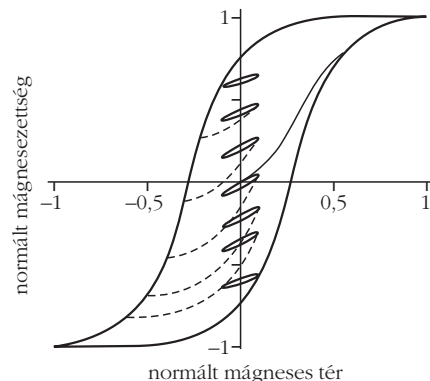
$$\frac{dm(b)}{db} = \beta (1 - m^2)$$

kifejezésből következik a mágnesezettség $m(H) = \tanh(\beta H)$ formája, és ez éppen az $s = 1/2$ spinű paramágneses közeg mágnesezettségét leíró mágnesezési görbe egyenlete. Általánosan a paramágneses mágnesezési görbéket a különböző spin-értékekhez tartozó

$$B_s \left(\frac{\mu H}{k T} \right) = B_s(\beta H)$$

Brillouin-függvények $-B_{1/2}(x) = \tanh(x)$ – írják le, és az általános $R(m)$ határoló függvény az általános Brillouin-függvény deriváltja.

11. ábra. Azonos határok között kiszámított nem egybevágó alhurkok a szorzat-modell szerint



A „Szorzat Preisach Modell”-ben tehát az irreverzibilis hiszterézist is tartalmazó mágnesezettség egy felmenő ágát leíró egyenlet alakja:

$$m(H) = B_s \left(\beta H + \int_{b_0}^H db \varphi(b) \int_{b_0}^b db' \varphi(-b') \right).$$

Több fordulóponthoz tartozó mágnesezettség program esetén – mutatis mutandis – a hagyományos modell szerint egymás után felfűzve számíthatjuk ki az egyes szakaszokra vonatkozó integrálokat. A 11. ábrán az így kiszámított mágnesezetési görbék láthatók, hasonló módon és hasonló paraméterekkel kiszámítva, mint a 10. ábra egybevágó alhurkjai. Itt azonban az azonos határok közötti alhurkok nem egybevágóak és a fordulóponthoz tartozó iránytangens nem nulla. Mind a 10. ábra, mind a 11. ábra függvényeinek kiszámítása során a

$$P(b, b') = \varphi(b) \varphi(-b')$$

alakú egyszerűsítő feltevést alkalmaztuk ahol

$$\varphi(b) = 3 \exp\left(\frac{(b - 0,2)^2}{0,3}\right)$$

Gauss-függvény alakú haranggörbe.

Összefoglalás

Javaslatot tettünk a telítéssel járó hiszterézisjelenségek könnyebb fizikai értelmezését felkínáló szorzatmodell bevezetésére a hagyományos skaláris Preisachmodell feltevéseinek módosításával. Ezzel a módosítással lépést tettünk abba az irányba, hogy az empirikus mérnöki számítási eszköz a fizikai folyamatok leírására és értelmezésére is alkalmasabb legyen.

A hagyományos, mágnesezetéstől függő differenciális szuszceptibilitást szorzat alakban állítottuk elő. A szorzat egyik tényezője explicit módon függ magától a mágnesezettségtől, ezzel a mágnesezetési görbék aszimptotikus telítési jellegét emeltük ki. A szorzat-függvény csupán mágnesezetéstől függő másik tényezője a mágnesezettség reverzibilis és irreverzibilis járulékaival, azok egymáshoz való viszonyának teljesen újszerű tárgyalását jelenti. A Szorzat Preisach Mo-

dellben a kétféle járulék nem közvetlenül adódik össze egymástól független additív tagok formájában, hanem a külső tér aktuális értékétől függő reverzibilis járulék és a teljes mágnesezetéssel előtörténettől függő irreverzibilis járulék a telítési nonlinearitást kifejező függvény argumentumában egymástól kölcsönösen is függő arányban járulnak hozzá a mágnesezettség aktuális értékéhez.

Az elemi mágnesezetési egységek négyszög alakú hiszteronjainak (a hagyományos modellben posztulált) kétváltozós eloszlási függvényét az egyváltozós koerzitív függvényvel képeztük

$$P(b, b') = \varphi(b) \varphi(-b')$$

bilineáris szorzat alakjában állítottuk elő. A négyszögös elemi hiszterézishurok két ugróponthoz ezzel természetes jelentést nyer, két különálló, egyenértékű, azonos függvényformával leírt (a külső tér irányába forduló) irányváltás együttes eredője. Ezzel a tényezőkre bontással az alkalmazott külső mágnesezetés hatására végbemenő mágnesezetési folyamatban a rendszer makroszkopikus mágnesezettségi állapotának hatását elkülönítettük az elemi mágnesezetési egységek valószínűségi jellegű, egyedi irányváltásainak hatásától, amelyek mélyebb mikroszkópi szinten zajlanak le. Az irányváltások valószínűségét leíró, mérési adatokból kiszámítható $\varphi(b)$ koerzitív függvény ilyen módon a vizsgált minta anyagtudományi jellemzője lehet, amelynek az egyéb anyagi tulajdonságokhoz és paraméterekhez (szerkezeti jellemzők globális és mikroszkópi szinten, az elemi egységek – szemcsék, domének stb. – méretei, mechanikai, elektromos és mágnesezetési paraméterei stb.) való viszonyát vizsgálva új ismeretekre, új összefüggésekre felismerésre nyílik lehetőség.

Irodalom

1. A. Aharoni: *Introduction to the Theory of Ferromagnetism*. Oxford Science Publications, Oxford, 2000.
2. Simonyi Károly: *Elektronfizika*. Tankönyvkiadó, Budapest, 1987.
3. Zs. Szabó, Gy. Kádár: Ferenc Preisach, the forgotten „Martian”, in *Preisach Memorial Book*. Akadémiai Kiadó Budapest, 2005. pp. 1–4.
4. F. Preisach, *Zeitschrift für Physik* 94 (1935) 277.
5. Lord Rayleigh, *Phil. Mag.* 23 (1887) 225.
6. G. Biorci, D. Pescetti, *Il Nuovo Cimento* VII (1958) 829.
7. D. H. Everett, *Trans. Faraday Soc.* 51 (1953) 1551. és az ottani hivatkozások.
8. G. Kádár, *J. Appl. Phys.* 61 (1987) 4013.
9. G. Kádár, *Physica Scripta* T25 (1989) 161.

FÁJDALOMCSILLAPÍTÁS MÁGNESES TÉRREL

László János
MTA, Matematikai
Tudományok Osztálya

Tisztában vagyok vele, milyen veszélyes feladatra vállalkoztam, amikor ezt a cikket megírtam. A mágnesezetés tér fájdalomcsillapító hatása ugyanis olyan téma, mint a napi politika. Ha kiforrott véleménye talán nincs is róla az embernek, de előítélete vele kapcsolatban biztosan van mindenkinek. Kevesen tudják

azonban, hogy az elmúlt 30 évben, a nukleáris mágnesezetés rezonancia (NMR) módszernek az orvosi diagnosztikában történt meghonosodása és elterjedése óta jelentős tudományos erőfeszítések foglalkoznak ezzel a területtel is. Hiszen nagyon is fontosá vált belátni, hogy a sztatikus mágnesezetés terének nincsen a diagnózis

módszerével korreláló hatása. Ezért talán érdemes lesz felhívni a figyelmet a következőkben arra, hogy

- valóban létezik olyan sztatikus mágneses térkonfiguráció, amelynek szignifikáns fájdalomcsillapító hatása van, és ez a hatás

- biológiai jellegű, hiszen a szervezet (a sztatikus mágneses tér hatására) saját, belső rendszereit mozgósítja egy-egy patológikus folyamat leküzdésére.

Megalapozott remény körvonalazódik arra nézve, hogy kezünkbe kaphatunk egy olyan fájdalomcsillapító módszert, amely nem kevésbé hatékony, mint a konzervatív kezelés lehetőségei, viszont kevesebb mellékhatással járhat.

Ez a tipikusan interdiszciplináris tudományterület egyelőre a jelenségek megfigyelése és fenomenológus leírása szintjén működik.

A problémakör

A jelentős fájdalommal járó betegségek Magyarországon közel 3 millió, világviszonylatban pedig sok száz millió ember életét keserítik meg, amennyiben kihatnak a beteg életvitelére, egészségügyi kiadásaira és életminőségére is. És akkor még nem említettük a táppénzes napokon kieső munkaórák és a kifizetett biztosítási díjak által az egész társadalomra nehezedő gazdasági terheket. Kiemelten nagy létszámú betegcsoport az öregedő népesség, illetve a már mozgáskorlátozottá vált betegek köre. Az emberiség egyharmada él át élete folyamán krónikus fájdalmat, amely az esetek többségében hónapokra, évekre, néha évtizedekre is elhúzódik.

A mozgásszervi megbetegedések egyre növekvő száma például az egész világot érintő probléma. A kérdés fontosságát az is alátámasztja, hogy 2000–2010-et a WHO (World Health Organisation = Egészségügyi Világszervezet) a „csont és ízület évtizedének” nyilvánította. A mozgásszervek (inak, izmok, ízületek, csontok) betegségei legtöbbször gyulladás, kopás és sérülés kapcsán kialakuló fájdalom képében jelentkeznek. A háziorvosi rendelőkben a betegek 20–25%-a mozgásszervi eredetű panasszal jelentkezik.

A neuropátiás fájdalmak az idegek, illetve az idegeket burkoló mielin-hüvely közvetlen sérülésére vezethetők vissza. Pusztán ilyen fájdalomtól világszerte mintegy 44–98 millió ember szenved nap, mint nap. A 98 millióba beleértjük azokat is, akik – vélhetően neuropátiás eredetű – alsó háttáji fájdalommal küzdenek, mint amilyen az isiász (másnéven Hexenschuß vagy lumbágó). Ezt a fajta fájdalmat is csillapítani kell, ami a sokféle lehetőség ellenére nagy kihívás a mai orvostudomány számára.

A fájdalomcsillapításra használt gyógyszerek más-más hatékonysággal és hatásmechanizmussal működnek, közös jellemzőjük azonban, hogy a szervezetben zajló gyulladást csökkentik. Bár a szerek hatásosak, alkalmazásuk átgondolása mégis különlegesen fontos napjainkban, hiszen nemcsak a mellékhatásokra, hanem a – sokszor áttekinthetetlenül bonyolult – kölcsönhatásokra is tekintettel kell lenni.

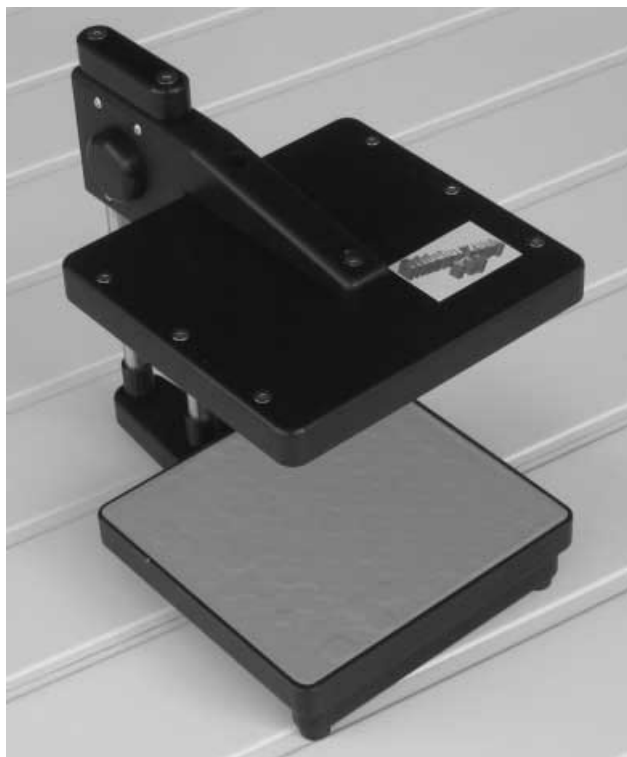
A lakosság érdeklődése eközben világszerte megnövekedett a természetes, gyógyszermentes gyógymódok, például a mágneses terápiák iránt. Hozzájárul ehhez az állami egészségügyben való csalódás, valamint a „wellness” hatásos marketingje is. A permanens mágneses terápiák nem bizonyították hatékonyságukat, noha számos gyakorlati előnyt kínálnak: az otthon végezhető, külön ráfordított időt nem igénylő (alvás közben alkalmazható), fájdalommentes, nem-invazív (műtéti beavatkozástól mentes), érintésmentes, azonnal ható és függőséget nem okozó kezelés lehetőségét. Ezek az eszközök nem igényelnek karbantartást, sem szakszerű kezelést, emberöltőnyit meghaladó a várható élettartamuk, nincs szükségük elektromosságra, nem tartalmaznak mozgó, kopó alkatrészt, és az átlagember számára is megfizethetőek. Nem utolsósorban pedig költséghatékonyak: egyetlen nap alatt 15–20 beteg is részesülhet kezelésben, következésképpen nagy mennyiségű fájdalomcsillapító, gyulladáscsökkentő gyógyszer ára is megtakarítható. Ha lenne olyan készülék, amely tudományos módszerekkel bizonyítottan fájdalomcsillapító hatású, akkor széles körben kerülne alkalmazásra minden olyan betegség esetén, amikor a hagyományos kezelés ellenjavallt.

Az előnyöket felismerve a piacon már évekkel ezelőtt megjelentek a „mindent gyógyító” állandó mágneses eszközök, a mágneses ékszer, mágneses ágy-neműk, derékpántok stb. Ezek bárminemű élettani hatása vitatható, és az ajánlásukban szereplő érvek inkább az áltudomány kategóriába sorolhatók.

Egy konkrét megoldási javaslat

Kutatásaim kezdetén tényeket akartam kapni arra nézve, hogy ezen eszközök nem kizárólag pszichoszomatikus, hanem élettani hatásúak is. Korábbi kutatásaim a termonukleáris fúziós reaktorok (stellarátor) területén itt jól alkalmazható, a sztatikus mágneses terekkel kapcsolatos háttértudást biztosítottak számomra. A tudományos irodalom tanulmányozása során körvonalazódott, hogy a téma legalább 30 éves, hiszen a kutatók azóta foglalkoznak ezzel, amióta a nukleáris mágneses rezonancia módszer bekerült az orvosi diagnosztikába. Úgy látszott az irodalomból, hogy ha van is élettani hatás, azt vagy nagyon erősen inhomogén mágneses térrel, vagy nagyon erős homogén mágneses térrel lehet elérni.

Hamarosan elkészült az első készülék (1. ábra), amely 10×10 mm-es neodímium-vas-bór N50 ($B_r = 1,47$ T) hengermágneseket tartalmazott mind a felső, mind az alsó tálcában. A négyzetárcsban szorosan egymás mellett elhelyezkedő mágnesek ellentétes polaritásúak, akárcsak a két tálcában egymás felé nézők. A tálcák között így kialakult mágneses tér erősen inhomogén: a tálcákra merőleges irányban a mágnes felületétől távolodva a középsőig a térerősség nulláig csökken, majd újra növekszik. A tálcák síkjával párhuzamosan a szomszédos csúcstól csúcsig mért mágneses indukció $783,2 \pm 0,1$ mT, két irányban szimmetrikus oldalirányú $74,2$ T/m indukciógradienssel 3 mm magasságban az alsó mágnesek



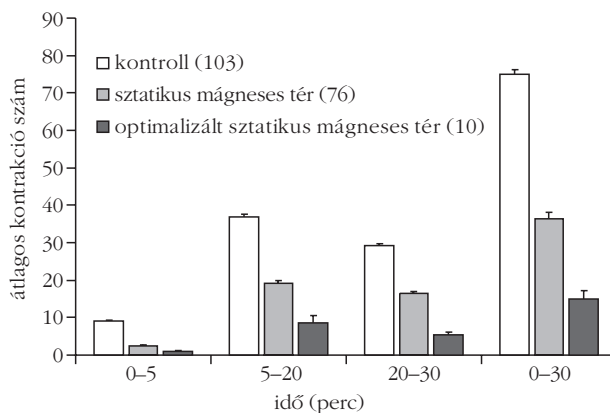
1. ábra. A sztatikus mágneses teret előállító készülék egyik első modellje. A felső tálcát egy függőleges sínen csúsztatható. A kísérlet során a két tálcák közötti mágneses térbe helyezték az egereket.

tetejétől, $108,7 \pm 0,1$ mT indukció 10,7 T/m gradienssel 10 mm távolságban, $1,5 \pm 0,1$ mT indukció 0,2 T/m gradienssel 15 mm távolságban. (A méréseket az MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézetében végeztük.) A mágneses erővonalak nagy része a szomszédos mágneseken, kis része pedig – a mágneseket tartalmazó tálcák távolságának függvényében – a szemközti mágneseken keresztül záródik. Ezt a készüléket állatkísérletben teszteltük úgy, hogy egy átlátszó műanyaglapokból készült 46 mm magas kalitkát illesztettünk a tálcák közé.

Tudományos ismeretek a sztatikus mágneses terek élettani hatásairól

A sztatikus mágneses terek hatásait áttekintő legfrissebb összefoglaló forrás az Európai Unió SCENIHR (Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks = Újonnan azonosított egészségügyi kockázatok tudományos bizottsága) bizottságának 2009. évi beszámolója [1], amely a mi közleményeinket is tartalmazza. Kissé régebbi, de szélesebbkörű áttekintést ad a WHO 2006. évi jelentése [2].

Saját első tapasztalataimat a Semmelweis Egyetem Farmakológiai és Farmakoterápiás Intézetében, a Neurológiai Klinikán, a Debreceni Egyetem Anatómiai, Szövet- és Fejlődéstani Intézetében, valamint a Pécsi Tudományegyetem Farmakológiai és Farmakoterápiás Intézetében végzett kísérletek során szereztem. Az idézett eredmények állatkísérletes modellekből származnak (amelyek esetében a placebohatás



2. ábra. A „writhing” teszt eredménye a mérési idő függvényében. Az egerek hasi összehúzódásának száma a fájdalom-szindrómára jellemző. Zárójelben az állatok számát adtuk meg. A mérés teljes 30 percére vonatkoztatva az optimalizált sztatikus mágneses tér fájdalomcsillapító hatása meghaladta a 83%-ot.

elhanyagolható), reprodukálhatónak és statisztikailag szignifikánsnak bizonyultak.

Tanulmányoztuk a sztatikus mágneses tér hatását az akut fájdalomérzetre. A kísérleti modellt „writhing” (vonaglási) tesztnek hívják. Ez a farmakológia széles körben használatos módszere a fájdalom okozta reakció mérésére. Kimutattuk, hogy a sztatikus mágneses tér szignifikánsan csökkenti egérben az ecetsav hatására kialakult hasi összehúzódások (akut zsigeri fájdalomérzékelés) számát. Optimalizálva a készülék szerkezeti paramétereit, a mágneses kezelés 83%-ban csökkentette a fájdalomérzetet (2. ábra). A mágneses térnek való kitettség (expozíció) alatt, illetve az azt követő 96 órában sem találtunk káros mellékhatást.

Az optimalizáció során több mint 20 különböző sztatikus mágneses teret hasonlítottunk össze a writhing tesztben elért eredménye alapján. Változtattuk a mágnesek számát, anyagát, alakját, mágnesszéttségét, a tálcák számát, a rácsállandót stb.

Tanulmányoztuk a sztatikus mágneses tér fájdalomcsillapító hatását kémiai anyagoknak (formalin, reziniferatoxin, carrageenan) a bőr alatti kötőszövetes térbe való juttatásakor is. Vizsgáltuk, hogy a mágneses kezelés által kiváltott fájdalomcsillapító hatásban játszanak-e bármilyen szerepet a kapszaicin- (a paprika csípősségét okozó alkaloid) érzékeny rostok. Egyszeri, 30 percig tartó sztatikus mágneses térnek való kitettség hatására a fájdalomra adott, úgynevezett nocifenzív válaszok (mint például a mancs nyalogatása és emelgetése) száma és időtartama a kiváltott reakció mindkét fázisában (0–5 percig akut, 20–45 percig gyulladáson) szignifikánsan csökkent. Von Frey-méréssel¹ becsültük a mancs

¹ Az alkalmazott von Frey-tesztben az állat egy olyan ketrecbe van zárva, amelynek lukacsos az alja. Alulról egy, a nyílások átmérőjénél kisebb átmérőjű, henger alakú, tompa végű rúddal bökdösik, felemelik az állat mancsát. Az ép állatot ez nem zavarja, a mancsát csak akkor húzza el, amikor már a mozdulat maga válik kellemetlenné. Ha azonban az állat mancsa sérült, akkor korábban elhúzza. Ezzel a módszerrel tehát a mancs érzékenységét azzal a – rúdhoz kapcsolt számítógép által mért – nyomásértékkel mérjük, ami egyben a fájdalomküszöböt jelzi.

mechanikai érzékenységének változását. A sztatikus mágneses tér szignifikánsan csökkentette a sérült mancs érzékenységét.

Ha reziniferatoxin előkezelést alkalmaztunk, majd ezután vizsgáltuk az állatok fájdalomra reagáló viselkedését formalinteszttel,² akkor azt találtuk, hogy az előkezelés szinte teljesen felfüggesztette a sztatikus mágneses tér fájdalomcsillapító hatását. Minthogy a reziniferatoxin a szervezet kapszaicin-érzékeny rostjait teszi érzéketlenné, valószínű, hogy a sztatikus mágneses tér fájdalomgátló hatásában közreműködnek a kapszaicin-érzékeny rostok.

A hatásmechanizmust tovább kutatva megvizsgáltuk, hogy melyek azok a receptorok, amelyek a fájdalom sztatikus mágneses tér okozta csökkenésében részt vehetnek. A writhing tesztben az állatokat különböző receptor-antagonistákkal³ előkezeltük, illetve olyan egereken kísérleteztünk, amelyekben bizonyos kannabinoid-(CB1)-receptorok genetikusan hiányoztak. Az élő szervezet végtagján (perifériáján) adott naloxonhoz képest a kisagyba beadott naloxon kevésbé gátolta a sztatikus mágneses tér hatását. Ebből arra következtettünk, hogy a sztatikus mágneses tér inkább a végtagokon, mint a központi idegrendszerben hat.

A sztatikus mágneses térnek való kitétség hatását olyan egereken is vizsgáltuk, amelyek ischiadicus idegét részlegesen lekötöttük, így váltva ki a neuropátiás fájdalmi állapotukat. A mancs érzékenységének mérésére itt is a von Frey-féle tesztet használtuk. Azoknak az állatoknak, amelyek az operációt követő első két hétben – a betegség kialakulásakor – részesültek napi 30 perces sztatikus mágneses térben, nem javult számottevően az állapota. Azon egerek mancsának érzékenysége, amelyek az operációt követő 15. naptól részesültek két hétig napi mágneses kezelésben, a 20–22. napra (tehát a kezelés 5–7. napján!) a kontrollal megegyező mértékűre növekedett a mechanikai érzékenység (allo-dínia) küszöbértéke. A sztatikus mágneses tér tehát vélhetően a mielin-hüvely spontán regenerációs folyamatában is szerepet játszik.

A writhing tesztben a hatás dinamikáját is figyeltük, vajon a 10, 20, 30 percig tartó expozíció lineárisan növeli-e a fájdalomcsillapító hatás időtartamát az expozíció megszűnte után. Érdekes módon nem találtunk jól magyarázható dóziszfüggést, legtovább a 10 perces kezelés után maradt meg a hatás, mintegy 30 percig szinte változatlanul (5%-ot emelkedett csak a vonaglási szám).

Egészséges egereket kiteve a mágneses térnek azt találtuk, hogy helyváltoztató aktivitásukra, félelmi reakcióikra nincsen hatással az expozíció.

Felmerült az a kérdés is, hogy vajon egy klinikai MR (mágneses rezonancia) berendezés erős, homo-

gén sztatikus mágneses térbe helyezett állatokon tapasztalható-e valamiféle viselkedésváltozás, enyhül-e a fájdalomérzet. A writhing tesztet elvégezve egy 3 T mágneses indukciójú klinikai MR-ben azt találtuk, hogy azokban a hatás 69% volt, tehát a 30 percre az MR-be helyezett egerek sokkal kevésbé reagáltak a fájdalomra, mint az MR-be nem került társaik. (Többen állítják, hogy fájdalom miatt MR-kivizsgálásra küldött betegek fájdalomérzete csökkent a vizsgálatot követően.) Megfontolásra javasoltuk, hogy a jövőben az MR-berendezések terápiás céllal is kerüljenek alkalmazásra.

Több van előttünk, mint mögöttünk

Sok mindent tudunk már a sztatikus mágneses terek hatásairól, de még sokkal többet nem tudunk. Nem ismerjük a teljes hatásspektrumot, a hatás dinamikáját, a hatásmechanizmus komplex képét, a gyógyszer-kölcsönhatásokat. Nem ismerjük, hogy pontosan milyen fehérvérjék, vagy más alapú közvetítők vesznek részt a folyamatban. Az sem világos, hogy a biológiai szerveződés milyen szintjén lehetséges egyáltalán hatást elvárni.

Ha a korábbi feltételezésünkkel ellentétben a mágneses tér mégis inkább centrálisan (a központi idegrendszerben), mint a periférián hat, akkor a mágneses térnek a teljes testet kell érnie. Állatkísérleteinkben a rágcsálóknál mindig a teljes testet tettük ki a mágneses térnek, ám ennek kivitelezése emberen csak MR-méretű berendezésben lehetséges. A magnetohidrodinamikai erők arányosak a mágneses tér indukciójának és az indukció gradienseinek szorzatával [3]. Ez magyarázatot adhat arra, hogy miért az erős homogén mágneses terek, illetve az erősen inhomogén terek esetében tapasztalunk jelentős hatást. Noha a biológiai anyagok határfelületén a mágneses szuszceptibilitások eltérőek, ezt a hatást az irodalomban elhanyagolhatónak tartják [4].

A szervezetnek a mágneses terek időbeli változására legérzékenyebb részei a perifériás idegek. Az inhomogén sztatikus térben szabadon mozgó egér időben változó (nem periodikus) mágneses fluxust érzékel. Ezért elektromotoros erő, és ennek következményeképpen elektromos áramok indukálódhatnak a testben. Az ember perifériás idegeinek stimulációjához szükséges legkisebb „gradiens kapcsolási sebesség” 40 T/s (ezt az értéket az MR gradiens terének kapcsolási sebességével szokták azonosnak venni [5], noha minden inhomogén térben történő mozgás erre vezet). Ettől a hatástól állatkísérletben általában eltekinthetünk [6]. De ha nem is tekintenénk el tőle, nehéz elképzelni, hogy indukált áramok fájdalomcsillapítást okoznának, hiszen ennek az ellenkezőjét tapasztalták az irodalomban [7]. Az MR-vizsgálatra küldött beteg azonban szintén indukcióváltozásnak van kiteve annak ellenére, hogy az MR sztatikus mágneses tere a vizsgálat helyén jó közelítéssel homogénnek tekinthető. Ennek az az oka, hogy nagyjából egy méterre be-

² A formalinteszt során az állat a bőre alá kap formalint, ami helyi gyulladást vált ki. Ennek a lefolyását, tüneteit mérik azután különböző módszerekkel (von Frey-módszerrel, a mancs emelgetés, nyalogatás gyakoriságával, ezek időtartamával).

³ A „receptor-antagonista” olyan anyag, amely egy érzékelésre specializálódott sejtet (receptort) működésében akadályoz.



3. ábra. A Lorenzini-féle ampullák kis sötét pórusoknak látszanak a cápa fején. Ezen magnetoreceptorok a geomágneses tér indukciójánál 100-szor gyengébb sztatikus mágneses tér érzékelésére is képesek.

lül a páciens egy olyan mágneses térből, amelynek csak csekély (szórt) a mágneses indukciója, egy erős (ma tipikusan 1,5–14 T indukciójú) mágneses térbe kerül. Az indukcióváltozás okozta mágneses fluxus-változás csak akkor nem fog korrelálni a diagnózis eredményével, ha a beteget lassan és az MR-berendezés alagútját felező vízszintes síkban mozgatják a vizsgálatot megelőzően. Az indukcióváltozás okozta áramsűrűség a beteg testében nem haladhatja meg ugyanis a 480 mA/m² küszöbértéket (ez az áramsűrűség szintén a perifériás idegek stimulációjához szükséges küszöbérték) [8].

Rágcsálók a 4 T fölötti mágneses térben averzív⁴ válaszokat mutatnak, és feltételes elkerülést tanúsítanak, azaz menekülni igyekeznek belőle. Egyes beszámolók szerint MR-ben a fej legkisebb mozgása is fájdalomhoz, a szem előtt táncoló csillagokhoz, szédüléshez, hányingerhez, fémes ízérzéshez vezethet. Ezek közül nem egy szindróma előfordul pusztán a szem mozgatására! Brandt ezt az idegrendszer számára egyidejűleg érkező, de egymásnak ellentmondó hatások összegződésével magyarázza [9]. Foucher és munkatársai azt találták, hogy az erős sztatikus mágneses térben (2 T) az agyi funkciók lelassulnak [10].

A mágneses terek élettani hatásait tagadni akkor sem lehetne, ha nem tudnánk, hogy bizonyos állatokban megmaradtak olyan – a törzsfajlás folyamán kialakult – receptorok, amelyek a sztatikus mágneses tér érzékelésére specializálódtak, és az állatokat a tájékozódásban (a magnetotaktikus baktériumoktól a költöző madarakon át a repülő emlősökig [11]), illetve a rejtőzködő zsákmány megtalálásában (cápafélék, 3. ábra) segítik.

Bizonyos mérésekből az derült ki, hogy 1 T indukciónál erősebb mágneses tér a szívben és a főbb vérerekben áramlási potenciálkülönbséget okoz, de ennek a fiziológiai magyarázata még bizonytalan [12].

⁴ Az „averzív válasz” állatoknál olyan reakciót jelent, amelyben az állat valamilyen fájdalmas hatást próbál elkerülni. Embernél ez bonyolultabb kérdés, mivel nemcsak valós, hanem vélt hatások elkerüléséről is szó lehet.

Sertésen végzett kísérletek viszont azt mutatták, hogy még 8 T mágneses tér sem okozott az állatokban érrendszeri elváltozást [13]. Gupta és munkatársai számítógépes modellezéssel ugyanakkor azt találták, hogy a EKG-kiértékelésen jól látható elváltozást okoz a szív T-hullámán már egy 1,5 T indukciójú külső homogén mágneses tér is [14].

Összefoglalás

Azt mondhatjuk tehát, hogy létezik olyan sztatikus mágneses térkonfiguráció, amelynek az egerekre fájdalomcsillapító hatása van. Ugyanez erősíteni képes a mielin-hüvely spontán gyógyulási (repair) folyamatát is. A hatás biológiai jellegű, mert a szervezet saját belső rendszereit mozgósítja. Néhány olyan kísérletből, amelynek nem volt pozitív hatása, úgy gondoljuk, hogy csak igen nagy (1,5 T indukció fölötti) sztatikus mágneses térnek lehet hatása a jól működő (egészséges) emberi szervezetre.

Irodalom

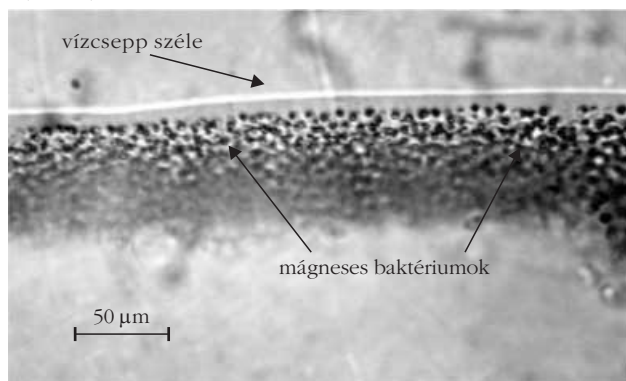
1. Health effects of exposure to EMF, lásd a http://ec.europa.eu/health/ph_risk/committees/04_scenihp/docs/scenihp_o_022.pdf címen, 2009.
2. Environmental health criteria 232: Static fields, lásd a http://www.who.int/peh-emf/publications/EHC_232_Static_Fields_full_document.pdf címen, 2006.
3. J. F. Schenck: Physical interactions of static magnetic fields with living tissues. *Progress in Biophysics and Molecular Biology* 87 (2005) 185–204.
4. C. M. Collins: Numerical field calculations considering the human subject for engineering and safety assurance in MRI. *NMR in Biomedicine* doi:10.1002/nbm.1251, 2008.
5. *Safety guidelines for conducting magnetic resonance imaging (MRI) experiments involving human subjects*. Center for Functional Magnetic Resonance Imaging, University of California, San Diego, lásd a http://fmriserver.ucsd.edu/pdf/center_safety_policies.pdf címen, 2007.
6. S. Crozier, A. Trakic, H. Wang, F. Liu: Numerical study of currents in workers induced by body-motion around high-ultrahigh field magnets. *Journal of Magnetic Resonance Imaging* 26(5) (2007) 1261–1277.
7. F. G. Shellock, J. V. Cruet: MR procedures: biologic effects, safety, and patient care. *Radiology* 232 (2004) 635–652.
8. P. Dimbylow: Quandaries in the application of the ICNIRP low frequency basic restriction on current density. *Physics in Medicine and Biology* 53 (2008) 133–145.
9. T. Brandt: *Vertigo: its multisensory syndromes*. Springer, London, New York, 2003.
10. J. R. Foucher, D. Gounot, B-T. Pham, C. Marrer, A. Dufour: “Magnetized” brains are slower – The cognitive effects of fMRI. *Nature Precedings* hdl:10101/npre.2008.2443.1.
11. R. A. Holland, J. L. Kirschvink, T. G. Doak, M. Wikelski: Bats use magnetite to detect the Earth’s magnetic field. *PLoS ONE* 3(2) (2008) e1676.
12. T. S. Tenforde: Magnetically induced electric fields and currents in the circulatory system. *Progress in Biophysics and Molecular Biology* 87 (2005) 279–288.
13. A. Kangarlu, R. E. Burgess, H. Zhu, T. Nakayama, R. L. Hamlin, A. M. Abduljalil, P. M. L. Robitaille: Cognitive, cardiac, and physiological safety studies in ultra high field magnetic resonance imaging. *Journal of Magnetic Resonance Imaging* 17 (1999) 1407–1416.
14. A. Gupta, A. R. Weeks, S. M. Richie: Simulation of elevated T-waves of an ECG inside a static magnetic field (MRI). *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 55(7) (2008) 1890–1896.

A vándormadarak, méhek, lazacok vagy angolnák bámulatos tájékozódása a Föld mágneses terében közismert. Kevesebben tudják, hogy egyes baktériumok is képesek a mágneses térhez igazodva navigálni, a számukra legkedvezőbb életteret megtalálni. *Richard Blakemore* [1] 1975-ben tavi mikroorganizmusokat vizsgált fénymikroszkóppal, és észrevette, hogy egy csapatnyi sejt a vízcseppnek mindig ugyanarra az oldalára úszott. Azt gyanította, hogy ezek fény felé úszó baktériumok, ezért elsötétítette a helyiséget. Mikor ez nem változtatott a baktériumok mozgásán, egyéb módosításokkal próbálkozott, ám hasztalan: a baktériumok továbbra is mindig a vízcsepp ugyanazon oldalára gyülekeztek. Ekkor egy furcsa ötlete támadt, és egy mágneset helyezett a csepp másik oldalára. A sejtek azonnal megfordultak, és a csepp túlsó oldalán gyűltek össze (1. ábra). E felfedezés óta beszélünk *magnetotaxis*ról, azaz a környezet mágneses terének irányához igazodó mozgásról, illetve *magnetotaktikus* (vagy egyszerűbben *mágneses*) baktériumokról.

Tájékozódás mágnesekkel

A mágneses baktériumok jellemző tulajdonsága, hogy magnetoszómákat tartalmaznak (2. ábra). A magnetoszóma egy ferrimágneses nanokristályból (amely lehet Fe_3O_4 magnetit vagy Fe_3S_4 greigit) és az ezt körülvevő biológiai membránból áll [2]. A magnetoszómák rendszerint láncba vagy láncokba rendeződnek, de akadnak szétszórt kristályokat tartalmazó sejtek is. A baktériumsejt a benne lévő mágneses kristálylánc miatt úgy viselkedik, mint egy iránytű, azaz a Föld mágneses tere az erővonalakkal párhuzamos irányba forgatja az egész sejtet. A környező mágneses tér csak a sejt passzív irányulását biztosítja, a baktérium mozgását nem. Valamennyi eddig ismert mágneses baktérium olyan sejtfüggelékkel (egy vagy több ostonnal) rendelkezik, amelyek az aktív mozgást teszik lehetővé.

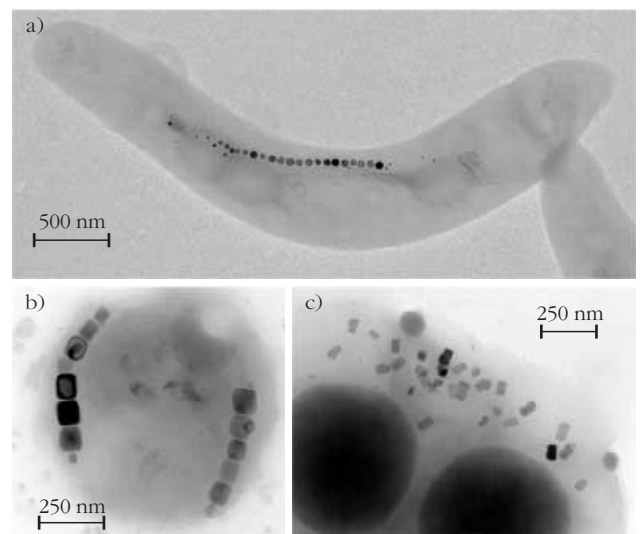
1. ábra. A Balaton iszapjából gyűjtött mágneses baktériumok fénymikroszkópos felvételén. A csepp szélén látható sötét sávot sokezer sejt alkotja, amelyeket mágnessel „kicsaltunk” a vízcsepp szélére.

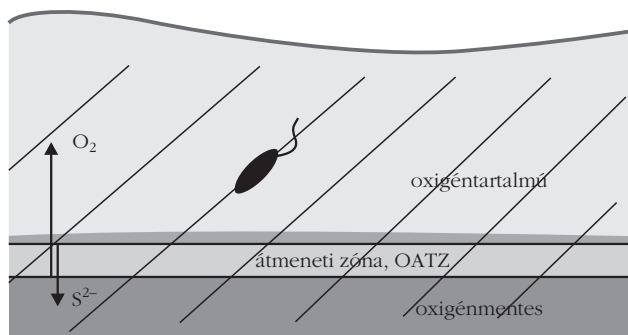


De miért jó egy baktérium számára, ha tájékozódni tud? A választ a baktériumok életterének és fiziológiájának ismeretében adhatjuk meg. A mágneses baktériumok vízi élőhelyeken, tengerekben, tavakban, mocsarakban és ezek üledékeiben élnek, olyan környezetben, ahol az oxigén koncentrációja függőlegesen változik. A mágneses baktériumok többsége számára a túl sok oxigén végzetes, de minimális koncentrációban azért igénylik az oxigént, ezért az oldott oxigént tartalmazó és oxigénmentes rétegek közötti átmeneti zónában (angolul: *oxic-anoxic transition zone* = OATZ) élnek [3]. Ez a zóna húzódhat egy vízszintes sávban a vízoszlopban (például a Fekete-tengerben ez a helyzet), vagy egy néhány milliméteres rétegre korlátozódhat az üledékben. A legtöbb édesvízi élőhelyen – mint például a Balatonban is – az OATZ a víz-üledék határfelületen vagy kevéssel ez alatt található (3. ábra). Akárcsak mi emberek, akik a földfelszíntől néhány km-es magasságig viseljük el az oxigénhiányt, a mikroaerofil baktériumok pár mm-en belül találják meg a számukra kedvező életteret. Az élőlény mérete és az élőhely vastagsága közötti szorzótényező az ember és a baktérium esetében is körülbelül ezerszeres.

A mágneses baktériumok aktív úszásának irányát meghatározza a környező mágneses tér. Ezért a baktériumok kénytelenek a geomágneses erővonalak mentén úszni, amelyek pedig az Egyenlítőtől távolodva egyre nagyobb szögben hajlanak a Föld felszínéhez képest, miáltal a baktériumok mindig „lefelé” vagy „felé felé” úsznak. Ez a viselkedés előnyt jelent az optimális oxigénkoncentráció megtalálása szempontjából, hiszen a sejt egy háromdimenziós keresési problémát egydi-

2. ábra. a) Magnetit magnetoszómákból álló egyszeres kristálylánc a *Magnetospirillum gryphiswaldense* baktérium sejtjében. b) Két, egyszeres magnetitláncot tartalmazó, balatoni mágneses baktériumsejt. c) Szétszórt magnetit-kristályok és két nagy foszfátcsomó egy balatoni mágneses baktériumsejtben.





3. ábra. A magnetitet kiválasztó mágneses baktériumok optimális élettere általában az oldott oxigén tartalmazó és az oxigénmentes zóna határán húzódó átmeneti réteg (OATZ). A ferde vonalak a Föld mágneses erővonalait jelölik.

menziósra redukál. Nagy oxigénkoncentráció mellett a magnetotaktikus baktériumok az északi félgömbön a mágneses észak felé, míg a déli félgömbön a mágneses dél felé úsznak, azaz mindkét esetben lefelé, a toxikusan nagy oxigénkoncentrációtól távolodva. Az Egyenlítő környékén, ahol a mágneses erővonalak párhuzamosak a felszínnel, közel fele-fele arányban találhatóak dél-, illetve északkereső baktérium sejtek [4].

A mágneses baktériumok vizsgálatáért nemcsak magukról a baktériumokról szerezhetünk új ismereteket, hanem az összetettebb élőlények mágneses érzékelésének lehetséges mechanizmusaira is ötleteket gyűjthetünk. A baktériumok sejtjei miniatűr laboratóriumoknak is tekinthetők, amelyekben a mágnességet a nanométeres mérettartományban vizsgálhatjuk. Ezért mind a biológia, mind az ásványtan és az anyagtudomány számára érdekes új eredményeket tartogathat a mágneses baktériumok tanulmányozása.

Nanokristályok mágnessége

A mágneses baktériumok irányulásának szükséges feltétele, hogy a bennük lévő kristályláncok állandó mágneses momentummal rendelkezzenek. A kristályok mágneses tulajdonságait több fizikai és kémiai paraméter befolyásolja, amelyek egymással versengő mágneses hatásokat eredményeznek. Ezért a baktériumok sejtjeiben lévő nanokristályok mágnességét csak úgy érthetjük meg, ha részletesen tanulmányozzuk a kristályok összetételét, szerkezetét, alakját és kristálytani irányulását.

A ferrimágneses nanokristályok mágneses tulajdonságai szempontjából a legfontosabb paraméter a kristályméret. A magnetit esetében a 120 nm-nél nagyobb, izometrikus kristályok elméleti számítások szerint mágneses két- vagy többdomének, azaz doménfallok elválasztott, eltérő irányban mágnesezett tartományokat tartalmaznak [5]. A 30–120 nm-es mérettartományban a kristályok egyetlen mágneses domént tartalmaznak. Ezen egydoménes kristályok olyan dipólusok, amelyekben a mágneses indukcióvektor iránya állandó. A 30 nm-nél kisebb kristályok szuperparamágnesesek, azaz a mágneses momentumuk irányát a hőmozgás állandóan változtatja.

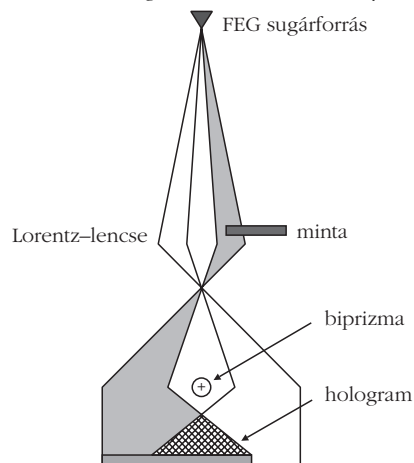
A mágnességet a ferrimágneses részecskék alakja is befolyásolja, amely hatást alak-anizotrópiának nevezük. Minél megnyúltabb egy kristály, annál valószínűbb, hogy a mágneses indukció a hossz tengelyével lesz párhuzamos. A magnetokristályos anizotrópia a kristályszerkezet mágnességre gyakorolt hatására utal: vannak a kristályban mágnesesen „lágy” és „kemény” irányok. A magnetit esetén a könnyű mágnesezhetőség iránya a kristálytani [111] irány, azaz a dipólus ebben az irányban hajlamos kialakulni. Az egyes kristályok pozíciója is hat a mágnességükre, mivel a közeli részecskék egymással mágneses kölcsönhatásba lépnek. A mágneses baktériumokban lévő nanokristályokon mindezen tényezők (kristályméret, -alak, kristálytani irányulás, az egyes részecskék elrendeződése) mágnességre gyakorolt hatása látványosan és mennyiségileg tanulmányozható elektronholográfia segítségével.

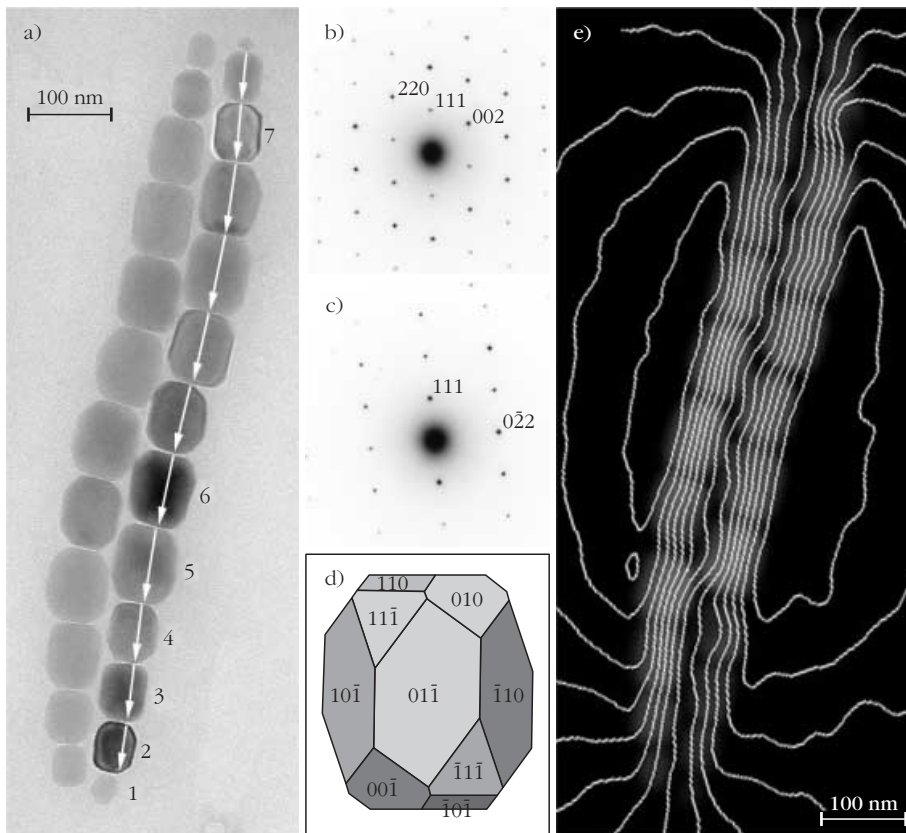
Elektronholográfia

A transzmissziós elektronmikroszkópos (TEM) elektronholográfia módszerét Gábor Dénes írta le, aki ezért Nobel-díjat is kapott. A módszert a gyakorlatban azonban csak az 1990-es évektől alkalmazzák, mióta megfelelően koherens elektron-sugárforrással felszerelt elektronmikroszkópok is rendelkezésünkre állnak.

A módszer lényege, hogy a mintán áthaladt elektronsugár fázisát is rögzítjük, nemcsak az intenzitását. A fázis mérése az anyag mágneses tulajdonságainak mennyiségi vizsgálatát teszi lehetővé. Az elektronholográfia kísérleti elrendezését a 4. ábra mutatja: nélkülözhetetlen a koherens elektronsugarat kibocsátó téremissziós katód (angolul: *field-emission gun* = FEG), a kettősprizma („biprizma”, ami egy Pt- vagy Au-bevonatú huzal, amelyre pozitív feszültség kapcsolható), és a mágneses anyagok vizsgálatához a Lorentz-lencse, amely mágneses tétől mentes leképezést tesz lehetővé. Az elektronsugárnyaláb egyik része a minta vizsgálni kívánt területén, másik része pedig vákuumon halad át. A mintában a sugár fáziseltolódást szenved a vákuu-

4. ábra. Az elektronholográfia kísérleti körülményeinek vázlata.





5. ábra. a) Kettős magnetitlánc a veszprémi Séd-patak iszapjából származó baktériumban. A számított kristályok mindegyikéről elektronelhajlási felvétel készült, ami alapján irányulásuk meghatározható. A fehér nyilak az [111] irányt jelölik az egyes kristályokban. b) A 4-es és c) a 7-es számmal jelölt kristályról készült elektronelhajlási felvétel. d) Morfológiai modell, amely nagyfelbontású elektronmikroszkópos felvételek alapján készült. e) Mágneses indukciótérkép, amely elektronhologramok alapján az a) ábrán látható kettős magnetitláncról készült. A kontúrvonalak távolsága 0,3 radián (Simpson és társai [7] nyomán).

mon áthaladt sugárhoz képest. A kettősprizma sugármenetbe iktatása révén a mikroszkóp ernyőjén a két sugárnyaláb egymással interferál. A keletkező hologram interferenciacsíkainak periodicitása a fázisra, a csíkok intenzitása az amplitúdóra vonatkozó információt hordozza. Ezen paramétereket a gyakorlatban a hologram Fourier-transzformáltjából lehet megállapítani. A Fourier-transzformált egy maximumhelyének inverz Fourier-transzformálásával kapjuk végül a fázisképet, amelyen a kontraszt a mintát elhagyó elektronsugár fázisának függvénye.

A mintában létrejövő $\phi(x)$ fáziseltolódást a közepes belső potenciál (angolul: *mean inner potential* = MIP, ami a helyi összetételtől és sűrűségtől függ), és a \mathbf{B} mágneses indukcióvektornak a minta síkjával párhuzamos, a beeső sugár irányában integrált komponense befolyásolja:

$$\phi(x) = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{E + E_0}{E(E + 2E_0)} \int V(x, z) dz - \frac{e}{\hbar} \iint B_{\perp}(x, z) dx dz,$$

ahol z a beeső elektronsugár iránya, x egy irány a minta síkjában, B_{\perp} a mágneses indukció x -re és z -re

is merőleges komponense, V a minta közepes belső potenciálja, λ az elektronsugár hullámhossza, E és E_0 pedig a beeső elektronok mozgási és nyugalmi tömege [6]. A fenti egyenlet alapján a hologramokon megfigyelhető fáziseltolódás két tagból tevődik össze: $\phi(x) = \phi_{mip} + \phi_{mag}$. A mágnesség tanulmányozásához a ϕ_{mag} , míg a mintapotenenciál, azaz a mintavastagság meghatározásához a ϕ_{mip} ismeretére van szükség. A két tag fáziseltolódásra gyakorolt hatása egy kísérleti eljárással elkülöníthető.

A különválasztott ϕ_{mag} fáziskép alapján mágneses kontúrvonalak számíthatók, amelyek vizuálisan segítik a mágneses tér nagyságának és irányának tanulmányozását (5.e ábra). A mágneses kontúrvonalas ábrák információt adnak a mágneses doménszerkezetéről, a kristályok magnetosztatikus, illetve alak-anizotrópiájáról és az egyes részecskék mágneses kölcsönhatásairól. Az elektronholográfia segítségével egyes mágneses tulajdonságok mennyiségileg jel-

lemezhetőek. A mágnesség által okozott fáziseltolódásból számítható az egyes nanokristályok és az egész baktériumsejt mágneses momentuma [6].

Baktériumok mágnességének vizsgálata

A mágneses baktériumok morfológiailag és a bennük lévő mágneses kristályok jellemzői alapján is sokféle. Például a Balatonban rendszerint 2–3-féle különböző sejtet lehet találni, ha az üledékből mágnessel dúsítjuk a mintát. Vannak baktériumtörzsek, amelyek kubookaéderes magnetit-kristályokat választanak ki, míg mások megnyúlt, hasáb morfológiájú kristályokat. A magnetoszómák elrendeződése is sokféle lehet: akadnak egyszeres, kétszeres vagy akár sokszoros kristályláncok, sőt egyes sejtípusok szórt kristályokat tartalmazhatnak (2. ábra). A veszprémi Séd-patak iszapjából olyan *coccus* morfológiájú baktériumokat gyűjtöttünk, amelyekben a sejt két szemközti oldalán egy-egy kettős magnetitlánc húzódik. Egy ilyen kettős lánc példáján mutatunk be az elektronholográfia alkalmazását.

Az 5.a ábra világos látóterű TEM-felvételén látható, hogy a magnetit nanokristályok mind hasonló méretűek és morfológiájúak, kivéve a láncvégi, kisebb kristályo-

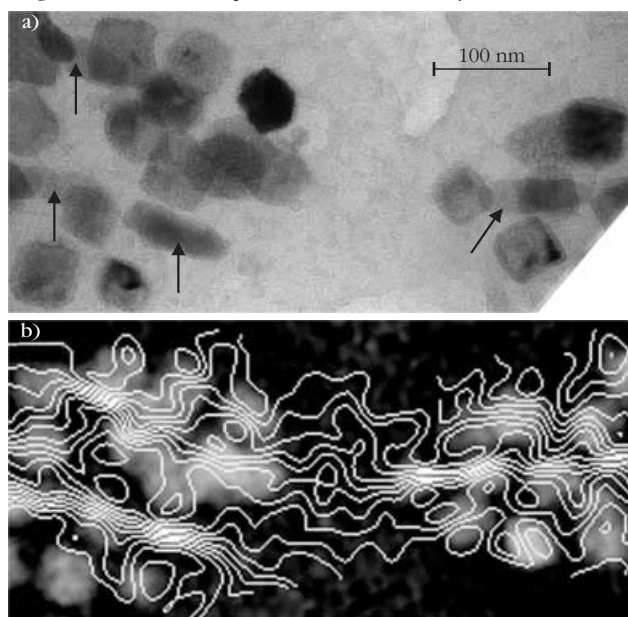
Különböző típusú mágneses baktériumsejtekben lévő kristályláncok tulajdonságai elektronholográfiás mérések alapján (Pósfai és társai [9] nyomán)

baktérium-törzs vagy morfológiai típus	magneto-szóma ásvány	átlagos kristályméret (nm)	kristályok száma a láncban	lánc hossz (μm)	mágneses momentum / lánc hossz (Am ² /μm)
MS-1	Magnetit (egyes lánc)	~45	22	1,2	4,2×10 ⁻¹⁶
MV-1	Magnetit (egyes lánc)	~60	15	1,6	4,4×10 ⁻¹⁶
vad coccus	Magnetit (kettős lánc)	~80	25	0,95	1,8×10 ⁻¹⁵
vad, pálca alakú sejt	Greigit és valószínűleg magnetit (kettős lánc)	~60	57	2,19	4,1×10 ⁻¹⁶
vad, osztódó, pálca alakú sejt	Greigit és magnetit (többszörös lánc)	~60 (greigit) ~80 (magnetit)	~155	2,94	6,1×10 ⁻¹⁶

kat, amelyek még növekednek. A kristályok 70–100 nm hosszúak, tehát méretük miatt a mágneses egydomén tartományba tartoznak. A magnetit-kristály egyensúlyi morfológiája az oktaéder. Ezzel szemben a képen látható kristályok mind kissé megnyúlt, hasáb alakot mutatnak (5.d ábra), ami rendkívül szokatlan a magnetit esetében, és csakis a kristálynövekedés pontos biológiai szabályozásának köszönhető. A számozott kristályokról orientált elektronelhajlási felvételek készültek (5.b és 5.c ábra), amelyek alapján megállapítható, hogy a kristályok [111] iránya a lánc tengelyével párhuzamos, míg az erre merőleges kristálytani irány tetszőleges. A kristálylánc gyöngyfűzérhez hasonlítható, amelyben rögzített a „zsinórral” párhuzamos irány, de ekörül tetszőlegesen elfordulhatnak a „gyöngyök”.

Az 5.e ábrán a kettős magnetitláncról készült mágneses indukciótérkép látható. A térkép több elektronhologram alapján készült. A kontúrvonalak sűrűsége a

6. ábra. a) Vas-szulfid magnetoszómákat tartalmazó osztódó sejt egy részéről készült világos látóterű TEM felvétel. A nyíllal jelölt kristályok vas-oxidok (magnetit), a többi kristály vas-szulfid (greigit). b) Ugyanerről a területről elektronhologramok alapján készült mágneses indukciótérkép (Kasama és társai [8] nyomán).



vonalakra merőleges irányú indukcióváltozással arányos, a vonalak iránya pedig megmutatja az indukció irányát. A képről leolvasható, hogy a kettős lánc egyetlen rúd-mágnesként viselkedik. Az egyes nanokristályokban a kontúrvonalak egymással párhuzamosan futnak, tehát minden egyes kristály mágneses egydomén. Valamennyi kristály egy-egy mágneses dipólus, amelyben az indukció a lánc hossz tengelyével párhuzamos. A láncvégi apró kristályok a méretüknél fogva szuperparamágnesesek lennének, azonban a térkép szerint ezek is mágnesesek, ami a többi láncbéli kristállyal való mágneses kölcsönhatás következménye.

A mágneses indukciótérkép azt bizonyítja, hogy a baktérium a lehető leghatékonyabban „gyártott” iránytűt: a mágneses egydomén mérettartományba tartozó kristályokat szintetizált, amelyek rendezett láncot alkotnak. A kristályok megnyúlási iránya párhuzamos a láncsal, tehát az alak-anizotropia is a láncsal párhuzamos dipólmomentumot növeli. A könnyű mágnesezhetőségi irány, az [111] minden kristályban párhuzamos a láncsal, azaz a magnetokristályos anizotropia hatása is hozzáadódik a dipólmomentumhoz. Végül, a kristályok közti mágneses kölcsönhatások is a „tökéletes rúd-mágnes” kialakulását segítik elő. A Séd iszapjában élő baktériumokban tehát a mágnességre ható minden fizikai tényező hatása összeadódik.

Nem minden mágneses baktérium választ ki a fentihez hasonló tökéletes iránytűt. A vas-szulfid-ásványokat (greigitet) tartalmazó, tengerben élő baktériumokra például jellemző, hogy változatos morfológiájú, némileg rendezetlenül elhelyezkedő kristályokat tartalmaznak (6. ábra). Sőt, egyes esetekben a kristályláncban mind greigit, mind magnetit előfordul. A kétféle ásvány morfológiája eltérő: a 6.a ábrán látható, hogy a nyíllal jelölt magnetit-kristályok erősen megnyúltak, míg a greigit-kristályok izometrikus alakúak. A mágneses indukciótérkép (6.b ábra) jól mutatja, hogy a rendezetlenül elhelyezkedő és tetszőleges kristálytani orientációban lévő greigit-kristályok kanyargós, rendezetlen lefutású mágneses kontúrvonalakat eredményeznek. Az erősebben mágneses és hosszúkas magnetit-kristályokban a kontúrvonalak sűrűbbek és irányuk sokkal jobban definiált (párhuzamos)

mos a lánccal), mint a greigit-kristályokban. Ebben a baktériumban tehát nem valósul meg olyan szigorú biológiai szabályozás, mint az 5. ábrán bemutatott magnetitlánccnál. Itt a vas-szulfid-kristályok tetszőleges alakja és kristálytani iránya miatt az alak- és a magnetokristályos anizotrópia hatása verseng a kristályok közötti mágneses kölcsönhatással.

Mind tenyésztett, mind vad típusú, különböző méretű és alakú magnetoszómákat tartalmazó baktériumsejtekben elektronhologramok alapján megmértük a kristályláncok mágneses momentumát. A sejtek mágneses mikroszerkezete közti jelentős különbségek ellenére (amelyeket az 5. és 6. ábra is illusztrál) az egységyi lánchosszra jutó mágneses momentum minden sejten közel azonos értéket mutatott (1. táblázat). Ez arra utal, hogy valamennyi sejt hatékonyan irányul a geomágneses térben. A Langevin-függvény alapján kiszámítható, hogy az ~50 μT erősségű geomágneses térben a vizsgált sejtek az idő ~90%-ában a mágneses erővonalakkal párhuzamosan úsznak. Azon sejtek, melyek rendezetlen irányulású kristályokból álló láncokat választanak ki (6. ábra), a kevésbé hatékony elrendezést azzal egyenlítik ki, hogy sokkal több kristályt növesztenek, mint a tökéletes iránytűt kiválasztó sejtek (5. ábra). A mágneses baktériumok tehát úgy optimalizálták a biomineralizációs folyamatot, hogy a leghatékonyabban tudjanak a geomágneses térben navigálni.

Összefoglalás

A mágneses baktériumok sejtjeiben ferrimágneses nanokristályok képződnek. Az egyes sejtek eltérő alakú, méretű és rendezettségű kristályokat választanak ki. A transzmissziós elektronmikroszkópban elektronholográfia alkalmazásával a nanokristályok mágnessége mennyiségileg vizsgálható. A különböző mágneses baktériumsejtek elektronholográfiás vizsgálata alapján megállapítható, hogy a nanokristályok fizikai tulajdonságai közül leginkább az alak-anizotrópia befolyásolja a kristályokban a mágneses indukció irányát, míg a magnetokristályos anizotrópia és a kristályok közötti

kölcsönhatás kevésbé jelentős. A baktériumokban a nanokristályok egy-egy mágneses domént tartalmaznak, és a sejtek mágneses momentuma elegendően nagy ahhoz, hogy a baktérium a geomágneses tér erővonalával párhuzamosan irányuljon. Hasonló elektronholográfiás mérések segítségével a jövőben a bonyolultabb élőlényekben (pl. madarakban vagy az emberi agyban) előforduló mágneses kristályok biológiai szerepét is jobban megérthetjük.

Köszönetnyilvánítás

Az elektronholográfiás mérések a University of Cambridge, Department of Materials Science and Metallurgy elektronmikroszkóp laboratóriumában készültek Rafal Dunin-Borkowski vezetésével, Takeshi Kasama és Ed Simpson közreműködésével.

Irodalom

1. R. P. Blakemore: Magnetotactic bacteria. *Science* 190 (1975) 377–379.
2. D. Faivre, D. Schüler: Magnetotactic bacteria and magnetosomes. *Chemical Reviews* 108 (2008) 4875–4898.
3. D. A. Bazylinski, R. B. Frankel: Magnetosome formation in prokaryotes. *Nature Reviews Microbiology* 2 (2004) 217–230.
4. R. B. Frankel, D. A. Bazylinski, M. S. Johnson, B. L. Taylor: Magneto-aerotaxis in marine coccoid bacteria. *Biophysical Journal* 73 (1997) 994–1000.
5. D. J. Dunlop, Ö. Özdemir: *Rock magnetism: Fundamentals and frontiers*. Cambridge University Press, Cambridge, 1997.
6. R. E. Dunin-Borkowski, M. R. McCartney, M. Pósfai, R. B. Frankel, D. A. Bazylinski, P. R. Buseck: Off-axis electron holography of magnetotactic bacteria: magnetic microstructure of strains MV-1 and MS-1. *European Journal of Mineralogy* 13 (2001) 671–684.
7. E. T. Simpson, T. Kasama, M. Pósfai, P. R. Buseck, R. J. Harrison, R. E. Dunin-Borkowski: Magnetic induction mapping of magnetite chains in magnetotactic bacteria at room temperature and close to the Verwey transition using electron holography. *Journal of Physics: Conference Series* 17 (2005) 108–121.
8. T. Kasama, M. Pósfai, R. K. K. Chong, A. P. R. Finlayson, P. R. Buseck, R. B. Frankel, R. E. Dunin-Borkowski: Magnetic properties, microstructure, composition and morphology of greigite nanocrystals in magnetotactic bacteria from electron holography and tomography. *American Mineralogist* 91 (2006) 1216–1229.
9. M. Pósfai, T. Kasama, R. E. Dunin-Borkowski: Characterization of bacterial magnetic nanostructures using high-resolution transmission electron microscopy and off-axis electron holography. In: D. Schüler (ed.) *Magnetoreception and Magnetosomes in Bacteria* 3 pp. 197–225., Springer, Berlin – Heidelberg – New York, 2007.

TELJESÍTMÉNYNÖVELÉS A PAKSI ATOMERŐMŰBEN

Szöke Larisza
Paksi Atomerőmű Zrt.

A 4. és az 1. atomerőművi blokkok pozitív tapasztalatai alapján a paksi atomerőmű 2008-ban is folytatta a teljesítménynövelés munkálatait. (A 4. blokk 2006 szeptemberéig, az 1. blokk 2007 júliusa óta a korábbi teljesítményének 108%-án üzemel.) A projektterv szerint a 2008. év legfontosabb feladata a 3. blokki teljesítménynöveléshez szükséges átalakítási engedélykérelem előkészítése, a 2. és a 3. blokkon egymás után végrehajtandó átalakítások, majd a 2. blokki teljes és a 3. blokki részleges felterhelési program végrehajtása volt. (1. ábra).

Teljesítménynövelés a 2. blokkon

A 2. blokk teljesítménynöveléséhez szükséges átalakítási engedélykérelem 2007. decemberi benyújtását követően 2008 első felében lezajlott a még hátramaradt technológiai átalakítások előkészítése, engedélyeztetése. (A szükséges egyedi átalakítások egy részét – stabil primerköri nyomás biztosítása, tokozott síncsere – korábban már végrehajtottuk.) Az alábbi főbb átalakítások a június–augusztusi főjavítás alatt megtörténtek:



1. ábra. A 4. blokk teljesítménye a projekt megvalósítása után.

- az új típusú, nagyobb rácsosztású üzemanyagkazettákból álló első teljes töltet berakása a reaktorba;
- a zónán belüli PDA-Verona reaktorfizikai ellenőrző rendszer rekonstrukciója;
- a reaktorvédelmi rendszer átalakítása az új paraméterekhez;
- a fő keringtető szivattyúk járókerekeinek és alkatrészeinek cseréje;
- a hidroakkumulátorok szintméréseinek átalakítása a nagyobb mennyiségnek megfelelő magasabb vízszinthez;
- a turbina nagynyomású fűvókakoszorújának cseréje, a szabályozórendszer átalakítása a nagyobb gőzmennyiséghez.

Kiemelkedő feladat volt a fő keringtető szivattyúk járókerekeinek, tengelyének és rögzítő alkatrészeinek cseréje. Mivel a primerköri forgalom a 2. blokkon volt a legalacsonyabb, azt meg kellett növelni legalább az emelt teljesítményhez tartozó biztonsági elemzésekben szereplő 40 300 m³/h értékre. A szentpétervári OKB CKBM üzem gyártotta le a nagyobb méretű, korszerű, kovácsolt-hegesztett járókerekeket és tengelyeket. Az alkatrészeket – a gyártóművi ellenőrzés után – 2007. december elején szállította le a gyár (2. ábra). A beérkezés után, 2008 első felében a szerelés be-

2. ábra. A fő keringtető szivattyú járókerekeinek ellenőrzése a gyártóműben.



gyakorlása következett inaktív körülmények között a Karbantartó Gyakorló Központban.

A fő keringtető szivattyú hat járókerekeinek cseréje a 2008. június–augusztusi nagyjavítás alatt mintegy 40 napot vett igénybe. A fő keringtető szivattyú átalakítási engedélykérelemmel együtt benyújtott mérési programjai alapján a blokk leállása előtt és visszaindulása után elvégeztük a fő keringtető szivattyúk hidraulikai méréseit. A főjavítást követően a két hónapos próbaüzem során a többszöri termohidraulikai mérésekkel meghatározták az új primerköri forgalmat és a hőhordozó felmelegedést az eredeti 100%-os szintre. A végleges értékekkel módosítottuk az érintett dokumentumokat (felterhelési program, üzemviteli utasítás, műszaki üzemeltetési szabályzat üzem mód táblázata).

A 2. blokkon a próbaüzemet követően, 2008. október 23. és november 10. között – a felterhelés biztonságos végrehajtását leíró teljesítménynövelés üzemviteli program 1. lépése alapján – az eredeti 100%-on sikerrel megtörtént a turbínaszabályozó ellenőrzése, lezajlottak a reaktorfizikai, termohidraulikai, technológiai, vegyszeti és radiokémiai, rezgésmérési paraméterek ellenőrzései, megtörtént a generátorok állapotának kimérése. Az eredményeket a szakemberek hatósági egyeztetésen november 11-én megfelelőnek minősítették, a program folytatását engedélyezték.

A 2. blokk az üzemviteli program 2. lépésében, az ütemtervnek megfelelően november 12-én érte el 104%-os teljesítményszintet. A programban az első lépéshez hasonló vizsgálatok kerültek elvégzésre. Az előírt ellenőrzések eredményeit a szakemberek a hatóság képviselőjével együtt december 1-jén megfelelőnek minősítették, és engedélyezték a program folytatását.

Ezt követően a blokk teljesítményét napi 1%-kal emeltük, minden alkalommal reaktorfizikai ellenőrzés alapján, a nukleáris hatósággal való egyeztetés után engedélyezve a folytatást. A 2. blokk 2008. december 5-én érte el a 108%-ot. Az ellenőrzéseket ezen a teljesítményszinten ismét sikeresen elvégeztük, amelyeket az érintett szervezetek december 18-án értékelték.

A 2. blokk stabilan üzemel 108% teljesítményen, a paraméterek az előzetesen számított értékeknek felelnek meg, illetve megengedett határértékekben belül vannak. A zóna valamennyi korlátozó paramétere tekintetében megfelelő tartalékokkal rendelkezik. Összegezve az eredményeket kijelenthető, hogy a blokkon a reaktorfizikai, technológiai, vegyszeti, radio-kémiai és rezgés paraméterek megfelelőek, a blokk a biztonsági előírásoknak megfelelően, a szükséges tartalékokkal, biztonságosan üzemel a növelt teljesítményen.

Részleges teljesítménynövelés a 3. blokkon

A 3. blokki teljesítménynövelés átalakítási engedélykérelmét 2008 márciusában nyújtottuk be. Az átalakítások egy részét (primerköri nyomásszabályozás átalakítása, Verona-rekonstrukció) már korábban végrehajtották, a szeptemberi főjavítás alatt történt meg:

- az új típusú, nagyobb rácsosztású üzemanyag-kazettákból álló első teljes töltet berakása a reaktorba;
- a reaktorvédelmi rendszer átalakítása az új paraméterekhez;
- a hidroakkumulátorok szintméréseinek átalakítása a nagyobb mennyiségnek megfelelő magasabb vízszinthez.

A blokk átalakításának különlegessége volt, hogy valamennyi primerköri átalakítást végrehajtották, de nem végezték el a turbina átalakításait, mert a normál főjavítási időtartam erre nem elegendő. A turbinán a nagynyomású fűvókakoszorú cseréket és a turbinaszabályozó rekonstrukcióit a 2009. évi nagyjavítás alatt hajtják végre, ezért a 108% elérése 2008-ban nem volt lehetséges.

A 3. blokkon 2008. október 11–29. között – a teljesítménynövelés üzemviteli program 1. lépése alapján – az eredeti 100%-on sikerrel lezajlottak a reaktorfizikai, termohidraulikai, technológiai, vegyszeti és radiokémiai, rezgésmérési paraméterek ellenőrzései. Az eredményeket a szakemberek hatósági egyeztetésen október 30-án megfelelőnek minősítették, a program folytatását engedélyezték.

A 3. blokk az üzemviteli program 2. lépésében, az ütemterv szerint október 31-én érte el a 104%-ot. A programban az első lépéshez hasonló vizsgálatokat végeztünk. Az előírt ellenőrzések eredményeit a szakemberek a hatóság képviselőjével együtt november 19-én megfelelőnek minősítették.

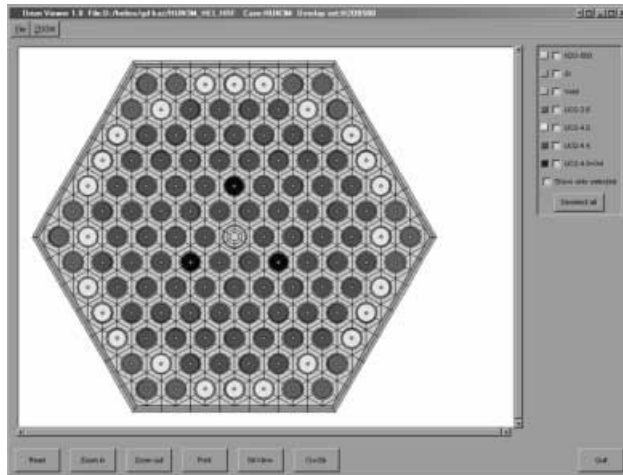
Az 1. blokk növelt teljesítményen

A Paksi Atomerőmű Zrt. az 1. blokkon 2007-ben elvégzett teljesítménynövelési átalakításokat követő sikeres ellenőrzések, próbaüzem eredményei alapján 2008. április elején az üzemeltetési engedély módosítását kérte a nukleáris hatóságtól az új, 1485 MW reaktor hőteljesítményű (500 MW villamos teljesítményű) állapotról. Az Országos Atomenergia Hivatal Nukleáris Biztonsági Igazgatósága (OAH NBI) az új üzemeltetési engedélyt az 1. blokkra 2008. szeptember 18-án megadta. A Magyar Energia Hivataltól 2008 februárjában szintén megkaptuk a működési engedélyt az emelt teljesítményre.

JÉKI LÁSZLÓ
1942–2009

2009. április 22-én, hosszú betegség után elhunyt *Jéki László*, a fizikai tudomány kandidátusa, a tudományos ismeretterjesztés kiemelkedő személyisége.

1942. augusztus 1-jén született Pécsen, abban a városban, amelynek haláláig szenvedélyes lakólat-



3. ábra. A gadolínium pálcákat tartalmazó kazetta profilírozása.

Modernizált üzemanyag

A 4. és az 1. blokk után 2008-ban a 2. és a 3. blokkba is teljes töltet került a megnövelt rácsosztású (3,82% átlagdúsítású), a teljesítménynövelést lehetővé tevő, új típusú üzemanyag-kazettákból.

Az oroszországi TVEL vállalattal az optimalizált, gazdaságosabb (4,20% átlagdúsítású, 3 db, gadolínium tartalmú, kiegészítő neutronelnyelő pálcát tartalmazó) Gd-2n típusú üzemanyag-kazetta kifejlesztésére kötött szerződés alapján az év során folyamatosan érkeztek a szükséges elemzések és megalapozó dokumentumok. A KFKI Atomenergia Kutató Intézete szintén részt vett az elemző munkában.

2008 februárjában a paksi atomerőmű elvi átalakítási és beszerzési engedélykérelmet nyújtott be az OAH NBI felé 18 darab tesztkazetta 2009. évi 4. blokk felhasználása érdekében, amelyet májusban meg is kapott. A tesztkazetták üzemeltetési engedélykérelméhez szükséges dokumentációja 2008 végére nagyrészt összeállt a 2009. év eleji benyújtáshoz. Az optimalizált, gadolíniumos üzemanyag-kazetták üzemi alkalmazását 2010-től kezdve tervezzük (3. ábra).

A Gd-2n üzemanyag-kazetták bevezetéséhez folyik a teljes léptékű szimulátor rekonstrukciója és a PDA-Verona rendszer továbbfejlesztése.

riótája maradt. Az Eötvös Loránd Tudományegyetemen szerzett fizikus diplomát 1965-ben. A Központi Fizikai Kutatóintézet Magfizikai Főosztályának Magfizika II laboratóriumába került, ahol maghasadással kapcsolatos problémákkal foglalkozott. 1975-ben



Feleségével, Évával 2005-ben a Magyar Köztársasági Érdemrend lovagkeresztje kitüntetés átvétele után.

védte meg kandidátusi értekezését.¹ 1972-ben kapott KFKI Intézeti Díja is tanúsítja, hogy kutató fizikusként is nagyszerűen megállta volna a helyét, pályája mégis másként alakult. Kitűnő szervező és kapcsolatteremtő képessége, valamint az a tulajdonsága, hogy bonyolultnak tűnő problémákat rendkívül gyorsan átlátott, és azok lényegét képes volt mindenki számára érthetően, de soha nem túlegyszerűsítve megfogalmazni, igen hamar a tudományszervezés és a kutatásirányítás területére vezérelték. 1975-ben ő lett a Részecske- és Magfizikai Kutatóintézet első tudományos igazgatóhelyettese; ezt a megbízatást 1980-ig látta el.

1972-ben kezdte el szinte ontani magából azt az évi 100–200 cikket és előadást napi- és hetilapokban, a rádió és a televízió szinte minden csatornáján, de élő előadások formájában is, amelyek nevét országszerte ismertté és elismertté tették. 1978-ban megkapta a KFKI Közművelődési Díját, 1980-ban a „Szocialista Kultúráért” kitüntetést, majd 1986-ban az Eötvös Loránd Fizikai Társulat Prométheusz-érmét is.

1980 és 1986 között a MTESZ főtitkárhelyetteseként dolgozott. Ismeretterjesztő tevékenysége alapján kapta meg 1986-ban a Munka Érdemrend ezüst fokozatát.

1986-ban ismét a KFKI-ban találjuk, az RMKI tudományos főmunkatársaként, az intézetvezetés részeseiként. Ebben az időszakban sem hagyta abba a tudományos ismeretterjesztést, és 1989-ben másodszor is megkapta a KFKI Közművelődési Díját. A kilencvenes évek elejétől 2007-ig az RMKI tudományos titkáráként dolgozott, miközben folytatta, sőt fokozta ismeretterjesztő munkáját. Megragadta az új, korszerű technikai lehetőségeket: internetes hírportálokon, elsősorban

az *[origo]*-n éppúgy megtaláljuk nevét, mint a *Min-dentudás Egyeteme* előadói között, amelynek egyik legemlékezetesebb előadását tartotta meg *Sugárözönben élünk* címmel. Számos lap, elsősorban a *Népszabadság* hasábjain publikált, miközben dolgozott a *Fizikai Szemle* és a *Magyar Tudomány* szerkesztőbizottságaiban is.

Egy évtizeden át gyűjtötte az 1991 végén megszűnt egységes KFKI történetére vonatkozó írásos és szóbeli emlékeket. Ennek alapján írta meg rendkívül alapos, tudományos igényű, 2001-ben megjelent könyvét a KFKI történetéről,² amely minden bizonnyal egyik legjelentősebb és legmaradandóbb alkotása. Egy évvel később jelent meg könyve szülőhelye, Pécs-Vasas vasbányászatának történetéről.³ 2003-ban új meglepetéssel szolgált: „konyhatudományi” (valójában tudományos ismeretterjesztő) könyvet jelentett meg a táplálkozástudomány fizikai és kémiai alapjairól,⁴ a tőle megszokott, élvezetes stílusban.

Tevékenységét a Magyar Nukleáris Társaság 1996-ban Szilárd Leó-díjjal, a Magyar Asztronautikai Társaság 1998-ban Fonó Albert-éremmel, a Magyar Újságírók Országos Szövetsége 1999-ben Hevesi Endre-díjjal, a Magyar Tudományos Akadémia 2002-ben Akadémiai Újságírói Díjjal ismerte el. 2005-ben megkapta a Magyar Köztársasági Érdemrend lovagkeresztje kitüntetését.

Kivételes műveltségű és memóriájú ember, valódi „két lábon járó lexikon” volt. Minden érdekelte, mindent el szeretett volna raktározni magában vagy különféle gyűjteményeiben, amelyeket nagy szeretettel rendezett és rendszerezett. Igényessége és alázatossága munkatársai körében közmondásos volt. Ugyanazzal a műgonddal tett rendbe, szerkesztett vagy fogalmazott át egy intézeti beszámolót vagy kutatási tervet, mint amilyenel könyveit, cikkeit írta, vagy ahogyan előadásait tartotta.

Még utolsó heteiben, a kórházban is dolgozott. 2008-ban tíz részből álló cikksorozatot írt az *[origo]*-ba az LHC-ről; ezt 2009 februárjában még egy további cikkel egészítette ki, és még ezután is jelentek meg további írásai a hírportálon. Két utolsó könyve^{5,6} már csak posztumusz jelenhetett meg.

Elhatalmasodó betegségével élni akarását és azt a képességét szegezte szembe, hogy magát és betegségét mintegy természeti jelenségként, kívülről szemlélte. Betegségéről teljes nyíltsággal, de az önsajnálattal vagy a szájalomkeltési szándék legkisebb jele nélkül beszélt. A hogylétére vonatkozó kérdésre az ismeretterjesztő munkáiból jól ismert, feszes, de a lényegre pontosan leíró választ adott, majd soha nem mulasz-

² Jéki László: *KFKI*. Arteria Studio, Budapest, 2001, 193 oldal.

³ Jéki László: *Vasasok Vasason – vasbányászat és vaskobászat a középkorban*. Arteria Studio, Budapest, 2001, 61 oldal.

⁴ Jéki László: *A gyilkos nő és a bab*. Magyar Konyha, Budapest, 2003, 105 oldal.

⁵ Jéki László: *A rózsa komplex függvényei*. Hetedhétatár, Pécs, 2009, 294 oldal.

⁶ Jéki László: *Szeressétek a spagetti!* Hetedhétatár, Pécs, 2009, 248 oldal.

¹ Jéki László: A 252-californium spontán hasadásánál keletkező neutronok energiaeloszlása. *Magyar Fizikai Folyóirat XXIV/4* (1976) 281.

totta el jellegzetes, fanyar, mégis huncut mosolyával visszakérdezi: „és uraságod hogy van?” Többé már ezt a kérdést nem teszi fel.

Nagyon hiányzik és nagyon fog hiányozni. Emlékét megőrizzük.

Nagy Dénes Lajos

Jéki László a Fizikai Szemlében

Magszerkezet vizsgálata neutronokkal 23 (1973) 62.
Heisenberg és az atombomba 45 (1995) 72.
Norvégia 200 koronás bankjegye. 46 (1996) 368.
Nagy F. András: A Berzsenyi Gimnáziumtól a Vénusz bolygóig – Michiganben. 47 (1997) 295.
Szilárd-tábla a Dupont Plazában, Washingtonban. 48 (1998) 57.
Közeledik a Cassini. 48 (1998) 395.
Kiss Dezső 70. 49 (1999) 4.
Fizika a színpadon. 49 (1999) 270.
Kiss Dezső, 1929–2001. (Szegő Károllyal) 51 (2001) 219.

Fizika a színpadon II–III–IV. 51 (2001) 250, 282, 363.
Fizika a színpadon V. 52 (2002) 62.
Megjegyzések a Teller-nekrológhoz. 53 (2003) 375.
Neumann János és a nukleáris fegyverek. 53 (2003) 423.
NASA-elismerés magyar kutatóknak. 54 (2004) 430.
Fizika és a mindennapi élet. 55 (2005) 35.
Magyar részvétel a Rosetta–Philae űrmisszióban. 55 (2005) 224.
Megállapodás az ITER felépítéséről. 55 (2005) 296.
Mindig izgatott a „miért?” kérdése – beszélgetés Pál Lénárd akadémikussal. 55 (2005) 395.
Simonyi-nap a KFKI-ban. 55 (2005) 450.

KÖNYVISMERTETÉSEI

Lanouette William: Szilárd Leó – zseni árnyékban. 48 (1998) 64
Vargha Magda (ed.): The Konkoly Observatory chronicle. 49 (1999) 461.
Almár Iván: A SETI szépsége – kutatás földön kívüli civilizációk után. 50 (2000) 36.
The future of the Universe and the future of our civilization. 50 (2000) 347.
Barlai Katalin, Bognár-Kutzián Ida (szerk.): „Unwritten messages” from the Carpathian Basin. 53 (2003) 446.

FEKETELYUK-SUGÁRZÁS

Jéki László

Milyen a fekete lyuk belseje? Valóban teljesen fekete? Mi lesz az elnyelt információval, ki tud szabadulni, és ha igen, hogyan? Valóban létezik a Hawking-sugárzás? Ezekre a kérdésekre évtizedek óta keresik a választ a fizikusok. Az utóbbi hónapokban több, egymástól alaposan eltérő választ adtak a kutatók. A problémásereg tehát továbbra is nyitott.

A fekete lyukak eredeti felfogása szerint a tér egyes tartományaiban az anyag végtelen kicsi és sűrű pontba zuhan össze. Az elmélet szerint itt olyan erős a gravitációs tér, hogy semmi, még fény sem léphet ki innen, ezért a fekete lyuk elnevezés. A fekete lyuk abszolút fekete voltát később többen kétségbe vonták. A kvantummechanika szerint a folyamatok megfordíthatók, tehát a fekete lyuknak tárolnia kell a beléje zuhant tárgyakra vonatkozó információt, és ez onnan valamilyen módon kinyerhető kell legyen.

A Hawking-sugárzás

Stephen Hawking 2004-ben ismertetett számításai szerint abszolút értelemben vett fekete lyuk nem létezik, csak olyan térrész, ahonnan nagyon hosszú idő elteltével szabadulhatnak ki dolgok. A fekete lyukba zuhanó tárgy tehát nem semmisül meg teljesen, a fekete lyuk megváltozik a tárgy elnyelése során. Nyilvánvalóan nem könnyű az információt visszanyerni, de az létezik valahol a fekete lyukban. Egyáltalán hogyan jöhet ki információ? Erre Hawking korábbi nagy felfedezése adja meg a választ: a fekete lyuk lassan elpárolog, mert részecskék lépnek ki a gravitá-

ciós szakadék széléről, ez a Hawking-sugárzás. A fekete lyuk kis maggá zsugorodik, ekkor felerősödik a sugárzás, és ez viheti magával az elveszettnek vélt információt.

A róla elnevezett sugárzás létezését 1975-ben vetette fel Hawking. A kvantumfizika szerint az üres tér, a vákuum sem üres, állandóan születnek, majd megszűnnek benne összecsatolt részecskepárok. A részecskepár egyik tagja anyag, a másik antianyag, pillanatnyi létezés után szétsugároznak, eltűnnek. Hawking szerint, ha egy ilyen részecskepár a fekete lyuk eseményhorizontja, a fekete lyuk határa közelében keletkezik, akkor előfordulhat, hogy az egyik az együttes eltűnés előtt belezuhan a fekete lyukba, a másik pedig az eseményhorizonton kívül marad. Ezt a megfigyelő úgy észleli, mintha a fekete lyuk sugározna. A fekete testbe zuhant részecske negatív energiájú, tehát a fekete test veszít a tömegéből, fokozatosan elpárolog, végül egy robbanással teljesen megszűnik. Megfigyelhető sugárzás és megszűnés csak a nagyon kis, mikro fekete lyukaknál várható. A gyenge Hawking-sugárzás nem mutatható ki közvetlenül a mikro-hullámú háttérsugárzás mellett, létezését mindeddig nem sikerült kísérletileg igazolni.

Milyen egy fekete lyuk belseje?

Szuperhúrok rezegnek benne?

A lyukba természetesen nem látunk bele, de modelszámításokat végezhetünk. *Jun Nishimura* és munkatársai a szuperhúrelméletet vetették be fekete lyukak leírására. A *Physical Review* hasábjain nemrég közölt eredményeik megerősítik Stephen Hawking elméletét a fekete lyukak sugárzásáról.

A *Fizikai Szemle* szerkesztőbizottsága egy eddig még nem publikált írásával búcsúzik volt szerkesztőtársától.

Hawking elméletének megjelenése után több fizikus feltételezte, hogy a fekete lyuknak van valamilyen belső szerkezete. Számításokkal nem tudták feltárni ezt a belső szerkezetet, mert a fekete lyuk középpontja felé olyan nagy a téridő görbülete, hogy a relativitáselmélet egyenletei már nem alkalmazhatók változatlanul a kvantumhatások fellépése miatt. A természet alapvető kölcsönhatásainak egységes leírására kidolgozott szuperhúrelmélet kínál megoldást.

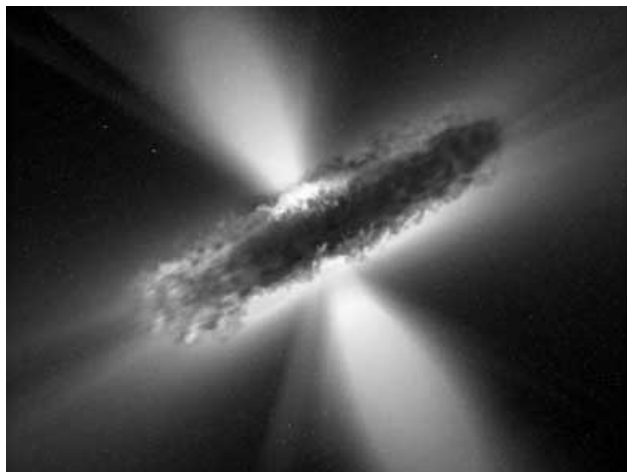
A négy alapvető kölcsönhatás közül háromnak (elektromágneses, gyenge és erős) van már egységes elmélete, ez a standard modell. Ez az elmélet sem teljes még, vannak nyitott kérdések és kísérleti igazolásra váró feltételezések. A negyedik kölcsönhatás a gravitáció, ennek a másik háromhoz való csatolását viszont nem sikerült eddig megoldani. A standard modell és az általános relativitáselmélet egyesítésére dolgozták ki a húrelmélet különböző változatait, majd a szuperhúrelméleteket. Ezekben a részecskéket húrok rezgésállapotaiként jelenítik meg, és sok, például 11 térdimenzió létevel számolnak.

Nishimura és csoportja megoldotta az egyes elemi húrok frekvenciafüggő rezgéseinek leírását. A fekete lyukat rezgő húrokkal teli térként kezelték. A szuper-számítógépen végzett modellszámítások eredménye jó egyezést mutat Hawking elméletével, az energia hőmérsékletfüggése mindkét modellben hatványfüggvénnyel írható le. A szuperhúrelmélet a jövőben fontos szerepet játszhat a fekete lyukak párolgásának vagy a korai Világegyetem állapotainak leírásában is.

A tér-idő nem folytonos?

Abhay Ashtekar és munkatársai (Pennsylvania állam egyeteme) a *Physical Review Letters* 2008. május 20-i számában közölt tanulmányukban más úton indultak el. A fekete lyuk közepén a sűrűség végtelen nagygyá válik, ezért itt a törvények matematikailag kezelhetetlenné válnak. Ez a szingularitásnak nevezett pont lehetetlenné teszi, hogy a rendszer mai állapotából visszakövetkeztessünk múltbeli történetére, a szingularitáson kívül ezt mindenütt megtehetjük a

Röntgen- és gammatartományban sugárzó fekete lyuk (forrás: ESA / V. Beckmann)



kvantummechanika szerint. A szingularitásba került információ végleg elveszik számunkra, mivel a szingularitás akkor is megmarad, ha a fekete lyuk többi része elpárologott.

Einstein általános relativitáselmélete szerint a tér-idő folytonos, Ashtekar szerint viszont nem, kisebb elemekből épül fel. „Einstein tér-ideje olyan, mint egy papírlap, de a papírlap atomokból épül fel” – fogalmazza meg elméletét szemléletesen Ashtekar. Messziről nézve a papírlap és a tér-idő folytonosnak látszik, közelről viszont kiderül, hogy egyedi egységekből áll össze. (Amikor tanulmány még meg sem jelent, csak előzetes összefoglaló ismertetéseket tettek közzé róla, a kritikusok máris feltették a kérdést: mi van a tér-időt alkotó elemek között?) A tér-idő nem folytonos voltából kiindulva kiszámították, milyen lehet a fekete lyuk középpontja. Számításait nem négy, hanem csak két dimenzióban végezték el. A szingularitás eltűnt, és helyében egy olyan tartományt mutattak a számítások, amelyben igen erősek a kvantumingadozások. A fekete lyuknak ebben a részében a tér-idő viselkedése megjósolhatatlan, az okság hagyományos elve nem érvényesül.

Ha a fekete lyuk olyan, ahogy Ashtekar leírta, akkor az információ nem veszik el, a kvantummechanika az eseményhorizonton belül is működik. Az persze egyelőre nem világos, hogy a kétdimenziós számítások mennyire érvényesek a valójában négydimenziós világban.

Kísérletek a Hawking-sugárzás földi szimulálására

Hanghullámok Bose–Einstein-kondenzátumban?

Iacopo Carusotto (Trentói egyetem, Olaszország) a fekete lyukak szimulálására a Bose–Einstein-kondenzátumot (BEC) gondolja alkalmasnak. *Bose* és *Einstein* már több évtizeddel ezelőtt megjósolta, de csak 1995-ben sikerült létrehozni ezt a különleges állapotot. A nagyon erősen lehűtött, alig mozgó atomokat mágneses csapdába ejtik, az abszolút nulla fokot a fok milliórdod részére megközelítve az anyag új halmazállapotba kerül. Az atomok egyetlen kvantumállapotba kerülnek, úgy viselkednek, mint egyetlen részecske, magasabb hőmérsékleten ez lehetetlen. Az olasz kutatók modelljükben hanghullámok terjedését számolták BEC-ben, azok csapdába estek egy eseményhorizontszerű felület mögött, majd részecskeszerűen és összecsatoltan viselkedő fononpárok (vibrációsenergiasomagok) keletkeztek, a pár egyik tagja túljutott, a másik viszont nem az eseményhorizont-jellegű felületen. A modellszámítások természetesen nem tekinthetők a Hawking-sugárzás közvetlen bizonyítékának, a jelenséget valódi BEC-ben kellene kimutatni.

Fekete helyett fehér lyuk?

A fekete lyuk egy tölcésrszerű gödör a téridőben, az eseményhorizonton túlhaladt fény vagy részecskék számára nincs visszatérés. A fehér lyuk egy hegy a téridőben, amely olyan meredek, hogy semmi sem

képes felérni a csúcásra. A fehér lyuk eseményhorizontja ott van, ameddig a csúcstól meg lehet közelíteni. A fehér lyukak nem stabilak, nem léteznek a természetben.

Az eseményhorizontot folyó-hasonlással is lehet szemléltetni. A folyóban halak úsznak felfelé, maximális sebességgel. Ahogy haladnak felfelé, a folyó egyre gyorsabban folyik szembe, egy ponton sebessége megegyezik a halakével. Ez lesz a fehér lyuk eseményhorizontja, a halak ennél a pontnál nem tudnak tovább jutni. *T. G. Philbin* és munkatársai (St. Andrews Egyetem, Skócia) mikrostrukturált optikai kábelben lézermimpulzusokkal valósították meg a fehér lyuk eseményhorizontját, eredményüket a *Science* közölte 2008 márciusában. A kábelen elindított infravörös impulzus olyan intenzív volt, hogy megváltoztatta a fény

haladási sebességét a kábelben. Az utána küldött második, kissé hosszabb hullámhosszú impulzus az elsőnél gyorsabban haladt előre, majd azt utolérve lelassult, egy ponton pontosan megegyezett a két impulzus sebessége. Ezen az eseményhorizontnak megfelelő ponton a második impulzus rövidebb hullámhosszúvá nyomódott össze és az első impulzusnál lassabban haladt tovább, vagyis nem tudott feljutni a „hegy csúcására”.

A kísérletezők következő célja a Hawking-sugárzás kimutatása. A fehér lyuk analogonnak is sugározni kell. A kábelben gyorsan változó sebességgel haladó fény részecskéket szabadít ki a vákuumból. Ezek gyenge, de a számítások szerint észlelhető ultraibolya sugárzást adnak. Ennek kimutatására, a Hawking-sugárzás észlelésére készülnek.

A FIZIKA TANÍTÁSA

KULCSOK A FIZIKÁHOZ

Az MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézete (MTA MFA) idén immár második alkalommal szervezi meg az *MFA Nyári Iskola* nevű tudományos kutatótáborát érdeklődő középiskolás fiatalok számára (Csillebérc, 2009. június 22–26., honlap: <http://alag3.mfa.kfki.hu/mfa/nyariiskola>). Célunk, hogy a gyerekek minél korábban belekóstolhassanak a fizika és más természettudományok finomságaiba, hogy még az előtt próbára tehessék tehetségüket és képességeiket, hogy átesnének a sok-sok évnyi egyetemi tanulmányukon. Hogy a nálunk szerzett élményeiket irányítóként használhassák tudásuk, ismereteik gyarapításához. Hogy a saját bőrükön érzékeljék mi mindent és miért érdemes majd alaposabban is megtanulniuk. Hogy esetleg idővel maguk is tudományos kutatói pályára lépjenek. Mert aki már tudja hová akar eljutni, annak szinte bármelyik szél jó lesz, hogy céljához közeledni tudjon.

A tavalyi iskoláról utólag elismerő visszajelzéseket kaptunk mindenkitől (diákoktól, szülőktől, tanároktól és kutatóktól), aki csak kapcsolatba került velem. De hogy hogyan jutottunk el a megszervezéséig, az legalábbis nálam elég régre nyúlik vissza. (Akit ez nem érdekel, nyugodtan ugorjon az utolsó oldalra.) Évtizedeket kell visszamennünk, amikor még más szerepben voltam. Ugyanis életkorunk előrehaladtával egy nagy permutáló hatás folyton újabb és újabb pozíciókba helyez minket, olyanokba, amelyeket kívülről, másik oldalról korábban már láttunk. Például először kisbabák vagyunk, s csak fokozatosan ismerjük meg édesanyánkat, szüleinket, nagyszüleinket, nem sokat gondolva arra, hogy egyszer még a helyükbe kerülhetünk. (Hiába is „fenyegetőznek” velem.) Később először

Daróczi Csaba Sándor
MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet

diákok, majd évek múlva esetleg tanárok leszünk. Nincs ez másként a katonaságban (közlegénytől a tábornokig), vagy a különféle hivatalok és cégek ranglétráinál sem. Velem érettségi környékén fordult elő, hogy ráeszméltem a jelenségre, íme a története:

Az érettségire az elsőik között érkeztem, de a véletlen a legutolsó helyre juttatott, így szinte egy egész nap maradt arra, hogy elüssem valahol. A bicskei gimnázium előtti szép parkban találtam magam, ahol sétálgatva, hol meg egy padon ülve leginkább a madarakat füleltem. Egyszer csak feltűnt egy talán 2–3 éves apróságokból álló csoport, vagy húsz nagyon takarosan felöltötött fiúcska és lányka. Hirtelen körülállták a padom, és kitartóan fürkészni kezdtek. Próbáltam velük beszélgetni, de még nagyon fukarul mérték a szót, főleg egy idegennel szemben, ugye. Ekkor tűnt

Ismerkedés a nagyfelbontású transzmissziós elektronmikroszkóppal.



fel nekem, hogy a kislányok derekához kis zsebken-dők voltak betűrve (a fiúknak meg a zsebükben volt), így ezzel kezdhettek valamit – gondoltam. Elővettem a sajátomat és leterítettem a padra, majd hajtogatni kezdtem, hogy abból egyszerű, de érdekes alakzatok jöjjenek ki. Bízattam őket is. Egy szempillantás alatt elfogyott minden szabad hely, az apróságok szorgalmasan hajtogatottak, csendben és nagy műgonddal ☺ Nem okozott nekik nehézséget észrevenni a szimmetriákat (döntő fontosságú a fizikában a megmaradási tételeknél és a valószínűségi viszonyok megállapításánál), vagy az egyes lépések helyes sorrendjét (ami meg az általános logikától kezdve a kvantumfizika felcserélési szabályaiig köszön vissza minduntalan). Nagyon aranyos, de a történetnek még nincs vége!

Bő egy év múlva ismét arra akadt dolgom, és immár fizikus szakos egyetemistaként újra csak a madarak dalolását terveztem figyelni. Ezúttal is feltűnt egy bölcsődés csoport – nyilván rendszeresen kijárnak, nagyon helyes. Hirtelen kivált a csoportból egy pöttöm kislány, odaszaladt hozzám, és szó nélkül elővette a zsebkendőjét, hogy a padon hajtogatni kezdje ☺ – bemutatva tudományát, amelyre még mindig emlékezett! Szeretném, de tényleg nem tudom méltóképp szavakba önteni, hogy akkor mit éreztem! De abban a percben arra a meggyőződésre jutottam, hogy nincs az a fiatal életkor, amikor az ember gondolkodását ne lehetne terelni perspektivikus problémák felé. Akár a legfiatalabbaknak is lehet tanítani a fizika (és általában a természettudomány) szempontjából fontos dolgokat, csak ki kell(ene) ötleni hozzá a megfelelő formákat.

A fizika a természettudományos törvényszerűségek közül a legáltalánosabb érvényűeket igyekszik feltárni. Szerintem tényleg azért, mert akadnak emberek, akiknek egyszerűen ilyen a mentalitásuk. Vagy ahogy egyik egyetemi professzorom (*Dede Miklós*) szokta volt mondogatni: „A fizika az, amit a fizikusok csinálnak!” A fizika lényegi tulajdonsága, hogy folyton próbára teszi elméleteinek érvényességi határait. Ennek eredményeként néha bekerülnek dolgok a fizikába (pl. atom- és molekulafizika, korábban csak a kémia vadászterülete), máskor meg egyes részeit specializálódnak (pl. statika, elektronika, híradástechnika). Törvényeinek általános természete nemcsak úgy értendő, hogy adott tartományban hézagmentesen mindenre érvényes, hanem úgy is, hogy más dimenziókban is valami hasonló igaz, *mutatis mutandis*. Például a mechanika törvényei alapján lehet *modellezni* az elektrodinamika Maxwell-egyenleteit is. (*Maxwell* is megtette, csak egy idő után elhagyta az erre való hivatkozást, mert kortársai minduntalan félreértették. *Bolyai János* hasonló módszerrel mutatta ki a hiperbolikus geometria ellentmondásmentességét, feltéve, hogy az euklideszi is az.) Idővel az elektrodinamika törvényei szolgálták mintául további fizikai elméletek kidolgozásához (pl. Schrödinger-féle hullámmechanika, vagy a gyenge kölcsönhatás elmélete stb.). Mert a fizikus a kedvenc fizikai elméletével éppen úgy van, mint a kisgyerek, aki ha talált egy kalapácsot, akkor belátható időn belül hajlamos mindent szegnek nézni: újra és újra kipróbálja, hogy ott is működik-e. Nem rombolni, ha-

nem csak megbizonyosodni akar a működéséről. (Saját bevallása szerint egyszer a gyermek *József Attila* is hasonló okból törte el a petróleumlámpa felhevült üvegét egy kis reá fröcskölt vízzel.) Néha előfordul, hogy egészen nagy kalapáccsal kell nekiesni a diónak. Mint a CERN-ben mostanság működésbe lépő 27 km-es LHC (Large Hadron Collider) gyorsító, amely a protonokat akár 7 TeV energiára (azaz nyugalmi tömegük energiájának kb. 7000-szeresére) gyorsítva ütközteti majd. De mint írtam, nem a rombolás itt a lényeg, hanem a működtetés és *valamely zárt dolog kinyitása, belső összefüggéseinek kimutatása*. Ám e kinyitásra csábító „kasszaszerű” dolgok többnyire ellenszegülnek a nyers erőnek, és inkább lehet boldogulni velük valamilyen furfangos kulccsal, amely a zárat kinyitni képes. Valójában a fizikus egyebet sem tesz, mint ilyen furfangos *kulcsokat keres és alkot*. Ehhez magától értetődően használja fel a korábban már megismert záratokat és kulcsokat, de időről időre előfordul, hogy merőben új ötletekre is rászorul. Akár az egyik *Stan és Pan* klasszikusban, amikor Stan szeretné kinyitni Pan páncélszekrényét, és kérdi tőle a zárkombinációt. A válasz: 2 fordulat balra! De Stan hiába tekergeti a gombot, mire Pan bemutatja, hogy hogyan is kell érteni a dolgot: a függőleges tengelye körül kétszer 90 fokkal elfordítja a macskót – tudniillik nincs hátulja! Nos, a fizikában elég gyakran használatos kulcs (avagy trükk) okosan megválasztani a nézőpontunkat, a megfelelő irányból közelítve a problémához. (Például nem mindegy, hogy tanulás melletti dohányzásra, vagy dohányzás melletti tanulásra próbálunk meg engedélyt szerezni... Bár a legjobb nem dohányozni.) Néha látszatra különböző dolgok lehetnek egyenértékűek (szimmetria), máskor meg egyenértékűnek tűnők valamiért mégis különbözőek (szimmetriasértés).

Az ember onnan vegye a kulcsokat, ahol csak találja! Volt például a falunkban egy kanász, aki szívesen beszélgetett bárkivel (ideje volt rá bőven). Mi, gyerekek, gyakran derültünk rajta, mert volt az öregnek egy elmélete, amit gyakorta elő is vezetett, a legkülönbélebb dolgokkal kapcsolatban: „Ez is olyan, mint a porszívó! Elöl bemegey a dolog, aztán hátul kigyőn egy másik!” Ilyen alapon nemcsak a kerti locsoló, vagy éppen a disznó működését tudta hatékonyan megmagyarázni, de még a lökhajtásos repülőét is ☺ De igazán csak akkor derültem nagyot, amikor az egyetemen a matematikai operátorokkal kapcsolatban került elő teljesen ugyanez a logika... Gyanítom, hogy a legtöbb embernek akadnak ehhez hasonló eredeti meglátásai (azaz kulcsai) az élet különféle problémáihoz. Többen közülük kutatóvá, természetudóssá is válhatnak, csak éppen valamely okból nem gyűjtik össze a kulcsoknak egy elegendően nagy és teljes rendszerét. Így az ő ötleteik igazi hasznosulása csak akkor lehetséges, ha találkoznak valaki más-sal, aki besegít. Ami amúgy a nagyok között is ismert jelenség, például *Michael Faraday* meg volt győződve arról, hogy ha ugyanaz az elektromos áram képes folyni a szakadást jelentő rész (tulajdonképpen kondenzátor) mindkét oldalán, akkor egyszerűen muszáj,

hogya a szakadás helyén is folyjék valamilyen áram, még ha ott látszólag nincs is semmi. Matematikailag ezt nem volt képes kezelni, de a gondolatán James Clerk Maxwell-lel sokat diszkutáltak, aki végül teljesen elfogadta Faraday elméletét és az úgynevezett *dielektromos eltolási áram* képében be is építette a 4. egyenletébe, amiből meg így bizonyos titokzatos elektromágneses hullámok létezésének a lehetősége fakadt. (Az eltolási áram miatt sokan bírálták Maxwellel, ámde később *Heinrich Hertz* kísérletileg is kimutatta az elektromágneses hullámokat, s ezzel elindult a rádiótechnika fejlődése.) Azóta is az van, hogy a kulcsként használható legimpozánsabb tudományos berendezéseket rendre a fizikában alkotják meg, a kolosszális rádióantennáktól az úrrakétáig. De a rejtvényfejtő jelleg a fizikán túl is jellemző a tudományra. A fizika által kitermelt kulcsokat (eszközöket és elméleteket) széles körben használják a régészettől a csillagászatig. Vegyük példaként az orvostudomány esetét! Itt a rejtvényeket leginkább az emberi szervezet adja, s a megfejtést az teszi különösen nehézé, hogy a páciensnek lehetőleg életben kell maradnia ☹, továbbá, hogy az ember minden általunk ismert dolog közül a legbonyolultabb. Ezzel együtt a fizikai ismereteinkre épített modern vizsgálati eszközök hihetetlen mértékben átalakították az orvostudomány képét az utóbbi évszázadban. (Például röntgen berendezések, különféle ultrahang-diagnosztikák, EKG, EEG, izotópos, mágneses rezonanciás és még antirészecskéket is felhasználó vizsgálatok, lásd CT, MRI, PET stb.)

Manapság a kutatók leginkább csapatokban dolgoznak. Így kisebb a valószínűsége, hogy egy-egy jó gondolat hasznosítatlanul elenyésszen. Egymás ötleteit, elméleteit szinte azonnal kölcsönvesszük és nyomban tovább is fejlesztjük – ha arra érdemesnek látszik. Nagy a becsülete az új és használható kulcsok kiötlőinek. Szinte vadászunk rájuk, és szeretnénk, ha kipakolnának! (Akár csak az egyik gengszter az 1991-es *Oscar* című paródiában „Boss” Provolone előtt...) Egy középiskolás fiatal zsebe is bőven tele lehet a tudomány számára hasznos kulcsokkal. Legtöbbjéről még a gazdája sem sejti, hogy mi mindent lehet majd velük kinyitni. Hogy mi a csuda féle problémákat lehet megoldani azzal a gondolkodásmóddal, azokkal az ötletekkel és ismeretekkel, ami neki van. Ezt már csak azért is nehéz előre elméletileg kispekulálni, mert a tudomány is folyton változik, fordul a kocka, hogy aktuálisan mire van szükség. Ezért szerintem csak azt tehetjük, hogy „élesben” teszünk próbát. Valódi, fontos és érdekes tudományos témákba kell bekapcsolni a fiatalokat, vagyis nem elég csak steril, „agyonegyszerűsített” példákra edzeni őket. (Amiként a Nobel-díjas írói vénát sem lehet felszínre hozni a mégoly rendszeres és alapos tollbamondással sem.) A másként való gondolkodás képessége a tudományban igazi érték. Természetesen nem az a cél, hogy valaki beleragadjon valamilyen monomániás örült (ámbár eredeti) gondolkodásba, de még ez sem feltétlenül kizáró ok (a civilek szemében bizonyára nem teljesen alaptalanul vált a „tudós” és az „örült tudós”,



Számítógépes optikai rendszer alakfelismerés közben.

vagy minimum „bogaras tudós” fogalma csaknem azonos jelentésűvé). A tudomány művelésének hatékonysága az időnkénti (és szerencsés) eredetiségen túl nagyrészt azon múlik, hogy mennyire tudunk elszakítani eltérő gondolkodásmódokat, észjárásokat, amelyeket szükség szerint szorgalmasan követve juthatunk el jobb és a valósággal összemérhető magyarázatokig. A kutató sokszor kerül abba a helyzetbe, hogy nem a saját személyes érzéseit vagy elvárását célszerű követnie, hanem egy másik gondolkodást, vagy elméletet. Akár ha ő maga alkotta is a másik elméletet, és az ízlését tekintve tán „nem is ért vele egyet”, mégis becsületesen ellenőrzi, mert látja, hogy így is lehet gondolkodni, és bizony nem kizárt, hogy a végén arrafelé legyen az igazság! (Picit hasonlóan ahhoz, amikor saját magunkkal sakkozunk. Nálam valahogy mindig úgy alakult, hogy ha titkon szurkoltam az egyik színnek, a végén a másik győzött ☹.) Ez egy tudathasadásos lelkiállapot, nem is mindenki számára elviselhető. De a természettudós az igazságot nem egyszerűsíti le a szimpátiája alapján, az igazság szent tehén, amelynek baja nem eshet. Előfordul, hogy egymással kibékíthetetlen ellentétben lévőnek tetsző gondolatmeneteket kell követnünk, egymást kiegészítő jelleggel. A leghíresebb példa talán a *kvantummechanika* megalkotásakor megfogalmazott *komplementaritási elv* (*Niels Bohrtól*). Eszerint bár nagyon nehéz elképzelni, hogy például a fény miként is képes egyik kísérletben részecskeként, egy másikban meg hullámként megmutatkozni, mindkét viselkedési forma valóságosan és egymást kiegészítő jelleggel igaz. Hasonló kettősség már korábban is jellemző volt a fizikára, csak nem ennyire tisztán kimondva. Hiszen a fizika művelésekor egyrészt gondolatmeneteket követünk (esetenként már-már kínos matematikai szigorral), máskor pedig sehonnan sem származtatható, másra vissza nem vezethető ötletekből indulunk ki. A szigor és a szabad ötletelés, a törvényszerű és a véletlen kombinálásáról van itt szó tulajdonképpen. Hogy mindez (és csak ez) vezethet a fizika és általában a természettudomány fejlődéséhez, azt *Charles Darwin* óta egyre világosabban érzékeljük. Ugyanis az *evolúcióelmélet* a fajok eredetén túl a legáltalánosabban képes megragadni, hogy a törvény-



Számítógépes evolúciós modell által generált különös struktúrák.

szerű és a véletlen folyamatok sajátos egysége miképpen képes egyre bonyolultabb rendszereket eredményezni. Mindezekért a tudományban megtalálhatja a helyét, aki pontosan tudja követni az esetenként bonyolult szabályokat, de az is, akinek „csak” remek ötletei vannak. Persze a legjobb, ha valaki mindkétben ügyes, vagy legalább szót tud érteni a más módon eredményes kollégáival ☺.

Most pedig lássuk a medvét! Az MTA MFA laboratóriumaiban a hozzánk érkező fiatalok egy fantasztikus játszóteret találnak! Olyat, ahol a játékok mind valóságosak, működnek, és amelyekkel mi is szenvedélyesen játszunk – munka címén ☺. Egy 1 hetes (és a jelentkezők számára ingyenes!) tudományos tábor keretében megmutatjuk, hogyan is kell hajtogatni az itteni „zsebkendőket”, hogy előálljanak a meghökkentő formációk. A saját ötleteket is kipróbálhatják. Úgy készítettük elő a választható tudományos témákat, hogy ne képezzenek az ifjú kutatók számára leküzdhetetlen nehézséget, továbbá hogy folyamatosan kapjanak szakmai (mentori) segítséget is. A témákra már előre fel lehet készülni a honlapunkon megadott anyagok révén. Az idén választható tudományos témák címei a következők:

*Hőszugárzás vizsgálata integrált termoelemmel,
Mikroelektronikai szelektívitések kialakítása és vizsgálata,
Fotolitográfia,
Mikrofluidika,
Fotolumineszcens struktúra kialakítása pórusos szilíciummal,
Vékonyréteg leválasztása fizikai módszerekkel,
STM Nanolitográfia,
Szerkezeti színek a természetben,
Komplex rendszerek – evolúciós modellek,
Napelemes mérések napszimulátoron,
Napelemes minták elektronmikroszkópos vizsgálata TEM-mel,
Ezüst vékonyréteg előállítása és HREM-es vizsgálata,
Nagyfelbontású elektronmikroszkópia és a JEMS szimulációs program,
Nanorendszerek előállítása,
Rendezett ZnO nanorudak előállítása és minősítése,
A nanoszál alapú bioszenzor megvalósítása felé,
A mágnesség vonzásában,
Hidroxiapatit és polimer alapú biokompatibilis nanokompozitok,
Mágneses anyagvizsgálat és képalkotás,
Ellipszométeres mérések,
Optikai rács kialakítása holográfiával,
Sűrűlódási jelenségek vizsgálata (tribológia).*

Csupán a címeiket átfutva is remélhetőleg azonnal érezhető, hogy a nálunk művelhető témák szinte mindig több tudomány hatókörébe esnek. Ezért természetes a különféle szakmák képviselőinek együttműködése, és az ehhez szükséges jó munkahelyi légkör. Ebbe a különös világba csöppenhet bele a diák, aki a tavalyi év tapasztalatai nyomán garantáltan jól érzi majd magát ☺. Mi magunk nehezen tudnánk elképzelni olyan nyári programot, amelyben jobban egyesül a kellemes és a hasznos, ezért csak azt javasolhatjuk minden diáknak, tanárnak és szülőnek, ha netalán lemaradt az idej alkalomról, idejében gondoljon ránk jövőre! Minden kérdésre választ találhat honlapunkon.

VÉLEMÉNYEK

Tisztelt Szerkesztőség!

A *Fizikai Szemlé*nek visszatérő témája a fizikatanítás eredményessége, amint ezt többek között a Szemle 2009/3. számában *Radnóti Katalin* és *Pipek János* cikke is feszegeti, de erre utal *Pál Lénárd* ugyanebben a számban. Engedjék meg, hogy ezzel kapcsolatban egy tapasztalatomról számoljak be.

Nemrég az egyik végzett osztályunk 10 éves találkozója gyűltünk össze. Kezembe akadt a régi osztályban írt fizikadolgozatok anyaga. Gondoltam kiosztom nekik, bár többségük nem műszaki pályán talála

meg a jövőjét. Legnagyobb megdöbbenésemre látva, hogy tíz évvel ezelőtt milyen kérdéseket kaptak, egyöntetűen azt kérdezték, hogy hogyan tudtak ezekre a kérdésekre felelni? Az elmúlt tíz év alatt, amit egészen más irányú tanulással és munkával töltöttem, teljesen elfelejtették a fizikát, amit annak idején keservesen megtanultak.

Elgondolkozva ezen, mindenekelőtt az jutott eszembe, hogy a humán és reál beállítottságú gyerekeket – ellentétben a mostani gyakorlattal – időben el kell különíteni. Nem volt rossz annak idején a humán és a reál osztályban kapott érettségi.

A következő gondolatom az volt, hogy a fizika tananyaga évről évre kiegészül, a tanulók feje pedig nem fejlődik a tudomány haladásának fokozódó tempója szerint. E túlterheltség kérdésében az is csak részleges segítség lenne, ha a két kötelező nyelv tanulását már az általános iskolában letudnánk. A tananyag csökkentése, például az elektromos áramkörök végtelen időt rabló példasorainak elhagyása, szintén csak ideig-óráig segítene. A középiskolai óraszámcsökkentés hatásairól e helyen kár beszélni.

Tehát végül is, mit várhat el a felsőoktatás? Szerintem, azt semmiképpen nem, hogy megfelelő, vagy az eddiginél jobb képzettségű diákok jelentkezzenek. Ezek szerint le kell nyelni azt a békát, hogy a középiskolában kimaradt ismereteket tanítani kell felső fokon. A középiskola viszont egyet tehet, de ezt meg is kell tennie: megszeretteti a diáksággal a természettudományos tárgyakat. Nem riasztja el a gyereket a napról napra ismétlődő, még oly érdekes feladatokkal

sem, amelyeket majd valakiről az osztály reggel lemásol. Lehet és kell a tanár habitusa szerint az órákat érdekessé tenni, nem csak feleltetni és a maradó rövid időben a leckét magyarázat nélkül feladni.

Pál Lénárd azt írja visszaemlékezésében, hogy „Jelentős változást eredményezhetnek a különféle ifjúsági kutatócsoportok, amelyekben a tanulók – megfelelő tanári irányítással – önálló kutatómunkájukkal sajátíthatják el a természettudományos gondolkodást.” Ezt nem lehet elvárni a középiskolától, hiszen két dolog hiányzik: egyszer a megfelelő tanári irányítás, másodsor az IDŐ. Így nagybetűvel.

Tehát véleményem szerint, ezt a békát az egyetemeknek le kell nyelniük, amíg a reál osztályok és a tárgy tényleges megszerettetése – összefüggéseinek ismertetése, áttekintése – a középiskolában meg nem valósul.

Tóth Endre
nyugdíjas fizikatanár

HÍREK – ESEMÉNYEK

AZ AKADÉMIAI ÉLET HÍREK

Kitüntetések az Akadémia Közgyűlésén

A Magyar Tudományos Akadémia Elnöksége kiemelkedő tudományos munkássága elismeréseképpen *Akadémiai Díjban* részesítette *Horváth Dezsőt*, a fizikai tudomány doktorát, az MTA KFKI Részecske és Magfizikai Kutatóintézet tudományos tanácsadóját. Horváth Dezső az alacsony és nagyenergiás kísérleti

részecskefizikában ért el nemzetközileg elismert eredményeket az anyag-antianyag töltés, paritás és időtükrözési szimmetriájának nagy pontosságú ellenőrzése területén.

Kollégánknak, szerkesztőbizottsági tagtársunknak gratulálunk.

Tudományos publikációs adattár

A Magyar Tudományos Akadémia Tudományos Publikációs Adattára (MTA TPA) az akadémiai kutatóhelyek tudományos közleményeinek bibliográfiai adatait tartalmazza kereshető formában.

A TPA célja, hogy az MTA természet- és társadalomtudományi kutatóhelyeinek tudományos közleményeit és az azokat idéző publikációkat nyilvántartsa. Adatokat szolgáltat az MTA bizottságai és szervezetei részére a kutatóhelyek tudományos publikációs tevékenységének áttekintéséhez, valamint különböző szempontok szerinti értékeléséhez. Segítséget nyújt a kutatóhelyeknek a publikációikat és azok idézeteit tartalmazó jegyzékek különböző szempontok – például kutatási pályázatok – szerinti összeállításához.

A TPA bekapcsolódik a hazai kutatóhelyek és más intézmények tudományos kutatóinak szakirodalmi

információval történő ellátásába, segítve ezzel a kutatóhelyek tudományos együttműködését. Hozzájárul a kutatóhelyi, az akadémiai és az országos tudományos kutatási koncepciók, tervek kimunkálásához, a magyar tudomány nemzetközi helyzetének felméréséhez a szükséges információk megszerzésével és elektronikus formában való szolgáltatásával. Az összegyűjtött adatok hozzájárulnak a szakirodalmi információs folyamatok törvényszerűségeinek feltárásához is.

Az intézetek adatai 1992-től, a kutatócsoportok adatai pedig 1996-tól szerepelnek az adatbázisban. A 2007-es adatok feldolgozása után az Adattár több mint 400 ezer tételt tartalmaz.

Az akadémiai kutatóhelyek tudományos közleményeinek bibliográfiai adatai felhasználói név és jelszó nélkül lekérdezhetőek. Keresni lehet a kutatóhely vagy a

szerző(k) neve szerint. A kérdés tovább szűkíthető (év, megjelentető folyóirat, címben előforduló szavak, illetve a publikáció típusa vagy nyelve szerint). Az eredménylisták több szempont szerint rendezhetők, megjeleníthetők és menthetők. Az idéző publikációk lekérdezéséhez felhasználói név és jelszó is szükséges.

A TPA az Akadémiai Kutatóhelyek Tanácsának javaslatára az MTA főtitkárának 2001. február 15-én kelt határozatával jött létre. Az MTA TPA az MTA Kémiai Kutatóközpontjának önálló szervezeti egységként működik.

(<http://www.mta.hu>)

HÍREK A NAGYVILÁGBÓL

Ausztria 50 év után ki akar lépni a CERN-ből

Ausztria bejelentette, hogy kilép a CERN-ből, a Genf melletti közös európai nagyenergiás fizikai kutatóközpontból. A bejelentés – csak néhány hónappal a Nagy Hadron Ütköztető (Large Hadron Collider, LHC), a világ legnagyobb részecskegyorsító berendezésének újraindítása előtt – váratlanul érte az osztrák fizikusokat.

Gyászos nap ez az osztrák tudomány számára – jelentette ki *Christian Fabjan*, az Osztrák Tudományos Akadémia bécsi Nagyenergiájú Fizikai Intézetének igazgatója. Fabjant valósággal „sokkolta” a bejelentés, amelyet május 8-án *Johannes Hahn* tudományügyi miniszter, a konzervatív osztrák Néppárt (ÖVP) tagja tett.

A CERN 55 éves története során csak két ország lépett ki a szervezetből: 1961-ben Jugoszlávia, és 1969-ben Spanyolország, de ez utóbbi 1983-ban újra csatlakozott.

Ausztria 1959-ben az elsők között csatlakozott a CERN-hez. A laboratórium két korábbi igazgatója, *Wilibald Jentschke* és *Victor Frederick Weisskopf* osztrák származású volt, és jelenleg az országnak 170 kutatója dolgozik az LHC melletti két nagy kísérletnél, az ATLAS-nál és a kompakt müon szolenoidnál. A bejelentés szerint Ausztria részvétele 2010-ben fog megszűnni.

Senki sem örül a döntésnek. Nagyon szerettünk a CERN-ben dolgozni – mondta *Nikola Donig*, az osztrák

Tudományos Minisztérium szóvivője, de hozzátette *a költségvetés szorít*. Bár az áprilisban jóváhagyott osztrák költségvetés növeli a tudomány támogatását, a magáncégek hozzájárulása a gazdasági válság miatt drasztikusan csökkent.

A CERN-be befizetett éves összeget – körülbelül 17 millió eurót, a CERN éves költségvetésének 2%-át – más nemzetközi együttműködésekben való részvételre fogja a kormány fordítani a fizika, a szociológia és a biotechnológia területén. Ilyen például az European Biobanking and Biomolecular Research Resources Infrastructure projekt, a Hamburg melletti Európai Szabad Elektron Lézer, valamint Darmstadtban a Facility for Antiproton and Ion Research. A kormány a pénzéért a legnagyobb hasznot várja el, „olyan területeket fog támogatni, amelyeknek nagyobb és közvetlen hatásuk lesz az üzleti életre és az egyetemekre.”

Május 11-én *Rolf-Dieter Heuer*, a CERN főigazgatója „konstruktív” beszélgetést folytatott Hahnnal, és azt reméli, hogy a CERN és az osztrák kormány képviselői az elkövetkezendő hetekben megállapodásra fognak jutni a további részvételt illetően. A kilépéssel kapcsolatos döntést még jóvá kell hagynia az osztrák kormánynak, a parlamentnek és az államelnöknek.

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

A Lawrence Livermore Nemzeti Laboratórium lézer fúziós berendezése elkészült, de fog-e működni?

12 évi építkezés után és a tervezett 1,2 milliárd dolláros ár közel háromszorosáért hivatalosan is elkészült a Lawrence Livermore Nemzeti Laboratóriumban a National Ignition Facility (NIF). A berendezés, amely egy három futballpályányi méretű épületben helyezkedik el, 192 különálló lézernyalábot fókuszál egy kisméretű kapszulára, amelyben magfúzióra képes deutérium és trícium helyezkedik el. A kutatók abban reménykednek, hogy sikerül olyan feltételeket teremteni, amelyek az atomfegyverek fúziós szakaszánál fellépnek. Az NIF berendezést asztrofizikai és energetikai kutatásokra is használni akarják. A program vezetői szerint az NIF képes a lézernyalábokat a target-

kamrában félmilliméter átmérőjű területre fókuszálni. Ilyen méretű fókuszálás kulcsfontosságú a fúziós folyamat begyújtásához, vagyis ahhoz, hogy a folyamat több energiát termeljen, mint amit befektetnek.

Márciusban a Laboratórium bejelentette, hogy az NIF 1,1 megajoule ultraibolya fényenergiát továbbított a 10 méter átmérőjű targetkamra közepére, de ez jócskán a tervezett 1,8 megajoule energia alatt maradt. A tényleges begyújtási kísérletek csak a jövő évben fognak elkezdődni, de a kritikusok, köztük *Stephen Bodner*, a Naval Research Laboratory fúziós programjának korábbi vezetője szerint a berendezés nem fog működni.

(<http://ptonline.aip.org>)

A neutroncsillagok kérge tízmilliárdszor keményebb mint az acél

Charles Horowitz, az Indiana Egyetem elméleti fizika professzora számításai szerint a neutroncsillagok kérge tízmilliárdszor keményebb, mint az acélé, a Föld egyik legkeményebb anyagáé. Horowitz professzor az Indiana Egyetemen, valamint a Los Alamos Nemzeti Laboratóriumban végzett kiterjedt számítógépes szimulációk eredménye alapján jutott erre a következtetésre. A neutroncsillagok, amelyek másodpercenként 700 fordulatot végeznek tengelyük körül, olyan nagytömegű objektumok, amelyek a gravitáció hatására összeroppantak, miután a magjukban megszűnt a fúziós energiatermelés. Ezeknél a csillagoknál csupán a fekete lyukak lehetnek sűrűbbek, egy

teáskanálnyi neutroncsillag anyag tömege körülbelül százmillió tonna.

Az Indiana Egyetemen kifejlesztett molekuladinamikai programot a Los Alamos Nemzeti Laboratórium nagyteljesítményű számítógép klaszterén futtatva a szimulációval olyan neutroncsillag-kérget azonosítottak, amelynek keménysége minden ismert anyagnál nagyobb.

A kéreg olyan erős lehet, hogy gravitációs hullámokat is kelthet, amelyek nemcsak korlátozhatják egyes csillagok forgási sebességét, hanem nagyfelbontású teleszkópokkal – interferométerekkel – detektálhatók is lehetnek.

(<http://www.lanl.gov/>)

Letették a világ legbonyolultabb neutrínókísérletének alapkövét

Minnesota állam északi részén, Ash River mellett elkezdődtek a munkálatok egy új fizikai laboratórium felépítésére, amely otthont fog adni a NovA projektnek, a világ legbonyolultabb neutrínó kísérletének. A projekt keretében fog elkészülni a NuMI Off-Axis Electron Neutrino Appearance (NOvA) detektor létesítmény, Minnesota Egyetem Fizikai és Csillagászati Karának laboratóriuma, az Ash folyó közelében, mintegy 60 kilométerre délnyugatra az International Fallstól. A laboratóriumban kerül elhelyezésre a 15 000 tonnás részecskedetektor, amellyel a neutrínók szerepét fogják vizsgálni a Világegyetem keletkezésében.

A projektben 28 intézményből 180 kutató és mérnök vesz részt. Ha a detektor elkészül, a fizikusok az Illinois állambeli Fermilabból a földkérgen keresztül Minnesotába, a NovA detektorba küldött neutrínók tulajdonságait fogják tanulmányozni. A 350 mérföldes távolságot a neutrínók kevesebb mint 3 ezredmásodperc alatt teszik meg.

Az új laboratórium tovább növeli az egyetem nemzetközi hírnevét, mint a neutrínókutatások egyik vezető intézményéét. Az egyetem működteti a Soudan Underground Laboratoryt, a legjelentősebb neutrínó-laboratóriumot az Egyesült Államokban.

(<http://www.fnal.gov/>)

SÉTA AZ AULÁBAN

Aki először jár az Eötvös Egyetem Fizikus épületében (hivatalos nevén: az Északi tömbben), annak feltétlenül érdemes meglátogatnia az Aulát. Az ember elsétál középre, és meglepődve tapasztalja, hogy meghallja saját lépteinek hangját. Amint kiejt egy szót, azt néhány tized másodperc múlva újra meghallhatja...

Ha eddig nem tudta volna, most már biztos lehet benne, hogy a Fizikus épületben jár.

A jelenség magyarázata kézenfekvő, csak fel kell nézni az Aula mennyezetére. Az ottani síkűveg táblák egy olyan virtuális gömb felületét érintik, melynek középpontja a kör alakú Aula közepére esik. Az innen kiinduló hanghullámok a mennyezetről visszaverődve ugyanide térnek vissza. S ha már megbabonázottan megálltunk az Aula közepén, vessünk egy pillantást a lábunk alá is: az 1635-ben alapított tudományegyetem mai címerén álltunk meg.

A fényképet *Korbely Attila* és *Kármán Tamás* készítette.

Radnai Gyula
ELTE Anyagfizikai Tanszék



Nézzünk körül: körben szobrokat látunk, mellszobrokat az egyetem egykori tanáraitól. Vannak köztük ismerősök, de vannak olyanok is, akikről talán még sohase hallott a látogató. A talapzaton ott áll az illető neve, születésének és halálának éve. Tegyük egy sétát, ismerkedjünk meg azokkal a fizikusokkal – és nemcsak fizikusokkal – akikre tisztelettel emlékeznek vissza az egyetem mai tanárai és diákjai.

Induljunk el az Aula és a Harmónia terem közötti széles átjáróból, ahol a fal mellett szerénykedik *Eötvös Loránd* mellszobra.

Eötvös Loránd (1848–1919)



1871-től haláláig, 1919-ig volt egyetemünk tanára, 1878-ban vette át *Jedlik Ányostól* a kísérleti fizika tanszéket. 1891–92-ben az egyetem rektora, 1889 és 1905 között, 16 éven át az MTA elnöke volt. Az 1870-es években a felületi fe-

szültség kutatása során tárt fel univerzális összefüggést, 1888-tól kezdve pedig a Föld nehézségi erőterét kutatta. A gravitációs tér térbeli változásainak vizsgálatára szerkesztette meg torziós ingáját. Ezzel az ingával tudta nagy pontossággal igazolni a tehetetlen és a gravitáló tömeg arányosságát. Gravitációs kutatásai tették nevét ismertté a világon, de ő valósította meg egyetemünkön a színvonalas tanárképzést is. Kultuszminiszterként és a Matematikai és Fizikai Társulat elnökeként honosította meg itthon a tudós tanár fogalmát. Kezdeményezésére jött létre az Eötvös József Kollégium, amely ma már újra méltó tanulási és szálláshelye a vidékről felkerült, tehetséges egyetemi hallgatóknak. Az ő nevét viseli a minden év őszén megrendezett országos fizikaverseny, a Fizikai Társulat és a Geofizikai Intézet is.

Egyetemünk 1950-ben vette fel Eötvös Loránd nevét. Az itteni Eötvös Loránd mellszobor 1991-ben készült, *Csejdy László* alkotása, viszont az összes többi szobor, amelyek mellett majd elhaladunk, 1999-ben lett felavatva. Alkotóik nevét a séta végén fogjuk elmondani.

Ahogy Eötvös szobrától elindulva közeledünk az Aula felé, akár balra, akár jobbra indulunk, először egy-egy Eötvös-tanítvány szobrával találkozunk.

Bal kéz felől az Eötvöshöz legközelebbi szobor *Kövesligethy Radóé*, aki az egyetem kozmográfia tanszékét vezette 1904-től nyugdíjazásáig.

Kövesligethy Radó (1862–1934)

A bécsi egyetemen csillagászként végzett, fizikából többek között *Josef Stefan* volt a tanára. *Konkoly-Thebe Miklós* meghívta Ógyallára obszervátornak, innen jött fel Budapestre, Eötvös Loránd hívására.



Bekapcsolódott a gravitációs mérésekbe, fizikus szerkesztője lett a *Matematikai és Fizikai Lapok*-nak, fizikus titkára a Társulatnak. Érdeklődése fokozatosan a földrengéskutatás felé fordult, megszervezte az országos szeizmológiai hálózatot. A nemzetközi szeizmológiai szövetség főtitkáraként az első világháború kitöréséig Bu-

dapestről irányította a világ szeizmológiai kutatásait. A háború és az azt követő forradalmak megtörték az ígéretes kutatói pályát, de még nyugdíjazása után is aktív résztvevője maradt az egyetemi doktori szigorlati bizottságnak. Elméleti fizikai munkássága mind a mai napig izgalmas kihívás a fizikatörténeti kutatás számára.

Jobb kéz felől az Eötvöshöz legközelebbi szobor *Tangl Károlyé*, aki Eötvös Loránd utóda volt egyetemünk Kísérleti Fizikai Intézetének élén.

Tangl Károly (1869–1940)



Eötvös kiválasztott tanítványként már elsőéves korában bekapcsolódott az egyetemi gravitációs mérésekbe. Fiatal tanársegédként végzett potenciálméleti kutatásait a mérések elméleti háttérének kibontásában tudta hasznosítani. 1903-tól Kolozsváron, 1916-tól Budapesten a műszaki

egyetemen vezette a kísérleti fizika tanszéket. Kiváló érzékkel fedezett fel tehetségeket, akiknek azután segítette pályakezdését és érvényesülését a fizikusok hazai és nemzetközi közösségében. Kolozsváron *Gyulai Zoltán* és *Ortvy Rudolf*, a műszaki egyetemen *Lánczos Kornél*, egyetemünkön pedig *Barnóthy György* és *Forró Magda* voltak legjobb tanítványai, fiatal munkatársai. Egyetemi kísérleti fizika tankönyvét, melyet Eötvös előadásaira alapozva írt meg, az egész országban előszeretettel használták. Életének utolsó öt évében az Akadémia III. (matematikai és fizikai) osztályának elnöke volt.

Haladjunk tovább jobb kéz felé! Tangl Károlyé után Ortvy Rudolf szobra következik.

Ortvy Rudolf (1885–1945)

Budapesten és Göttingenben járt egyetemre, majd Kolozsváron doktorált fizikából. Tangl Károly segítségével nyert ösztöndíjat *Debye*-hoz Zürichbe és *Sommerfeld*-hez Münchenbe. Kolozsváron, majd a trianoni döntést követően Szegeden lett az elméleti



fizika tanára. Ismét csak Tangl Károly segítségével került 1928-ban Budapestre, egyetemünk elméleti fizika tanszékére. Elsősorban az ő érdeme, hogy a magyar elméleti fizika felzárkózott a világszínvonalhoz. Szoros kapcsolatot

tartott a külföldi egyetemeken működő magyar fizikusokkal. Fizikai kollokviumokat szervezett a legmodernebb elméletek megtárgyalására, ezekre hazahívta előadónak *Neumann Jánost*, *Wigner Jenőt*, *Lánczos Kornélt*, *Teller Edét*, *Tisza Lászlót*. Az *anyag korpuszkuláris elmélete* című egyetemi tankönyve, amely az akkor még csak 1-2 éve felfedezett kvantummechanika szellemében íródott, 1927-ben jelent meg. Rendkívül olvasott, széles látókörű ember volt, aki a fizika mellett a matematika, a csillagászat, a biológia, a filozófia de még az archeológia területén is élvezettel kalandozott.

Ortvayé után *Békésy György* szobra következik.

Békésy György (1899–1972)



Bernben vegyészdiplomát szerzett, majd Budapesten Tangl Károlynál doktorált kísérleti fizikából. Utána a Postakísérleti Állomáson helyezkedett el, itt kezdte meg az emberi hallószerv működésére vonatkozó, később világhírűvé vált kutatásait. 1940-ben meg-

halt Tangl Károly. Helyére, a Kísérleti Fizikai Intézet élére *Rybár István* került, aki addig a Gyakorlati Fizikai Intézetet vezette, az ő helyére pedig meghívta az egyetem Békésy Györgyöt. Békésy azzal a feltétellel fogadta el a felkínált tanszéket, hogy megtarthatta mellette a Postakísérleti Állomáson betöltött főmérnöki állását is. Intézetvezetőként jó kapcsolatot tartott a hallgatókkal, akiknek szabad bejárásuk volt a könyvtárba és a laboratóriumba. A második világháború végén, Budapest ostromakor ezekre a hallgatókra bízta a legértékesebb műszereket: vigyék haza, rejtsek el otthon őket. 1945 után svédországi, majd amerikai tanulmányútra ment, végül 1949-ben a proletárdiktatúra megszüntette itthoni állásait és még akadémiai tagságát is visszavonatták. Soha többé nem tért vissza Magyarországra. 1961-ben élettani Nobel-díjat kapott az emberi hallás mechanizmusára vonatkozó, jelentős részben még itthon végzett kutatásaiért. Ez a szobor, amely egy vidáman mosolygó Békésy Györgyöt ábrázol, egyben az akkori elfogult, ostoba politikai döntéseken felülemelkedő tudós portréjának is tekinthető.

A következő szobor egyetemünk másik Nobel-díjas tanárát, *Hevesy Györgyöt* ábrázolja.

Hevesy György (1885–1966)



Egyszerre volt fizikus és kémikus. Budapesten a piaristáknál érettségizett, majd Németországban szerzett vegyészdiplomát. 1911-ben Manchesterben *Rutherford* laboratóriumában dolgozott, itt ismerkedett meg és kötött életre szóló barátságot *Niels Bohrral*. 1912-ben született meg Bohr atommodellje és ebben az

évben fedezte fel Hevesy a radioaktív nyomjelzés módszerét. Nemzetközileg elismert fizikai-kémiai kutatásai révén 1913-ban lett egyetemünk magántanára. 1918-ban rendkívüli, 1919-ben rendes tanári kinevezést kapott. Utóbbi sajnos a Tanácsköztársaság kormányától, ezért ezt 1920-ban visszavonták. Ekkor Koppenhágába ment és Bohr intézetében folytatta kutatásait. Később is gyakran megfordult Dániában, a háború alatt innen menekült át a náci üldöztetés elől Svédországba. Ekkor már egész Európában széleskörűen alkalmazták az általa felfedezett radioaktív nyomjelzéses módszert, amit a tudományos világ azzal ismert el, hogy neki ítéltek az 1943. évi kémiai Nobel-díjat. Felvette a svéd állampolgárságot, de élete végéig megőrizte magyar útlevelét. Halála előtt nem sokkal még egyszer hazalátogatott, átvette díszdoktori oklevelét az ELTE-n és a Budapesti Műszaki Egyetemen.

Hevesy György szobra felől az Aula déli kapuja felé tekintve négy kémikus szobrát látjuk: kettőt-kettőt a bejáratától jobbra és balra. Hevesy György szobra mellett *id. Lengyel Béla* szobra áll, vele szemben a másik oldalon pedig *Than Károlyé*. A bejáratához legközelebb két Than-tanítvány, *Winkler Lajos* és *Buchböck Gusztáv* szobrai állnak (ők vigyázzák a bejáratot).¹

Ha tovább haladunk a megkezdett irányban, Hevesy György szobra után *id. Lengyel Béla* szobra elé érünk.

id. Lengyel Béla (1844–1913)



Eötvös Loránddal csaknem egyidőben tanult Heidelbergben *Bunsennál*. Igaz, ő már ösztöndíjas volt ott, előtte két évig volt Than Károly tanársegéde. Itthon 1870-ben lett egyetemünk magántanára, 1877-től pedig az újonnan felállított II. sz. Kémiai Intézet vezetője.

¹ A *Fizikai Szemlé*ben főleg a fizikusokról emlékezünk meg, a kémikusokról részletesen tájékozódhat az érdeklődő látogató a Kémiai Intézet <http://www.chem.elte.hu/honlapjan>.

Itt nagy kedvvel végezte az ország ásványvizeinek kémiai elemzését. Aktívan dolgozott a Természettudományi Társulatban is. Az első kémikusok egyike, aki a radioaktivitással foglalkozott, ezért is került szobra Hevesy György szobra mellé.

A déli bejárat jobb oldalán áll Buchböck Gusztáv szobra.

Buchböck Gusztáv (1869–1935)



1904-ben lett egyetemünk magántanára. Külföldön *Wilhelm Ostwald* és *Walter Nernst* intézetében járt tanulmányúton, itthon Than Károly mellett dolgozott. 1908-ban, Than Károly halála után kettéválasztották Than intézetét, s az újonnan szervezett III. sz. Kémiai Intézet vezetőjéül őt nevezték ki. Ezután sok tehetséges fiatal kémikust gyűjtött maga köré és vezetett be a fizikai-kémiai mérések egyre finomodó világába. Hevesy György is megfordult nála és *Erdey-Grúz Tibor* is itt kezdte pályáját.

A déli bejárat másik oldalára sétálva át, Winkler Lajos szobrához érünk.

Winkler Lajos (1863–1939)



Gyógyszerészként végzett és gyógyszerész doktorátust szerzett egyetemünkön, Than Károly irányítása mellett. 1893-ban lett magántanár, 1903-ban pedig nyilvános, rendes tanár. A Than Károly halála után kettéosztott intézetnek az a fele, amely megtartotta az I. sz. Kémiai Intézet elnevezését, Winkler Lajos vezetésével működött közel negyed századon át. Az analitikai kémia területén új elemzési eljárásokat dolgozott ki, neves gyógyszerkutató volt. Emlékét nemcsak az ELTE, hanem a SOTE is ápolja.

Winkler szobrához legközelebb áll egykori főnöke, Than Károly szobra. (Kissé elnéznek egymás mellett, de ez csak a véletlen műve.)

Than Károly (1834–1908)

A magyar vegyészet doyenje, az igazi, tudományos kémia megalapítója Magyarországon. Bunsen legelső magyar tanítványa, a hazai kémiai kutatás európai hírű egyénisége elsőként foglalkozott hazánkban szinképelemzéssel. *Eötvös József* kultuszminiszteri



támogatásával, Than Károly tervei alapján kezdték felépíteni az akkori fűvészkertben – a mai Múzeum körút, Rákóczi út, Puskin utca által határolt területen – Európa egyik legkorszerűbb kémiai intézetét, mely 1872-re készült el. Még Eötvös Lorándnak is jutott hely az új épület kistermében, amikor Heidelbergből

hazatérve megkezdte elméleti fizikai előadásait. Később újabb és újabb épületekkel építették körül, többek között az Eötvös irányításával 1886-ra elkészült fizikai épülettel. Thané lett a B, Eötvösé a D épület... (Eötvösnek lakása is volt az épületben.) Than Károly 1870 óta volt az Akadémia rendes tagja, 1875-ben lett egyetemünk rektora, 1880-ig pedig ő volt a Természettudományi Társulat elnöke.

Than Károly mellszobra mellett található a még nála is idősebb Jedlik Ányos mellszobra. Ma már mindkettőt egy-egy olyan koszorú is díszíti, melyet születésük kerek évfordulóján helyeztek el tiszteletük jeléül egyetemünk tanárai és diákjai.

Jedlik Ányos (1800–1895)



A 18. és 19. század fordulóján született és csaknem végigélte az egész 19. századot. 1840-től 1878-ig övé volt egyetemünk kísérleti fizika tanszéke. (A tanszék akkoriban egyetlen egy professzori státust jelentett.) 1844-ig latinul, attól kezdve magyarul adott elő. 1848-ban (!) ő volt egyete-

münk bölcsészeti karán a dékán. Akkoriban még nem volt hazánkban műszaki egyetem, melyre Institutum Geometricum néven működött technika kar a pesti tudományegyetemen. Jedlik ott is tanított. 1850-ben kiadta az első magyar nyelvű egyetemi fizika tankönyvet *Súlyos testek természettana* címmel. 1858-ban választották meg a Magyar Tudományos Akadémia rendes tagjának, 1863-ban pedig ő volt az egyetem rektora. Azokban az években már készen állt az a kis gép, melynek feltalálásakor Jedlik tudatosan alkalmazta az évekkel később *Siemens* által újra felfedezett és dinamó-elvnek elnevezett kreatív ötletet. Azaz dehogyan állt! Jedlik motorként működtette, azzal hajtotta meg az optikai rácsokat vonalazó, ugyancsak általa feltalált bonyolult szerkezetet. Jedlik Ányos emlékét régóta ápolja az egyetem, egy másik szobrot is őriz róla a fizikus könyvtár.

Jedlik Ányos a legidősebb azok közül, akiknek szobra áll az Aulában. Mellette áll a legfiatalabb tudós szobra: *Detre László* csillagászé.

Detre László (1906–1974)



1964 és 1968 között volt egyetemünk csillagászati tanszékének vezetője. A változócsillagok kutatásával szerzett magának és az intézetnek nemzetközi hírnevet. Ő szervezte meg, hogy lehessen hazánkban csillagász szakos egyetemi diplomát kapni, addig csak matematika-fizika szakos tanári vagy fizikus diplomával lehetett valaki egyetemi végzettségű csillagász.

Konkoly Thege Miklós után az első csillagász volt, akit a Magyar Tudományos Akadémia rendes tagjául választott. Jórészt az ő kezdeményezésének és szervezésének köszönhetjük, hogy a második világháború után Magyarországot felvették a Nemzetközi Csillagászati Unióba. Neki köszönhető az MTA Csillagászati Kutatóintézete piszkéstartó megfigyelőállomásának felépítése és felszerelése kiváló Schmidt távcsővel, valamint egy 0,5 méter, majd egy 1 méter átmérőjű Cassegrain teleszkóppal. Emlékét többek között egy kisbolygó őrzi, melyet *Kulin György* fedezett fel és nevezett el róla, valamint egy 1 méter átmérőjű emlékkő, melyet volt munkatársai és tanítványai állítottak tiszteletére Piskéstartón.

Detre László szobra után egyetemünk fiatal tanszékének, a meteorológiai tanszéknek vezető professzoráról készült szobrot találjuk. Az ő neve cseng a legkevésbé ismerősen, de ez nem véletlen.

Száva-Kováts József (1898–1980)



Polgári iskolai tanárként kezdte kutatói pályáját. Kutatási eredményeit korabeli nemzetközi tudományos folyóiratok közölték. 1940-ben magántanára, 1943-ban nyilvános rendkívüli tanára, 1944-ben pedig megválasztott és 1945-ben kinevezett tanára lett a légkör- és éghajlattani tanszéknek, amelyet Magyarországon elsőként a mi egyetemünkön hoztak létre. Tanítványai szerint szuggesztív előadó, karizmatikus egyéniség volt. 1949-ben ő lett és 1953-ig ő maradt a már intézetté fejlesztett tanszék vezetője.

A talajmenti réteg éghajlata. Mikroklima és növényklíma címmel *id. Berényi Dénessel* közösen írt könyve 1948-ban jelent meg. Megszervezte az egyetemi szintű meteorológus képzést,

megírta az első ilyen tárgyú egyetemi tankönyvet *Általános légkörtan* címmel. Ez a tankönyv 1952-ben jelent meg. A következő évben viszont koholt vádak alapján leváltották a tanszék éléről és internálták. 1954-ben szabadult, de sem állását, se publikációs lehetőségét nem kapta vissza. Bár *Száva-Kováts József* Cholnoky-tanítvány volt, geográfiából doktorált egyetemünkön, az általa művelt tudomány ma már elválaszthatatlan a fizikától.

A kör Kövesligethy Radó szobrával zárul, akiről már szoltunk és aki egyszerre volt csillagász, geofizikus szeizmológus és fizikus. Méltó képviselője az Eötvös Loránd által fémjelzett korszaknak egyetemünk és a fizika közös történetében.

Kik készítették a szobrokat?

Olyan művészek, akiknek köztéri szobrai állnak szerette az országban.

Kezdjük a hölgyekkel. *E. Lakatos Aranka* debreceni szobrász készítette el Kövesligethy Radó és Winkler Lajos szobrát, a pápai születésű *Szilágyi Bernadett* pedig Than Károly és Ortvay Rudolf modern megfogalmazású szobrát, míg a budapesti *D. Törley Mária* alkotása *id. Lengyel Béla* szobra.

A legidősebb férfi szobrász, *ifj. Szabó István* munkája Jedlik Ányos és Detre László büsztje. Hasonlóképp két mellszobrot készített *Janzer Frigyes*, akinek *Tangl Károly* és *Száva-Kováts József* élethű szobra került ki a keze alól, valamint *Tóth Béla*, aki *Hevesy György* és *Buchböck Gusztáv* alakját mintázta meg. A mosolygó *Békésy György* *Benedek György* szobrász és festőművész alkotása.

A művészek az ELTE által rendelkezésükre bocsátott képanyag alapján dolgoztak, a szobrok agyagmintáit mindig előre bemutatták az egyetem és a képzőművész szakma képviselőinek. Ennek eredményeképp jött létre ez az egyéni hangvételű alkotásokból álló, mégis egységes hatású szoborkiállítás.



Aki még egyszer szeretne körbepillantani a szobron és emlékezetes élménnyel távozni az Aulából, a Duna felé néző portán kapcsoltsa be a szobrokat megvilágító lámpácskákat is, amelyek – ha eddig nem világítottak – bizonyára fel se tűntek. Maradandó élményhez jut mindenki, aki akkor körülnéz az Aulában.

Források és további információk

Radnai Gyula: Az Eötvös-korszak. *Fizikai Szemle* 41 (1991) 341.

Magyar Életrajzi Lexikon

Szinnyei József: *Magyar Írók Élete és Munkái*

A Pallas Nagylexikona

História Tudósnaptár

Fizikai Szemle
MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

megjelenését anyagilag támogatják:

