

fizikai szemle

2017/1

Tájékoztató az Eötvös Loránd Fizikai Társulat 2017. évi tagdíjairól

Tisztelt Kollégák!

Mindenekelőtt a magam és a Társulat elnöksége nevében szeretnék boldog és sikeres új évet kívánni minden tagtársunknak és a **Fizikai Szemle** olvasóinak. Köszönöm elmúlt évi támogatásukat, biztosíthatom önöket, hogy a Társulat 125 éves hagyományainak megfelelően az idén is magas szakmai színvonalon fogja képviselni az Alapszabályban meghatározott célokat. Ehhez kérem az Önök támogatását, amelyet a 2017. évre vonatkozó tagdíjuk megfizetésével – az alábbiak figyelembevételével – tudnak biztosítani.

Ha Ön **Társulatunk rendes tagja** és

- a **Fizikai Szemle** számaikat elektronikus formában kéri, akkor a 2017. évi tagdíja **8400 Ft.**
- a **Fizikai Szemle** számaikat papíralapú terjesztéssel kéri, akkor a 2017. évi tagdíja **8800 Ft.**

Ha Ön a Társulat **rendes tagjaként általános vagy középiskolai tanár** és

- a **Fizikai Szemle** számaikat elektronikus formában kéri, akkor 2017. évi tagdíja 800 Ft alaptagdíj + 4600 Ft kiegészítő tagdíj, azaz összesen **5400 Ft.**
- a **Fizikai Szemle** számaikat papíralapú terjesztéssel kéri, akkor 2017. évi tagdíja 800 Ft alaptagdíj + 5000 Ft kiegészítő tagdíj, azaz összesen **5800 Ft.** Az alap- és kiegészítő tagdíjat együtt kérjük befizetni.

Ha Ön **nyugdíjasként rendes tagja** a Társulatnak és

- a **Fizikai Szemle** számaikat elektronikus formában kéri, akkor 2017. évi tagdíja **3400 Ft.**
- a **Fizikai Szemle** számaikat papíralapú terjesztéssel kéri, akkor 2017. évi tagdíja **3800 Ft.**

Ezúttal is tisztelettel kérem azokat a nyugdíjas korú tagjainkat, akik nyugdíjuk mellett teljes munkaviszonnyal vagy közalkalmazotti jogviszonnyal rendelkeznek, hogy a tagdíjfizetés szempontjából ne tekintsék magukat nyugdíjasnak.

Ha Ön **tanulmányait végzi** (felsőoktatási intézmény hallgatója és munkaviszonnyal nem rendelkezik vagy középiskolai tanuló) **vagy 30 évnél fiatalabb** (azaz aki 1987 után született) és

- a **Fizikai Szemle** számaikat elektronikus formában kéri, akkor kedvezményes tagdíja **3400 Ft.**
- a **Fizikai Szemle** számaikat papíralapú terjesztéssel kéri, akkor kedvezményes tagdíja **3800 Ft.**

Kérjük, aki a fiataloknak szóló kedvezménnyel élni kíván és még nem adta meg születési adatait a tagnyilvántartáshoz, írja meg ezt a Társulat titkárságának (elft@elft.hu). Kérjük, hogy bármilyen adatváltoztatást (például e-mail cím megváltozása) e-mailben írják meg az elft@elft.hu címre.

Kérem, hogy tagdíjukat mielőbb szíveskedjenek rendezni. A tagjainknak tagsági jogon járó **Fizikai Szemle** folyamatos küldését csak azok számára tudjuk biztosítani, akik 2017. évi tagdíjukat rendezték. Felhívom ugyanakkor szíves figyelmüket arra a lehetőségre, hogy tagdíjuk megfizetését esetleg munkahelyük is átvállalhatja. Továbbá felhívom szíves figyelmüket az **önkéntes többletfizetés lehetőségére**. Kérem, hogy a leírtakra, különösen az utóbbira, külföldön élő ismerőseik figyelmét is hívják fel, nekik a **Fizikai Szemlé**t elektronikus formában, e-mailen küldjük el; ha nyomtatott Szemlé

kér, akkor kérjük, vegye figyelembe a lényegesen magasabb postaköltséget. Újonnan belépni a Társulat honlapjáról lehet: <http://elft.hu/jelentkezés-a-tarsulatba/>.

Amennyiben lehetőségük van rá, kérem, hogy a **tagdíj befizetését átutalással** szíveskedjenek rendezni a **K&H Banknál vezetett 10200830-32310274-00000000** sz. folyószámlánkra. A közlemény rovatba a befizető nevét, városát kérjük feltüntetni. A Titkárságon (1092 Bp., Ráday u. 18., fsz./3.) lehetőség van készpénzes befizetésre is, illetve csekk is kérhető.

Felhívom figyelmüket, hogy az **Európai Fizikai Társulatba (EPS) egyénileg lehet belépni**. Ugyanakkor az ELFT-tagság önmagában is kedvezményekre jogosít számos, az EPS vagy annak tagszervezetei rendezvényén.

Felhívás tagjainkhoz és a fizika minden barátjához

Tájékoztatom a Társulat tagjait és a **Fizikai Szemle** olvasóit, hogy a 2015. évről szóló **jövedelemadó-bevalláshoz kapcsolódó felajánlások** révén a Társulat 2016-ban **820 149 Ft** bevételhez jutott, amit a korábbi évekhez hasonlóan teljes egészében a **Fizikai Szemle** megjelentetési költségeinek részbeni fedezeteként használtunk fel. Ez a támogatás tette lehetővé többek között azt is, hogy tagjaink folyamatosan megkaphatták társulatunk folyóiratát, amiért köszönetünket fejezzük ki a Társulat javára rendelkezőknek. Kérem a fizika minden barátját, hogy ha teheti, az idén is rendelkezzen **személyi jövedelemadója 1%-ának** a Társulat céljaira való felajánlásáról és buzdítsa erre barátait, ismerőseit is. Az Eötvös Loránd Fizikai Társulatnak a nyilatkozaton feltüntetendő adószáma **19815644-2-43**.

Tisztelettel:

Újfalussy Balázs főtitkár

1891

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat havonta megjelenő folyóirata.

Támogatók: a Magyar Tudományos Akadémia Fizikai Tudományok Osztálya, az Emberi Erőforrások Minisztériuma, a Magyar Biofizikai Társaság, a Magyar Nukleáris Társaság és a Magyar Fizikushallgatók Egyesülete

Főszerkesztő:
Szatmáry Zoltán

Szerkesztőbizottság:

Bencze Gyula, Czitrovszky Aladár, Faigel Gyula, Füstöss László, Gyulai József, Horváth Dezső, Horváth Gábor, Iglói Ferenc, Kiss Ádám, Németh Judit, Ormos Pál, Papp Katalin, Simon Péter, Sükösd Csaba, Szabados László, Szabó Gábor, Trócsányi Zoltán, Ujvári Sándor

Szerkesztő:
Lendvai János

Műszaki szerkesztő:
Kármán Tamás

A folyóirat e-mailcíme:

szerkesztok@fizikaiszemle.hu

A lapba szánt írásokat erre a címre kérjük.

A beküldött tudományos, ismeretterjesztő és fizikatanítási cikkek a Szerkesztőbizottság, illetve az általa felkért, a témában elismert szakértő jóváhagyó véleménye után jelenhetnek meg.

A folyóirat honlapja:

<http://www.fizikaiszemle.hu>



A címlapon:

A késleltetett neutronkibocsátás szisztematikus vizsgálata céljából épített legnagyobb határfokú rendszer, a BRIKEN-detektor (lásd Kiss Gábor Gyula írását a 7–12. oldalakon).

<i>Nádas József, Rakovics Vilmos: „Fehér” LED a közeli infravörös tartományban</i>	2
<i>Hogyan lehet a hőmérsékleti sugárzók folytonos színeképét a keskeny tartományban sugárzó LED-ekkel megközelíteni?</i>	
<i>Kiss Gábor Gyula: Az asztrofizikai r-folyamat vizsgálata radioaktív nyalábokkal</i>	7
<i>A vasnál nebezesebb elemek nukleoszintézisének jobb megismerését segítő kísérletek</i>	
<i>Szilágyi Edit, Kótai Endre: Szigetelő anyagok ionnyalábos analízise</i>	12
<i>A szigetelő anyagok ionsugaras módszerekkel történő vizsgálatát megnehezíti a minták feltöltődése, a cikk ezen probléma kiküszöbölésével foglalkozik</i>	
<i>Molnár János: Regiomontanus és naptáblája</i>	17
<i>A Mátyás király uralkodása alatt alapított pozsonyi Academia Istropolitana egyetem tanára egyebek között egy zseniális napórátáblát is alkotott</i>	
A FIZIKA TANÍTÁSA	
<i>Nagy Péter, Tasnádi Péter: Fortuna szekerén...</i>	21
<i>Valószínűségi gondolkodás alkalmazása meglepő mindennapi és fizikai jelenségek értelmezésében</i>	
<i>Komáromi Annamária: Űrkutatással a szerethetőbb fizikáért</i>	27
<i>Űrkutatási témakörök alkalmazása termodinamika tanításában</i>	
<i>Bérczi Szaniszló: A szerkezeti hierarchia és a fölépítés-lebontás (szétszedem-összerakom) elv</i>	32
<i>Az anyagokat lebontó, elemző nézőpont a belső szerkezetet kutatja, analitikus szemléletű, és a természettudományok világába, míg az anyagokból építő fölhasználó szemlélet a mérnöki tudományokhoz vezet el bennünket</i>	
HÍREK – ESEMÉNYEK	
<i>Haiman Ottó, 1920–2016 (Kürti Jenő)</i>	36
<i>J. Nádas, V. Rakovics: White LED in the near infrared region</i>	
<i>G. Gy. Kiss: Investigation of the astrophysical r-process with radioactive beams</i>	
<i>E. Szilágyi, E. Kótai: Ion beam analysis of insulating materials</i>	
<i>J. Molnár: The sun dial table of Regiomontanus</i>	
TEACHING PHYSICS	
<i>P. Nagy, P. Tasnádi: Fortuna’s chariot</i>	
<i>A. Komáromi: Space research for more attractive physics</i>	
<i>Sz. Bérczi: Structural hierarchy and the assembling-disassembling principle</i>	
EVENTS	
<i>Ottó Haiman, 1920–2016 (J. Kürti)</i>	

Szerkesztőség: 1092 Budapest, Ráday utca 18. földszint III., Eötvös Loránd Fizikai Társulat. Telefon/fax: (1) 201-8682

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

Kiadja az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, felelős kiadó Újfalussy Balázs főtktár, felelős szerkesztő Szatmáry Zoltán főszerkesztő.

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

Nyomdai előkészítés: Kármán Stúdió, 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 (nyáron duplaszámmal), egyes szám ára: 900.- Ft (duplaszámé 1800.- Ft) + postaköltség.

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



»FEHÉR« LED A KÖZELI INFRAVÖRÖS TARTOMÁNYBAN

Nádas József – Óbudai Egyetem, Kandó Villamossági Kar, Mikroelektronikai és Technológia Intézet
Rakovics Vilmos – MTA Energiatudományi Kutatóközpont, Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet

LED-ek a világítástechnikában

A világítástechnika napjainkban forradalmi változáson megy keresztül, a LED-ek egyre inkább kiszorítják a korábbi fényforrásokat. Egyrészt a lámpatestekben használt izzólámpák, fénycsövek és kompakt fénycsövek helyett alkalmazott úgynevezett retrofit LED fényforrások formájában, másrészt olyan LED világítótestekben, amelyekbe a gyártó a világító berendezés teljes élettartamára tervezett (és kicserélhetetlen) LED fényforrást épít.

Az emberi látás a 380–780 nm hullámhosszúság tartományban érzékeli a fényt. Érzékelésünk hullámhosszfüggő, azaz nem minden hullámhosszra azonos érzékenységgel az emberi szem, ám ebben a tartományban folyamatos. A hőmérsékleti sugárzó izzólámpák folytonos színképű sugárzása illeszkedik ehhez, a kompakt fénycsövek és fénycsövek esetén pedig a higany UV-sugárzását többféle (általában vörös, zöldes és kékes színárnyalatú) fényporral átalakítva több-kevesebb hiányossággal fedi le a sugárzás a látható tartományt.

A LED-ek esetén az alapvető probléma, hogy nagyon keskeny tartományban sugároznak, egy LED önmagában mindig határozottan színes fényérzetet ad. A LED keskeny sugárzási sávja miatt világítástechnikai célokra a sávszélesítés mindenképpen szükséges, de ennek számos módját használják a gyártók, például:

- RGB LED 3 chip, vörös+zöld+kék chip egy tokban szerelve (1. ábra);

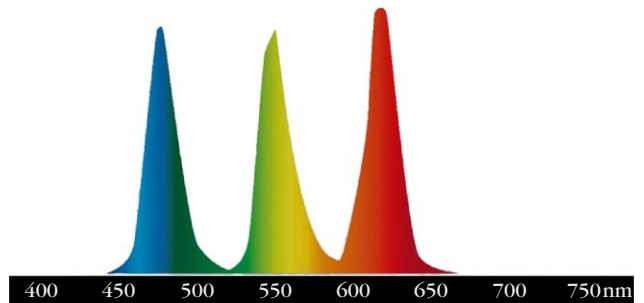
A cikk az Eötvös Loránd Fizikai Társulat szegedi Vándorgyűlésén (2016. augusztus 24–27.) bemutatott poszter alapján készült.



Nádas József, mérnök-tanár, villamosmérnök, világítástechnikai szakmérnök, az Óbudai Egyetem Kandó Villamosmérnöki Karának oktatója. Kutatási területe a közeli infravörös tartományban sugárzó vegyület-félvezető anyagok és eszközök.



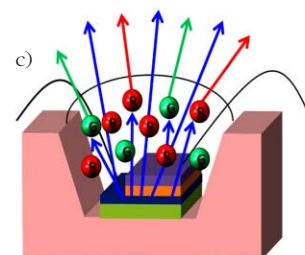
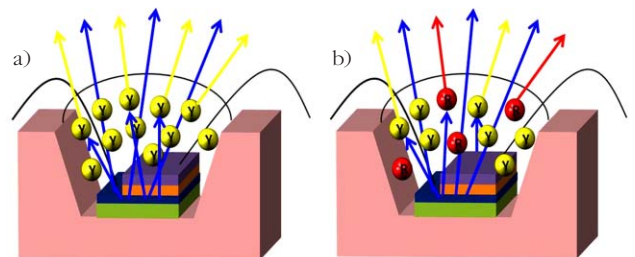
Rakovics Vilmos, vegyész, az anyagtudományok és technológiák kandidátusa, az MTA EK Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet kutatója, tudományos főmunkatárs. Kutatási területe a vegyület-félvezető anyagok és eszközök technológiája, az egykristályos vékonyrétegek növesztése folyadékfázisból, valamint a napelemek, infravörös diódák, lézerek és detektorok.

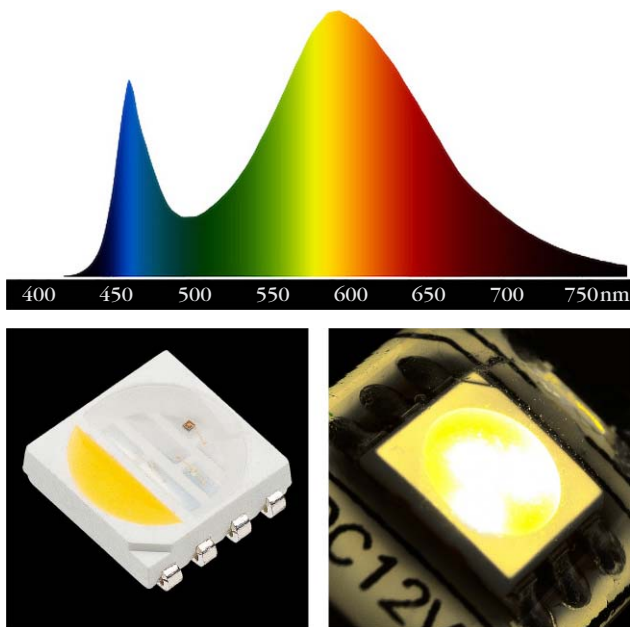


1. ábra. A kék, zöld, vörös (RGB) LED-ek közvetlenül sugároznak.

- RGB LED 1 chip, vörös+zöld+kék félvezetők egy hordozóra egymás mellé növesztve;
- kék LED sárga fényporral (2.a és 3. ábra);
- kék LED sárga és vörös fényporral (2.b ábra);
- kék LED zöld és vörös fényporral (2.c ábra);
- kék LED sárga fényporral és InGaAlP vörös színű LED.

2. ábra. A látható tartományban világító LED-ek fényporos sávszélesítésére három leggyakoribb megoldás: (a) kék LED + sárga fénypor, (b) kék LED + sárga fénypor + vörös fénypor, (c) kék LED + zöld fénypor + vörös fénypor [1].





3. ábra. A kék LED fénye részben változatlanul áthalad a sárga fényporrétegen, részben elnyelődik benne, gerjeszti azt és sárga fény formájában távozik.

A fényporos LED-ek szembevetően eltérnek még abban, hogy a fénypor a tokot kitöltve kerül felvitelre a LED felszínére, vagy a LED körül egy búra-szerű hordozón helyezkedik el (ez utóbbit közismerten „remote phosphor”-nak hívják).

Fehér fényt ma túlnyomó többségben két módon állítunk elő LED-ek segítségével: a dekorációs célú fényforrások (például LED szalagok) esetén RGB LED-del, a világítási célokra szánt LED-ek esetében pedig kék LED és sárga fénypor alkalmazásával.

Az RGB LED-ek három alapszínű fény additív keverésével működnek, amely így fehér érzetet okoz. A színvisszaadása nagyon rossz, mert az egyes diódák sugárzási tartománya nagyon keskeny (fizikailag adott) és a széles látható tartomány (380–780 nm) nagyon kis részét fedi le. A fényhasznosítása (hatásfoka) szintén viszonylag alacsony, mert az e célra széles körben használt vegyület-félvezetők nem optimálisak a magas fényhasznosítás elérésére, illetve a zöld a látási érzékenységünk maximuma környékén sugároz, ezért a fehér színérzet eléréséhez „visszafogottan” üzemel. Üzemeltetése problémás, mert a három dióda munkapontját külön-külön kell beállítani, ez külön meghajtó áramköröket igényel, és a változatlan korrelált színhőmérséklet tartásához az egyes diódák eltérő öregedésével párhuzamosan folyamatosan korrigálni szükséges.

A kék LED sárga fényporral a napjainkban leggyakrabban használt megoldás. A kék és sárga komplexen színű fény additív keverése fehér érzetet okoz. A színvisszaadás és a színhőmérséklet nagyrészt a sárga fénypor összetételén és mennyiségén múlik. Kevesebb fénypor esetén több kék összetevőt tartalmaz a fény, színhőmérséklete hidegebbé (kékesebbé) válik, ugyanakkor a fénypor által kibocsátott sárga fény kevesebb lesz, a sárga tartomány a gyakorlatban

keskenyebbnek is látszik. Mindez gyengébb színvisszaadást eredményez, a kevesebb hullámhossz-átalakítás miatt viszont kissé nő a fényhasznosítás. Röviden: hidegebb, rosszabb fényminőségű, de jobb hatásfokú fényforrást kapunk. Több fénypor esetén sárgás összetevők mennyisége nő, a színhőmérséklet melegebbé válik, színvisszaadás javul, a hatásfok azonban romlik. Ugyanazon LED ugyanazzal a fényporral, annak mennyiségétől függően lehet minőségi fehér fényt sugárzó kisebb hatásfokú, vagy rosszabb spektrális eloszlású és jobb hatásfokú eszköz. A fénypor és a hordozó, amelybe beágyazták, viszont így is, úgy is számottevő veszteséget okoz. A LED pontszerűsége több nagyságrenddel csökken, az egyebekben korszerűnek tekinthető COB (Chips On Board) LED-ekben pénzérme nagyságúra nő a sugárzó felület. A fénypor a LED-del termikus kontaktusban van, öregedésére a hőmérséklet is hat. A remote phosphor típusú LED-ekben ilyen közvetlen termikus kontaktus nincs, de a fényport hordozó szerkezet további veszteségeket okoz.

A kék fény részleges átalakításából eredő fizikai és anyagszerkezeti veszteségek ellenére is a kék LED – sárga fénypor megoldással készülnek napjaink legjobb fényhasznosítású világítási célú LED fényforrásai. A fényhasznosítás azonban nem emelhető minden határon túl. A fénykibocsátó diódák hordozóit, rétegszerkezetének anyagait, növesztési technológiáját folyamatosan fejlesztik, miközben a fényporréteg egy viszonylag állandó része e LED-eknek. Az energiamegtakarítási igény (különösen EU-ban) a következő évtized elejére olyan fényhasznosítási követelményeket támaszt a LED fényforrásokkal szemben, amelyet csak a fényporok lényeges korszerűsítésével, vagy olyan technológiákkal lehet megvalósítani, amelyek a LED-ek újszerű szerkezeti felépítésének köszönhetően részben vagy egészben elhagyhatóvá teszik a fénypor alkalmazását. Az erre irányuló kísérletek eddig nem hoztak áttörést, csak kisebb mértékben szélesítették a sugárzási tartományt, például kék sugárzást kék-kékeszöld tartományba.

LED-ek az infravörös spektroszkópiában

A közeli infravörös tartományt (near infrared, NIR) spektroszkópiai célokra, szerves anyagok vizsgálatára lehet használni. Ezekben az -OH, -NH, -CH csoportokat lehet kimutatni, a kötések vegyértékregzéseire jellemző rezonancia-hullámhossz elnyelésének mérésével.

Egyik módszer, hogy e csoportokban a vegyérték-kötés 1–3. felharmonikus-tartományában mérünk, ebben a hullámhossztartományban ugyan kisebb a jel, mint az alapharmonikuson, de jobb a jel-zaj arány és „mélyebbre” látni a mintában. Ez a közeli infravörös tartomány, amely 1100–1800 nm-ig terjed. A LED-ek megjelenése előtt a mérésekhez izzólámpát használtak. A mérés hullámhossztartományában az izzó üzemeltetéséhez szükséges energiához képest a haszno-

sított sugárzás energiája nagyon kicsi, a hatásfok nagyon rossz. A LED hullámhossztartománya keskeny és tervezhető, valamint számos további előnye van az izzókhöz képest: rövid, néhány 10^{-9} s válaszidejű, geometriája pontoszerű, jól fókuszálható, kis fogyasztású, várható élettartama az izzólámpáénak többszöröse [2]. Széles sávú és hangolható LED-ekkel ez a mérés hatékonyabbá és pontosabbá tehető.

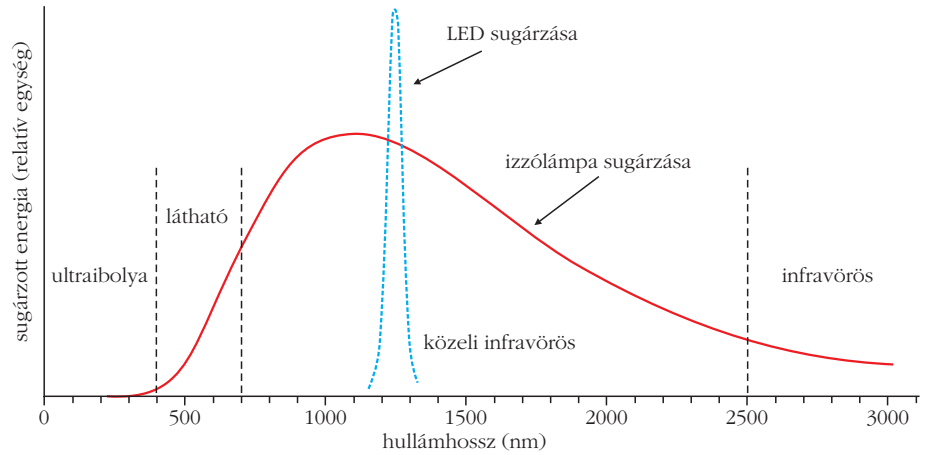
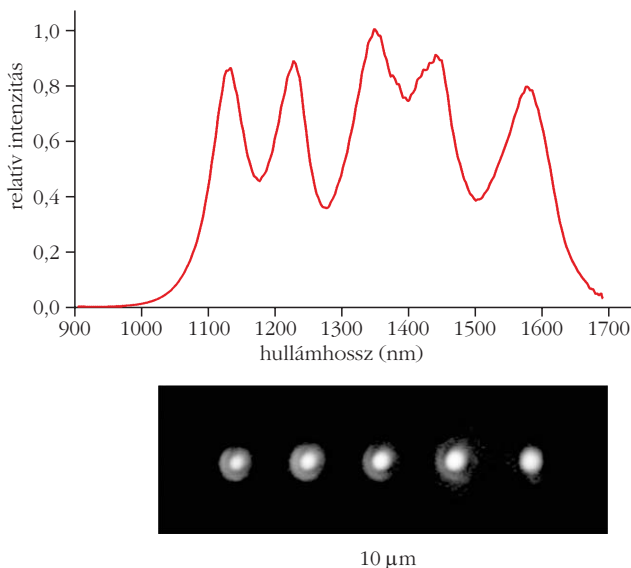
A LED egyik legnagyobb előnye – a keskeny sugárzási sáv – a legnagyobb hátránya is egyben (4. ábra). A probléma hasonló, mint a látható tartományban a világításra használt LED-ek esetében: egyetlen LED hullámhossz-féltékszélessége keskeny a mérés kivitelezéséhez, ezért jó hatásfokú és tervezhető hullámhossz-tartományú sávszélesítésre van szükség.

A mérés technikai alkalmazás miatt további követelmény az üzemeltetés egyszerűsége, az alacsony hőmérsékletfüggés, a mérés nagyon kis méreteihez viszonyított pontosság. Tehát magasabbak az elvárások.

A több hullámhosszúságon sugárzó LED megvalósítására ideálist közelítő megoldások már léteznek, például a tandem-LED vagy a kvantum-LED. A kompakt felépítés ellenére ezeken eltérő hullámhosszúságú sugárzást kibocsátó aktív rétegek működnek, amelyek elektromos és hőtechnikai paraméterei ideálisan nem állíthatók be, ezek (jellemzően két-három hullámhosszra) működőképes, de kompromisszumos megoldások.

Egy adott anyag a kimutatásához, vagy a koncentrációméréséhez legalább két-három eltérő hullám-

5. ábra. Az MFA-ban készült közös hordozóra növesztett LED-array működés közben (infravörös felvétel) és a mért spektruma.



4. ábra. Izzólámpa ($T = 3000$ K) és LED ($\lambda_k = 1250$ nm) jellemző sugárzási spektruma.

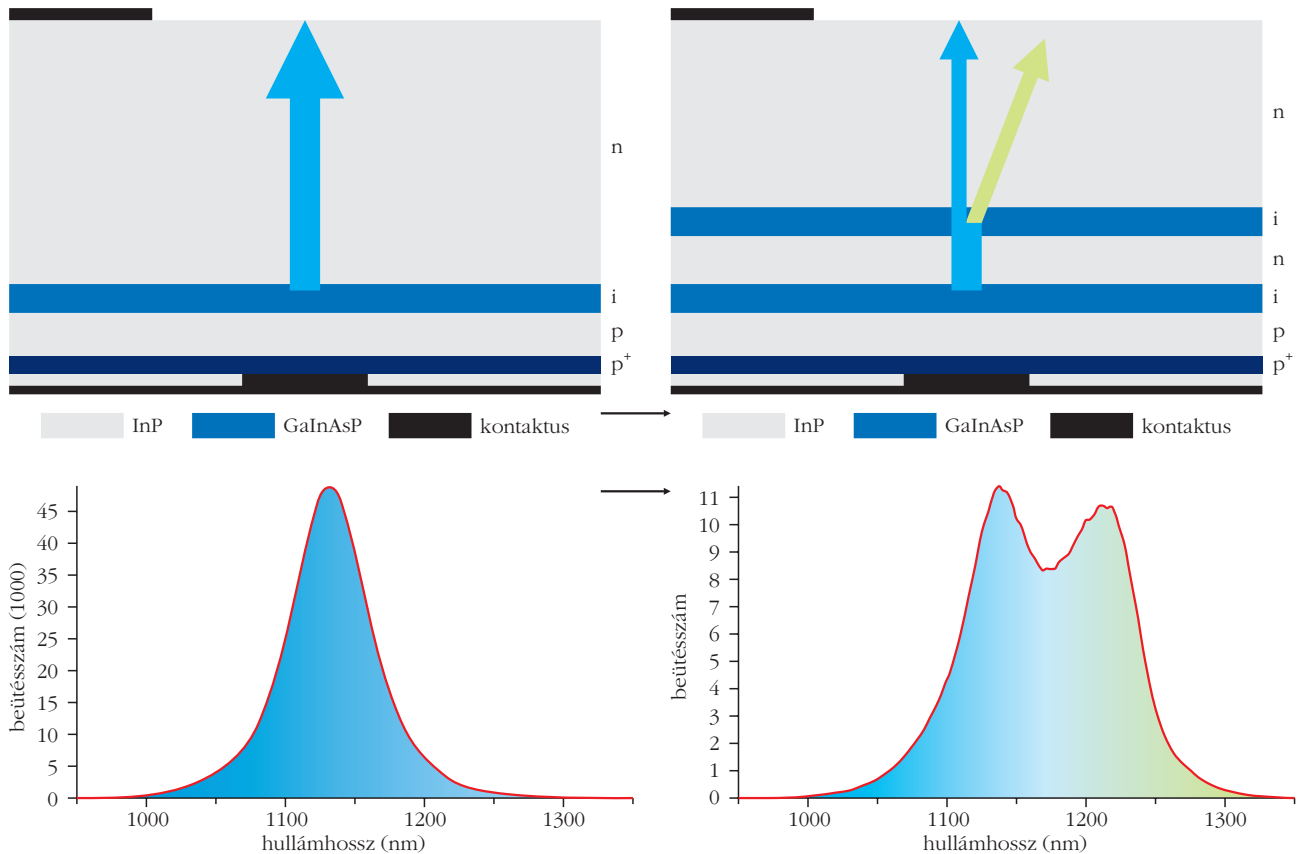
hosszon kell mérni. A jelenlegi gyakorlatban ezt több (jellemzően három) különböző hullámhosszúságú egyedi LED üzemeltetésével valósítják meg. A megoldás hátránya, hogy a sugárforrás nem teljesen pontoszerű, leképezési hibák keletkeznek, jelentős lesz a spektrum irányfüggése, valamint különböző hullámhosszon sugárzó LED-ek hőmérsékletfüggő paraméterei és öregedése különböző.

A külön tokozott LED-ek helyett az egy hordozóra épített, de különböző hullámhosszúságon sugárzó önálló diódaként növesztett, úgynevezett LED-array szerkezetek a leginkább pontoszerűek. Ilyen LED-eket mi is készítettünk és mértünk (5. ábra). A LED-array lényegesen kisebb és pontoszerűbb, mint az egy tokba épített 3 független dióda, de mérés technikai feladatokhoz igényelt pontosság elérése hasonló nehézségekbe ütközik, mint a világítástechnikai célú RGB LED-ek esetén: geometriai leképezési hibák, nehéz elektromos és hőtechnikai stabilitás, eltérő öregedés.

Az ideális sugárforrás egyetlen félvezető szerkezet, amely a méréshez szükséges tartományban széles sávban sugároz és hőmérsékletfüggése minimális. Ez esetben minden hullámhosszon egy-egy független aktív réteg sugározna, amely legjobb hatásfokra méretezve a legkisebb nyitófeszültségen működne, de ebből következően több LED-hez több meghajtó áramkör is szükséges lenne, amely további üzemeltetési nehézségeket okoz.

Sávszélesítés lumineszkáló réteggel

Egyik megoldás a LED aktív rétege mellé az azonos anyagrendszerben növesztett, de kissé eltérő összetételű lumineszkáló réteg. Az elsődleges rétegben keletkező sugárzás csak részben lép ki változatlan formában a diódából, egy része további réteget gerjeszt (már nem elektromosan, hanem a fény mint elektromágneses sugárzás által), amely anyagi összetételének megfelelő hullámhosszon lumineszkálással sugároz (6. ábra). A lumineszkáló réteg pontosan ugyanazt a feladatot látja el, mint a fénypor, de a LED szerkezetébe integrálva. Az összetétel pontos beállításával



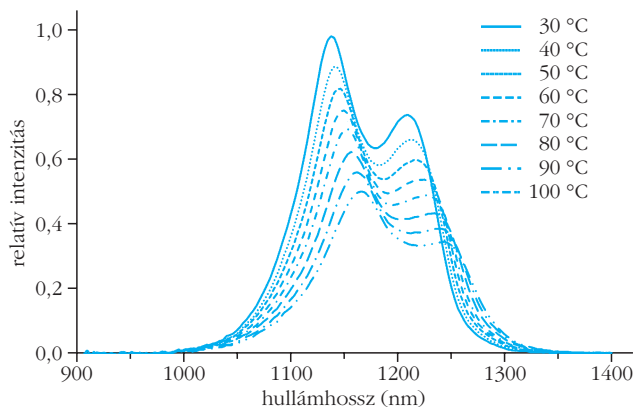
6. ábra. Sávzélesztés lumineszkáló réteggel.

pontosan hangolható a kívánt másodlagos sugárzás hullámhossza, a réteg vastagságával pedig a hullámhossz-átalakításra kerülő fény aránya. A LED a lumineszkálással így egyszerre több sugárzási csúcstól álló meg [6, 7].

A kísérlethez készült lumineszkáló LED-ek az MFA laboratóriumaiban folyadékfázisú epitaxiával készültek (LPE) GaInAsP/InP anyagrendszerben.

A lumineszkáló LED-ek alkalmasak széles hullámhossztartományban való mérési felhasználásra, ekkor a több hullámhosszon működő diódasoros érzékelőhöz elegendő egyetlen LED fényforrás alkalmazása. A két sugárzási csúcscsal rendelkező LED esetén a hőmérséklet-változás hatására bekövetkező csúcsetolódások ha-

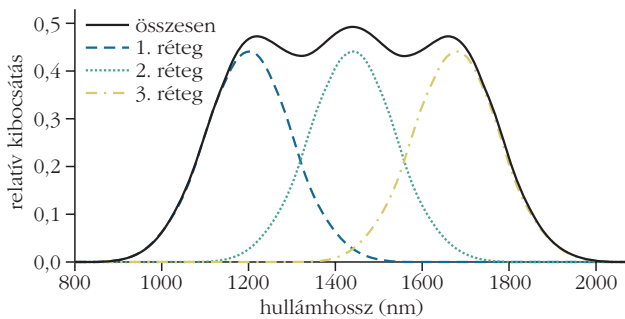
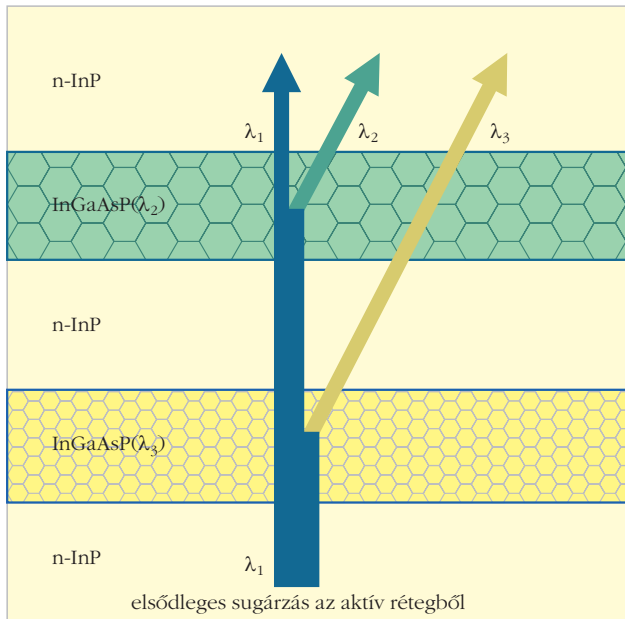
7. ábra. A két hullámhosszon, 1150–1220 nm-en sugárzó GaInAsP/InP LED sugárzása és hőmérsékletfüggése.



tásai összeadódnak. A két vagy több sugárzási hullámhossz miatt hőfokfüggésük egy-egy szakaszon közel konstans, illetve több szakaszon azonos irányú lineáris. Ennek köszönhetően másik lehetséges alkalmazási terület a kis hőfokfüggésű felhasználási igények kielégítése (7. ábra), különösen például kéziműszeres mérésekhez, amelyekben az egyszerűség miatt bonyolult áramköri korrekció, illetve a kis teljesítményfelvétel miatt termostálás nem valósítható meg.

Több lumineszkáló sáv alkalmazásával összetett rétegszerkezet alakul ki. Az így elkészített lumineszkáló rétegszerkezetet hullámhosszkonverternek nevezzük, amely egy vagy több abszorpciós rétegből és egy vagy több emissziós rétegből áll. A rétegszerkezetben ezek felváltva követik egymást. Az ilyen hullámhosszkonverter teljes vastagsága határozza meg az abszorpció nagyságát. Az egyes hullámhosszakhoz tartozó emisszió nagyságát az emissziós rétegekbe vándorolt töltéshordozók mennyisége határozza meg, tehát a töltéshordozó szabad úthosszán belüli szomszédos abszorpciós rétegek vastagsága. Ha egy abszorpciós réteg két emissziós réteggel is határos, akkor az adott rétegben elnyelt sugárzás a két emissziós rétegben megosztva konvertál új hullámhosszszakra (8. ábra).

A lumineszkáló LED hullámhossz-átalakítási hatásfokának számítása során a két hullámhosszon sugárzó LED transzmissziós és emissziós spektrumának mérése egynél nagyobb konverziós értéket mutatott, amely a konverziós réteg transzmissziójának a nö-



8. ábra. Három hullámhosszon sugárzó LED lumineszkáló rétegszerkezetének elvi felépítése és a sugárzási tartományok összeadódásának elve.

vesztett és mért transzmisszióhoz korrigálásával a mért értéknél is nagyobb arányt kaptunk, az ebből számítható hatásfok 90% feletti.

Összegzés

Összességében minden korábbinál több előnyt nyújt az egy chipes lumineszkáló rétegekkel felépített megoldás. Az egyetlen aktív réteg munkapontja könnyen beállítható. Lumineszkáló réteg alkalmazásával az el-

sődleges rétegben keletkező sugárzás csak részben lép ki változatlan formában a diódból, egy része a további rétegeket gerjeszti és lumineszkálással több sugárzási csúcstól valósít meg. Egy szerkezetben több lumineszkáló réteg is növeszthető, amelyek egymással is kölcsönhatásban állnak.

Az általunk növesztett LED egyetlen félvezető-szerkezet, amely a méréshez szükséges tartományban széles sávban sugároz és hőmérsékletfüggése minimális. Az aktív és a lumineszkáló réteg hullámhossza az anyagösszetétellel, az amplitúdó a rétegvastagsággal hangolható. Ennek köszönhetően a nagy határok között növeszthető jó hatásfokú, pontosan a kívánt hullámhosszokra hangolt és közel hőmérséklet-független LED.

A működési elv sávszélesítés céljából más anyagrendszerekben, így a látható tartományban is felhasználható. A széles látható tartomány és a nagyobb rács-állandó-különbségek miatt 2-3 réteggel részleges eredmények, esetleg a fényforrás részleges kiváltása várható.

Irodalom

1. Rakovics V., Réti I.: Infravörös diódák alkalmazása az élelmiszerek spektroszkópiai vizsgálatára. *Műszaki Kémiai Napok '08*, 2008. április 22–24. Veszprém, 64–68.
2. Zarr, R.: LEDs Line up to Replace Residential Incandescent Bulbs. *Electronic Design* (2013/02) 14–15.
3. Réti I., Ürmös A., Nádás J., Rakovics V.: Nanostruktúrák LED-ek. *Elektrotechnika* 11 (2014) 19–23.
4. E. Kupal: Phase Diagrams of InGaAsP, InGaAs and InP Lattice-Matched to (100)InP. *Journal of Crystal Growth* 67(1984) 441–457.
5. Rakovics V., Nádás J., Réti I., Dücső Cs., Battistig G.: Broad spectrum GaInAsP/InP near infrared emitting device. *Poster in section TOPS the 23rd HETECH 2014 Conference* 12–15. 10. 2014. Justus Liebig University Giessen, Germany.
6. Rakovics V.: Optical investigation of InGaAsP/InP double heterostructure wafers. *Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL)*, 2010 International Conference on, Sevastopol, Ukraine, 2010. 09. 10–14. *IEEE Communications* (2010) 216–218.
7. Rakovics V., Balázs J., Réti I., Püspöki S., Lábadi Z.: Near-Infrared Transmission Measurements on InGaAsP/InP LED Wafers. *Physica Status Solidi C Conferences and Critical Reviews* 00:(3) (2003) 956–960.
8. Rakovics V., Püspöki S., Balázs J., Réti I., Frigeri C.: Spectral characteristics of InP/InGaAsP Infrared Emitting Diodes grown by LPE. *Materials Science and Engineering B – Solid State Materials for Advanced Technology* 91–92 (2002) 491–494.
9. Rakovics V., Balázs J., Püspöki S., Frigeri C.: Influence of LPE growth conditions on the electroluminescence properties of InP/InGaAs(P) infrared emitting diodes. *Materials Science and Engineering B – Solid State Materials for Advanced Technology* 80/1–3 (2001) 18–22.



**SZÁMÍTUNK RÁD, LÉGY
A FIZIKA BARÁTJA!**

**Támogasd adód 1%-ával az Eötvös Társulatot!
Adószámunk: 19815644-2-41**

AZ ASZTROFIZIKAI R-FOLYAMAT VIZSGÁLATA RADIOAKTÍV NYALÁBOKKAL

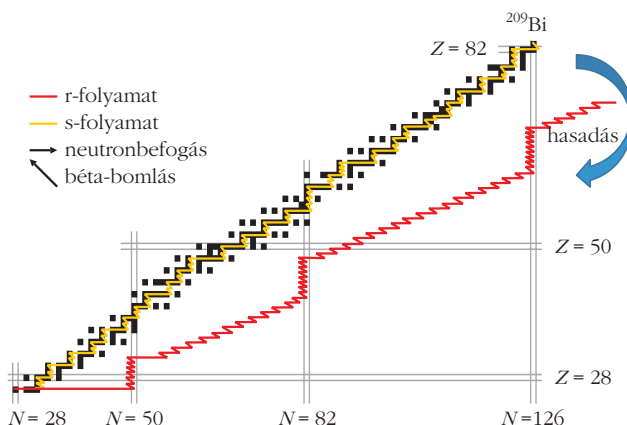
Kiss Gábor Gyula
RIKEN Nishina Center,
Radioactive Isotope Physics Laboratory

A nehéz kémiai elemek keletkezése az r-folyamatban

A Világegyetemet felépítő kémiai elemek és izotópjaik (a legkönnyebektől eltekintve) a csillagok belsejében a csillagfejlődés különböző szakaszaiban keletkeznek. A könnyű elemek jellemzően energiatermelő, töltött részecske-indukált fúziós folyamatokban jönnek létre. Tekintve, hogy az egy nukleonra jutó kötési energia a vascsoport elemeinél eléri a maximumát,¹ ezen elemeknél nehezebb magok energiatermelő folyamatokban nem jöhetnek létre. További korlát, hogy a kölcsönható töltött részecskék között fellépő Coulomb-taszítás a kölcsönható magok rendszámával nő, emiatt az alagúteffektus lejátszódásának, illetve – ennek következtében – a fúziós reakciók végbemene- telének valószínűsége meredeken csökken [1].

A csillagfejlődés számos szakaszában azonban nagy számban keletkeznek neutronok, amelyek – Coulomb-taszítás hiányában – nehezebb magokon is könnyen befogódhatnak. A vascsoport elemeinél nehezebb atommagok döntő többsége² így neutronbefogás révén jön létre. Ezen neutronbefogásos folyamatok azonban nem termelik, hanem felemésztik az energiát, így nem meglepő, hogy a Naprendszer anyagának elenyésző része, hozzávetőleg minden 20 milli- modik atommag, tartozik ebbe a kategóriába.

A rendelkezésre álló neutronok számának függvényében klasszikusan két neutronbefogásos folyamatot különböztetünk meg, amelyeket az 1. ábra mutat be. Jelen írás célja, hogy az asztrofizikai r (rapid, azaz gyors) folyamat – amely a nukleosintézis jelenleg legkevésbé ismert folyamata – vizsgálata céljából, a RIKEN kutatóintézetben végzett kísérleteket bemutassa. Az elmúlt évtizedek intenzív elméleti és kísérleti munkája ellenére az r-folyamat asztrofizikai környezete igen pontatlanul ismert. Egyes modellek szerint a nagytömegű csillagok szupernóva-robbanása során, más model-



1. ábra. A vasnál nehezebb elemek izotópjainak keletkezése neutronbefogás révén. Az úgynevezett asztrofizikai s (slow, azaz lassú) folyamat a stabilitási völgyet követi [1]. Az r (rapid, azaz gyors) folyamat során egymást követő neutronbefogások révén a neutronellátási vonal közelében található extrém neutrongazdag magok jönnek létre. A fekete négyzetek a stabil atommagokat jelölik. Ezek közül azok, amelyeket nem érint a sárga vonal és a stabilitási völgy déli oldalán találhatóak, az úgynevezett tiszta r-magok. A völgy északi oldalán található olyan stabil magokat, amelyek neutronbefogás révén nem jöhetnek létre p-magoknak nevezük [2].

lek szerint neutroncsillagok egyesülésekor, esetleg a csillagok héliumgazdag rétegében neutrínóindukált reakciókban vagy gammakitörésekben mehet végbe az r-folyamat. Magfizikai megfontolások alapján azonban tudjuk, hogy az uráncsoport elemeinek létrejöttéhez legalább 10^{22} neutron/cm³ neutronsűrűség szükséges. Ezen óriási neutronfelesleg hatására sorozatos gyors (azaz a béta-bomlásnál gyorsabb) neutronbefogások révén extrém neutrongazdag, a neutronellátási vonal közelében található magok jönnek létre. Ilyen nagyszámú neutron csak valamilyen robbanásos folyamatban, magas hőmérsékleten – legalább 1 Gigakelvin, a Nap maghőmérsékletének több százszorosa –, rövid ideig állhat rendelkezésre!

Az elmúlt években számos új tudományos eredmény látott napvilágot, amelyek az asztrofizikai r-folyamat pontosabb megértését segítik elő. A galaxisunk peremén található fémszegény csillagok összetételének vizsgálata arra a meglepő felfedezésre vezetett, hogy a báriumnál nehezebb magok ($Z > 56$) előfordulásait leíró függvény alakja gyakorlatilag megegyezik ugyanezen magok Naprendszerbeli előfordulását leíró függvénnyel. A 2. ábrán néhány ilyen csillagbeli – az abszorpciós vonalak tanulmányozásával

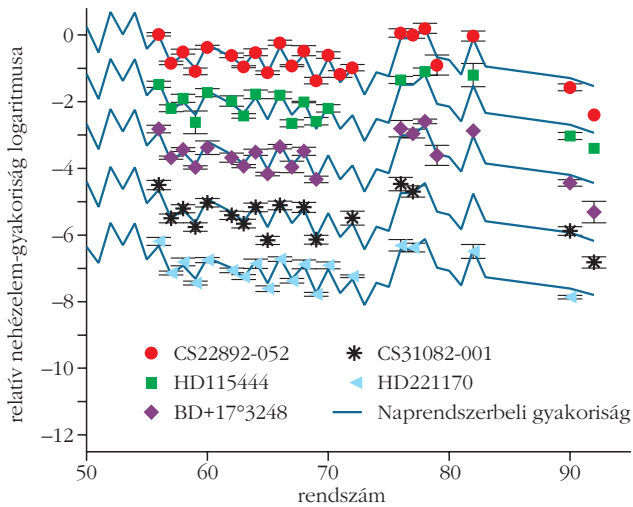
A cikk az Eötvös Loránd Fizikai Társulat szegedi Vándorgyűlésén, 2016. augusztus 27-én elhangzott planáris előadás alapján készült.



Kiss Gábor Gyula Junior Prima-díjas fizikus 2008-ban a Debreceni Egyetemen szerzett PhD-fokozatot, utána 2011-ig az olaszországi INFN-LNS kutatóintézetben az s-folyamat neutrontermelő reakcióit vizsgálta. Hazatérve az MTA ATOMKI-ban a nehéz, protongazdag magok keletkezésében szerepet játszó magreakciókat tanulmányozta. 2014-től a japán RIKEN Nishina Center vendégkutatója, kutatási témavezető, a késő neutron-, illetve protonkibocsátás jelenségének asztrofizikai szerepét vizsgálja.

¹ Az egy nukleonra eső kötési energia maximuma pontosan a ⁶²Ni izotópban van.

² Létezik azonban ~35 protongazdag, úgynevezett p-mag, amely nem jöhet létre neutronbefogással [2].

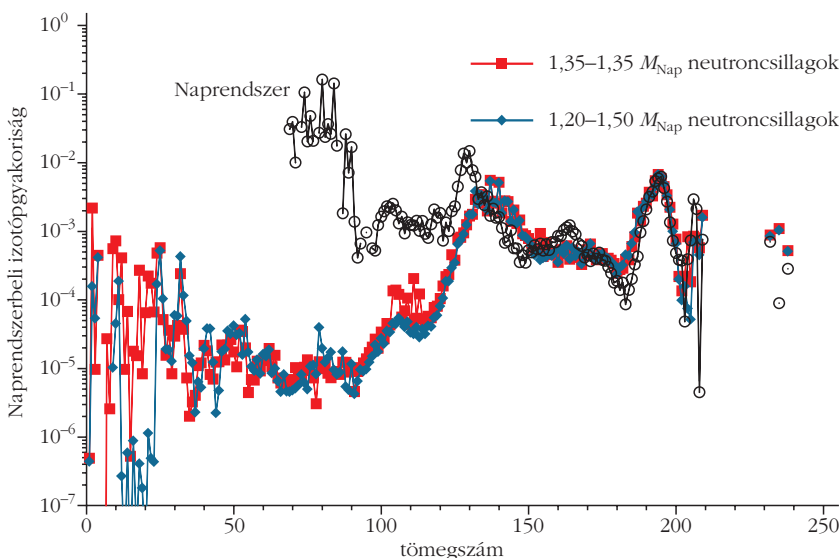


2. ábra. Galaxisunk peremén található csillagok (Cs22892-052, Cs3182-001, HD115444, Hd221170 és BD+17°3248) relatív nehéz elem ($Z > 56$) összetétele és – folytonos vonallal jelölve – a Naprendszerbeli nehézelem-gyakoriságok [3].

meghatározott – nehézelem-gyakoriság látható összehasonlítva a Naprendszert jellemző értékekkel [3]. Szintén forradalmi eredménynek tekinthető, hogy nagy vöröseltolódású – az Ősrobbanás után mindössze 2,5 milliárd évvel keletkezett – galaxisokban is nehéz elemek előfordulását sikerült kimutatni [4]. Ezen eredmények arra utalhatnak, hogy a csillagkeletkezés kozmológiai időskálán korán lejátszódhatott és az ekkor létrejött nagy tömegű csillagok szupernóva-robbanása során jöttek létre a galaxisunkban fellelhető r-magok.

Az egzotikus égítetek robbanását leíró modellek is jelentős fejlődésen mentek át az elmúlt években. Ezen modellek célja, a robbanás fizikai leírásán túl, a csillagközi térbe kijutó anyag izotóp- és mennyiségeloszlásának leírása. Érdekes ellentmondás a csillagászati észlelésekkel, hogy a nagy tömegű csillagok robbanását leíró modellek a Naprendszerbelitől nagyon eltérő

3. ábra. Két különböző tömegű neutroncsillag-kettős összeolvadásakor kilöködő anyag eloszlása a Naprendszerbeli eloszlással összehasonlítva [5].



kilöködöttanyag-eloszlást jósolnak. Ezzel szemben a másik „népszerű” r-folyamat helyszín jelölt – a kettős neutroncsillagok egyesülésekor végbemenő robbanás során lejátszódó r-folyamat – esetén, legalábbis az ónnál nehezebb magokra, a Naprendszerbeli izotópeloszláshoz nagyon hasonló függvényt eredményeznek a szimulációk.

Ezt illusztrálандó, a 3. ábrán két különböző tömegű neutroncsillag-páros összeolvadásakor kilöködő anyag eloszlása látható a Naprendszerbeli anyageloszlással összehasonlítva [5].

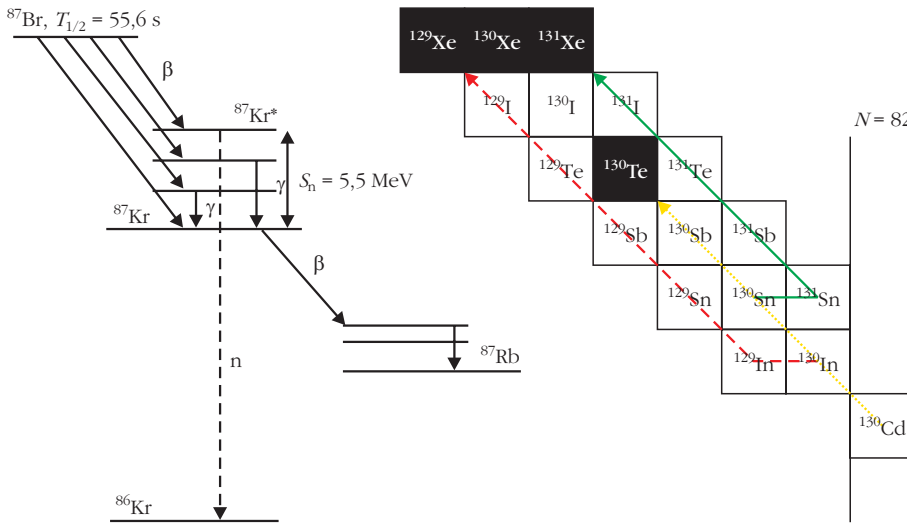
Az ellentmondás feloldásához a kulcs a magfizikai adatok – tömegek és a béta-bomlásokat jellemző mennyiségek, úgymint felezési idők és késleltetett neutronkibocsátási valószínűségek – pontos mérése vezethet [3]. Napjainkban a radioaktívnyaláb-gyárakban lehetővé vált/válik az r-folyamatösvényen található magok vizsgálata. Ebben a cikkben azokat a méréseket szeretném bemutatni, amelyeket az ezen a kutatási területen vezető szerepet játszó – Japánban, a Tokió melletti Wakóban található – RIKEN Nishina gyorsítóközpontban végeztünk az r-folyamat során végbemenő béta-bomlások jobb megértése céljából.

Béta-bomlások a stabilitási völgytől távol

A neutronbefogások révén létrejövő nehéz izotópok (adott izotópláncok menti) relatív gyakoriságát a neutronbefogások Q -értékei,³ illetve az ezzel ellentétes hatást kifejtő, az asztrofizikai közeg hőmérsékletétől függő fotobomlások határozzák meg. A stabilitási völgyhöz közelebb a Q -értékek magasak, a neutronbefogásokat a magas hőmérséklet miatt előforduló fotobomlások nem képesek egyensúlyban tartani. A neutronelhullatási vonal felé haladva azonban a neutronbefogások Q -értékei csökkennek, termikus egyensúly jön létre az (n,γ) és (γ,n) reakciók között, amely adott izotóplánc mentén egy maximummal rendelkező gyakoriságeloszlást

eredményez. Mivel egy páros neutronszámú mag kisebb valószínűséggel fog be további neutron, ezért a (hőmérséklettől és a rendelkezésre álló neutronok számától függő) maximum szinte mindig páros neutronszámú magnál van. Ezen magok az úgynevezett „várakozási pontok”, ahol az r-folyamat béta-bomlás révén eggyel nagyobb rendszámú magokat kezdhet felépíteni. Ezt követően a neutron-sűrűség és a hőmérséklet függvényében a következő izotóplánc mentén is beáll a fentebb vázolt egyensúly.

³ A Q -érték a reakció energiamelegéről ad információt, a pozitív Q -értékű (exoterm) reakciók energiát termelnek, a negatív Q -értékű (endoterm) reakciók végbemeneteléhez pedig energiára van szükség.



4. ábra. A ^{87}Br -mag bomlássémája és a késleltetett neutronok szerepe az r-folyamat késői szakaszában. A ^{87}Br -mag béta-bomlása a ^{87}Kr -mag alap- és gerjesztett állapotaira vezet. A gerjesztett állapotok gamma-sugárzás kibocsátásával kerülnek az alapállapotba, majd újabb béta-bomlás következik be. Amennyiben azonban a ^{87}Br -mag béta-bomlása a ^{87}Kr -mag S_n neutronszerparációs energiájánál, azaz $S_n \sim 5,5$ MeV-nél magasabb gerjesztett állapotokra vezet, előfordulhat, hogy a ^{87}Br -mag béta-bomlását neutronkibocsátás követi. A jobb oldalon látható ábra a béta-késleltetett neutronok szerepét ábrázolja a ^{130}Cd „waiting point” mag stabilitási völgy felé vezető lehetséges bomlásain keresztül. Ezen mag sorozatos béta-bomlások révén ^{130}Te -maggá alakul (középső, pontozott nyíl). Amennyiben azonban bomlását neutronkibocsátás követi (az esetek körülbelül 3,5%-ban), a sorozatos béta-bomlások ^{129}Xe -magra vezetnek (bal oldali, szaggatott nyíl). A korábban kibocsátott béta-késleltetett neutronok be is fogódhatnak, példánkban így (is) keletkezhet a stabil ^{131}Xe -mag (jobb oldali, folytonos nyíl).

A sorozatos neutronbefogásokat a zárt neutronhéjjal rendelkező magok szintén megakasztják, mint az az 1. ábrán is látható. Ennek magyarázata a héjmodellben rejlik: a mágikus neutronszámra vezető neutronbefogások Q -értékei sokkal magasabbak, mint a további neutronbefogásoké. Ilyen izotópokat elérve a béta-bomlás esélye megnő, ennek következtében pedig az r-folyamat eltávolodik a neutronelhullatási vonaltól. A stabilitási völgyhez közeledve azonban a béta-bomlások felezési ideje egyre hosszabb, így az r-folyamat egy adott ponton „leküzd” a zárt neutronhéjak jelentette akadályt, és tovább folytatja az egyre nehezebb magok felépítését. Modellszámítások szerint az r-folyamat körülbelül az $A \sim 260$ -as tartományig építheti fel az elemeket. Ezt a tömegtartományt elérve a létrejött magok újabb neutron befogva hasadnak, a hasadványok pedig visszakerülnek az r-folyamat áramába és újabb, egyre neutrongazdagabb magok felépítésében vesznek részt. A neutronfluxus megszűntével az r-folyamat során létrejött magok sorozatos béta-bomlással kerülnek vissza a stabilitás völgyébe és építik fel az adott kémiai elem neutronban leggazdagabb stabil izotópjait.

Mivel a neutronbefogások a zárt neutronhéjjal rendelkező magok környezetében lelassulnak, így ezen magok gyakorisága megnő. Ez a magyarázata az $A \sim 80$, $A \sim 130$ és $A \sim 195$ tömegszámoknál található izotópok magasabb előfordulásának. Fontos megjegyezni, hogy a neutronfluxus megszűntét megelőző, termikus egyensúlyjal jellemezhető – páros neutronszámú magok által dominált – izotópgyakoriságok azonban jelentősen eltérnek a Naprendszerbeli tiszta r-magok előfordulásától [1, 5]

Ennek magyarázata, hogy a stabilitási völgytől távolabbra kalandozva a béta-bomlás érdekesebb formái is megfigyelhetők. Amennyiben a béta-bomlás a leányelemen a részecske (például neutron) szeparációs energia felett elhelyezkedő gerjesztett állapotokra vezet, a bomlást részecskekibocsátás követheti. Ezen – béta-késleltetett részecskekibocsátásnak nevezett – jelenség energetikai jellemzőit a 4. ábra mutatja a neutrongazdag ^{87}Br -mag béta-bomlásának példáján keresztül. A $T_{1/2} = 55,6$ s felezési idejű ^{87}Br -mag béta-bomlása a ^{87}Kr -mag alap-, illetve gerjesztett állapotaira vezet. A gerjesztett állapotok többsége gamma-sugárzás kibocsátásával a ^{87}Kr -mag alapállapotába bomlik, majd az újabb béta-bomlás a – stabilnak tekinthető – ^{87}Rb -magra vezet. Azon-

ban van egy másik lehetséges bomlási folyamat is! Amennyiben a ^{87}Br -mag béta-bomlása a ^{87}Kr -magban a neutronszerparációs energia ($S_n \approx 5,5$ MeV) feletti gerjesztett állapotokra vezet, előfordulhat (az esetek nagyjából 2,5%-ban), hogy nem gamma-sugárzás kibocsátása, hanem neutronemisszió követi a ^{87}Br -mag béta-bomlását. Ezt a jelenséget, amelyet a 4. ábrán szaggatott vonal jelöl, nevezük késleltetett neutronkibocsátásnak. A stabilitási völgytől távolodva a késleltetett neutronkibocsátás valószínűsége növekszik. Ennek magyarázata, hogy a béta-bomlás Q -értéke folyamatosan nő, illetve a részecskeszerparációs energiák egyre alacsonyabbak, így annak valószínűsége is egyre magasabb, hogy a bomlás a leányelem magas, a részecskeszerparációs energia feletti, gerjesztett állapotaira vezet. Fontos megjegyezni, hogy az r-folyamat során olyan extrém neutrongazdag magok is létrejönnek, hogy a béta-bomlásukat követően két, illetve három neutronkibocsátásra is sor kerülhet!

A Nemzetközi Atomenergia Ügynökség adatbázisa [6] szerint jelenleg 241 késleltetett, egy neutron kibocsátásával bomló magot ismerünk. További 18, illetve 4 (^{11}Li , ^{14}Be , ^{17}B és ^{31}Na) atommag esetén a béta-bomlás a leánymag olyan magasan gerjesztett állapotára vezet, hogy kettő, illetve három késleltetett neutron kibocsátása is megtörténhet. A késleltetett neutronkibocsátást a P_n -értékekkel jellemezzük, ez a szám azt mutatja meg, hogy a béta-bomlások hány százalékát követi legalább egy neutron kibocsátása. Továbbá, a P_{1n} -érték az egy neutron kibocsátásának, a P_{2n} -érték a két neutron kibocsátásának stb. valószínűségét mutatja meg (tehát $P_n = P_{1n} + P_{2n} + \dots$, illetve $P_{0n} = 100\% - P_n$). A ^{86}Ga -mag béta-késleltetett neutronkibocsátását

például a következő P_n -értékek jellemzik: $P_{1n} \approx 20\%$, $P_{2n} \approx 60\%$, illetve $P_{0n} \approx 20\%$, tehát a bomlások mindösszesen egyötödét nem követi neutronkibocsátás. Fontos különbséget tenni aközött, hogy egy mag esetén kísérletileg igazolt a késleltetett neutronkibocsátás és aközött, hogy megmértük a megfelelő P_n -értékeket: a 241 béta-késleltetett egy neutron kibocsátó mag közül kevesebb, mint a fele esetén ismerjük a kibocsátási valószínűséget. A 18 ismert késleltetett két neutron kibocsátó mag közül csak három (^{17}B , ^{31}Na , ^{86}Ga), illetve a 4 kísérletileg igazolt késleltetett három neutron kibocsátó mag közül csak egyetlen (^{17}B) mag esetében ismertek a P_{2n^-} , illetve P_{3n^-} -értékek [6].

A r-folyamat késői szakaszában, az $(n, \gamma) - (\gamma, n)$ egyensúly megszűntét követően a béta-késleltetett neutronkibocsátás – és más magok általi neutronbefogás – újabb béta-bomlás, neutronkibocsátás, ... folyamat többször lejátszódik, ezáltal kisimul a termikus egyensúlyt jellemző páros neutronsámú magok dominálta izotóp-előfordulás. Ez a folyamat – amelyet a 4. ábra jobb oldalán, a ^{130}Cd -mag bomlásán keresztül szemléltetnek – vezet a Naprendszerben megfigyelhető sima függvénnyel leírható izotópgyakoriságokhoz.

A különböző r-folyamatmodellek jelenleg nagyon széles asztrofizikai bemenő paraméter (hőmérséklet, szabad neutronok száma, időskála stb.) tartományt és bizonytalan magfizikai inputadatokat (úgy mint tömegek, béta-bomlási paraméterek) használnak. Az extrém neutrongazdag magok béta-bomlásainak jobb megértése – azaz például a felezési idők és béta-késleltetett neutronkibocsátási valószínűségek mérése – az r-folyamat pontosabb modellezését teszik lehetővé, megszorítva az asztrofizikai bemenő paramétereket is [3].

A béta-bomlások vizsgálata radioaktív nyalábokkal

A modern radioaktív nyalábokat előállító gyorsítók fejlődésével napjainkra lehetővé vált – például az ez irányú kutatásban világvezető RIKEN Nishina gyorsítóközpontban – számos, az r-folyamatban keletkező extrém neutrongazdag mag megfelelő intenzitású előállítása. A RIKEN-ben az AVF-ciklotron és RILAC-injektorok⁴ által szolgáltatott ionnyaláb további gyorsítását egymást követő ciklotron-típusú részecskegyorsítók végzik.⁵ A végső gyorsítási fokozat a jelenleg működő legnagyobb teljesítményű, $K = 2600$ MeV szupravezető SRC-ciklotron, amely az urán 238-as izotópját 345 MeV/nukleon energiára, a fénysebesség közel 70%-ára képes gyorsítani. Az így felgyorsított nehéz ionok az elsődleges céltárggyal (általában be-

rillium vagy ólom) ütközve „széttöredeznek”, változatos tömegű, illetve neutron-proton arányú, radioaktív fragmentumok jönnek létre.

Az így létrehozott radioaktív nyaláb „tisztítását” a BigRIPS-szeparátor végzi, azaz a létrehozott izotópok sokaságából a szupravezető elektromágnesek és részek pontos beállításával kiválaszthatjuk a kísérleteinkhez szükséges magokat. Kísérleteinket – a beállításoktól függően – általában 5-25 magból álló, úgynevezett „koktélnyalábbal” végezzük. A koktélnyaláb használata előnyös számunkra, hiszen így egy kísérletben – költséghatékony módon – számos felezési időt, nívósémát, illetve P_n -értéket tudunk meghatározni. A magok azonosítását energiaveszteség – repülési idő technikával kivitelezük. A nagy energiával rendelkező ionnyaláb plasztikszcintillátorokon, illetve ionizációs kamrákon áthaladva csak minimális energiát veszít (és kicsit szóródik), ami mérésünket így nem zavarja, azonban a részecskék azonosításához feldolgozható minőségű jel keletkezik. A nyalábot alkotó részecskék repülési ideje és energiavesztesége különbözőképpen függ tömegüktől, töltésüktől és sebességüktől, tehát ha ezen mennyiségeket egymás függvényében ábrázoljuk a különböző magok megfelelően elkülönülnek egymástól.

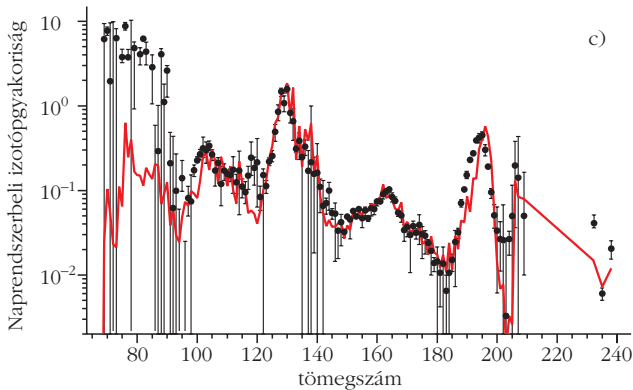
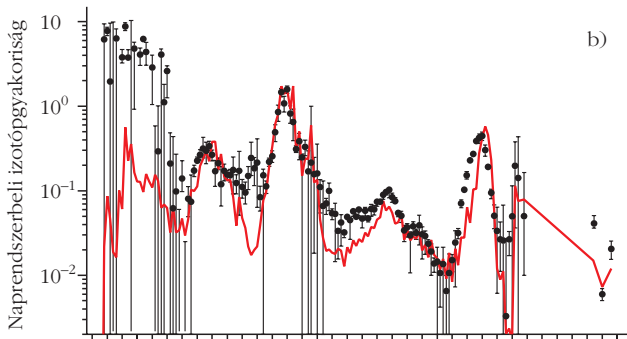
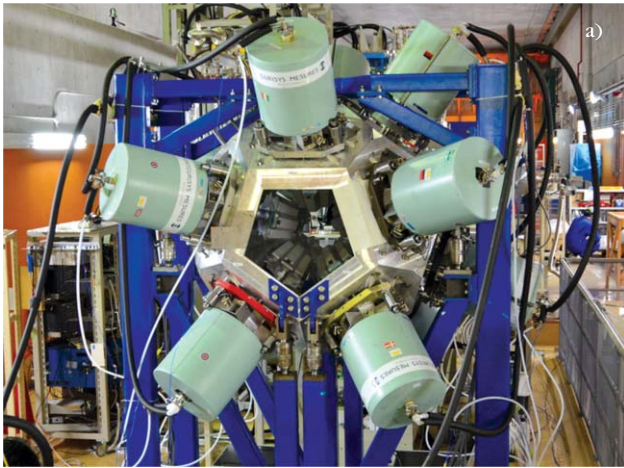
Kísérleteink során koincidenzában mérjük a koktélnyalábot alkotó magok béta-bomlásakor kibocsátott elektronokat, neutronokat és gamma-legerjesztődést. A kísérleti elrendezés két részből áll: a koktélnyalábot szegmentált szilíciumdetektorokból álló rendszerbe „lőjük”, ahol megáll a nyaláb és bekövetkezik a bomlás, amely során a kibocsátott gamma-részecskéket, illetve neutronokat egy másik detektorrendszerrel mérjük. A kísérlet által lefedett tömegtartománytól függően 3-8 darab 1 mm vastag szilíciumdetektort használtunk. A különböző magok energiavesztesége a detektor anyagában, rendszámuk függvényében más és más, így a legnehezebb magok az elülső, míg a könnyebb magok a hátulsó szilíciumdetektorokban állnak meg. Például, míg a 2014 őszén végrehajtott, ritkaföldfém-elemek keletkezésének és megszerkeztetének megértését célzó kísérlet során 3 réteg szilíciumdetektor elég volt a nehéz neodímium- – erbiummagok megállítására, addig a 2016 tavaszán kivitelezett (tömegméréssel egybekötött) neutrongazdag cink- – kryptonmag tartományban 7 detektorra volt szükség. A radioaktív magok teljes lefékeződését béta-bomlás követi. Míg az implantációs események során GeV nagyságú energia kerül leadásra, a bomlást nagyságrendekkel kisebb, maximum néhány MeV energiájú elektronok kibocsátása követi, így a különböző eseményeknek megfelelő jelek megkülönböztethetők.

Az EURICA-együtműködés keretében⁶ mintegy 140 izotópra határoztunk meg elsőként felezési idő-értéke-

⁴ Variálható frekvenciájú lineáris nehézion-gyorsító.

⁵ RRC ($K = 540$ MeV ring ciklotron), fRC ($K = 570$ MeV rögzített frekvenciájú ciklotron), IRC ($K = 980$ MeV, közbenső ciklotron) végül SRC ($K = 2600$ MeV szupravezető ciklotron). A ciklotrontípusú gyorsítók teljesítményének jellemzésére a K -értéket használjuk, összehasonlításképpen a hazai magfizikai kutatások számára rendelkezésre álló legnagyobb teljesítményű – az ATOMKI-ban található – MGC-20 ciklotron típusú gyorsítójának K -értéke 20 MeV.

⁶ Jelen cikkben – helyhiány miatt – csak az új felezési idők szerepéről írok azonban fontos megjegyezni, hogy az együtműködés keretében a stabilitási völgytől távol fekvő magok szerkezetét (deformáció, héj- és alhéjlezáródás, izomer állapotok, izospin-szimmetria stb.) és egzotikus bomlási formákat (például 2 proton kibocsátás) is tanulmányoztunk.



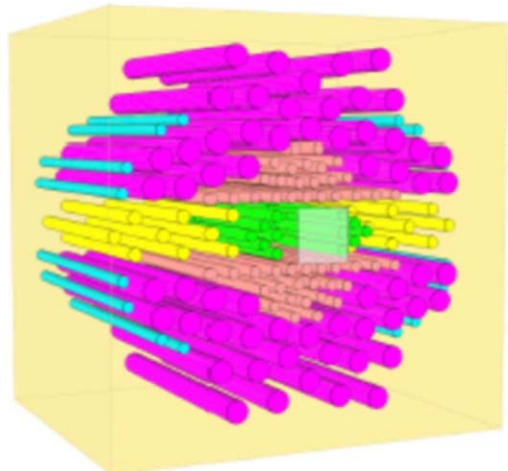
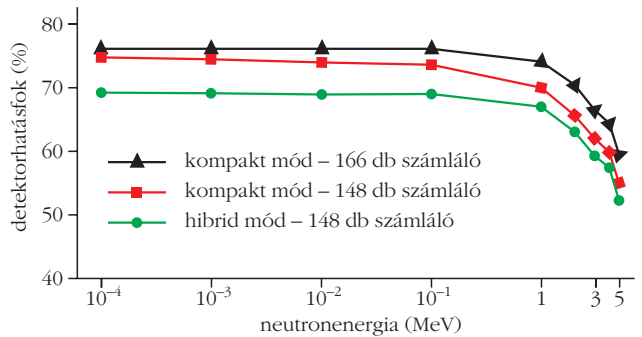
5. ábra. Az EURICA gamma-detektorrendszer fényképe, illetve az EURICA együttműködés keretében meghatározott új felezési idők hatása az r-folyamatszimulációkra. Az alsó, b) és c) ábrákon a Naprendszerbeli r-maggyakoriságok (fekete pontok) és az r-folyamatszimulációk (folytonos vonal) összehasonlítása látható: az első, b) esetben az irodalmi felezési idők, a második, c) esetben a RIKEN-ben 2012-től az EURICA-együttműködés keretében meghatározott új felezési idők figyelembevételével végeztük az r-folyamat modellezését [7].

ket (és körülbelül ugyanennyi esetben jelentősen pontosítottuk az irodalmi adatokat). Az együttműködés neve az *Euroball-RIKEN Cluster Array* angol kifejezésből ered: a szilíciumdetektorokat körülvevő 84 darab, nagy tisztaságú germániumdetektort 12 darab, egyenként 7 detektort tartalmazó „fürtbe” rendeztük. Az 5. ábra tetején az EURICA-detektorrendszer fényképe látható. A szilíciumdetektorokban megálló radioaktív magok béta-bomlását és az ezt követő gamma-legerjesztődéseket koincidenzában mérve, a mag felezési ideje nagy pontossággal meghatározható. Az

új felezési időkkel elvégzett r-folyamatszámítások sokkal jobban egyeznek a Naprendszerbeli r-izotóp-gyakoriságokkal, mint azt az 5.c ábra mutatja [7].

A bomlást követő neutronok mérését a BRIKEN-detektorrendszerrel végezzük. A detektorrendszer ^3He -gázt tartalmazó számlálócsövekből áll. A neutronok és a ^3He -gáz kölcsönhatása során trícium és proton keletkezik 765 keV kinetikus energiával. A proporcionális számlálókat egy megközelítőleg 1 m^3 térfogatú, nagy sűrűségű polietilénből készült moderátorba ágyaztuk,

6. ábra. A késleltetett neutronkibocsátási valószínűségek mérésére használt kísérleti elrendezés hatásfokának szimulációja (föül), a berendezés fényképe (középen), illetve a különböző intézetekből származó számlálócsövek elhelyezkedése a polietilén moderátorban (alul).



amelyre a nagyenergiás neutronok lassítása miatt van szükség. A rendszer rugalmas kialakítású, a mérési terv függvényében két elrendezést használhatunk. A 148 darab számlálóból és két darab „clower” típusú HPGe detektorból álló elrendezés béta-neutron-gamma koincidenciamérésekre ad lehetőséget. Ezt az elrendezést ~70%-os neutronszámlálási hatásfok és 1% gamma-detektálási hatásfok ($E_\gamma = 1,33$ MeV esetén) jellemzi. Amennyiben a germániumdetektorokat nem kívánjuk használni, újabb számlálócsövek behelyezésére nyílik lehetőség, amelynek eredményeképp ~76% neutrondetektálási hatásfok érhető el. Így elmondhatjuk, hogy az amerikai Oak Ridge Nemzeti Laboratórium, a németországi GSI, az orosz JINR (Egyesített Atommagkutató Intézet), a spanyolországi UPC (Katalán Tudományegyetem) és a japán RIKEN kutatóintézet együttműködésében felépített BRIKEN-rendszer a késleltetett neutronok detektálására valaha épített legnagyobb hatásfokú rendszer. A számlálócsövek elhelyezésének megtervezésekor nemcsak a legnagyobb hatásfok elérésére törekedtünk, hanem konstans közeli hatásfok-energia függvény elérése is célunk volt. Ennek oka, hogy a jelenlegi berendezéssel „csak” számláljuk a neutronokat, energiájukat nem mérjük. Mivel a stabilitási völgytől távoli magokról van szó, a késleltetett neutronok energiájáról nem rendelkezünk részletes kísérleti információval. Héjmodellszámítások alapján (amelyeket a stabilitási völgyhöz közelebb található, késleltetett neutront kibocsátó magok, például: $^{87,88}\text{Br}$, ^{137}I -magok segítségével ellenőriztünk) azonban tudjuk, hogy ezen neut-

ronok energiája általában 1 MeV-nél alacsonyabb. Detektorunk hatásfokfüggvénye 2,9%-on (166 számlálócsöves elrendezés), illetve 3,6%-on (148 számlálócső és két germániumdetektor) állandó a 0–1 MeV tartományban, ezért a P_n -értékek meghatározásának – a neutronenergia-mérés hiányából származó – szisztematikus hibája kisebb, mint 4%, szemben a korábbi hasonló detektorok 10%-ot meghaladó bizonytalanságával. A 6. ábrán a BRIKEN-detektor hatásfok-energia függvénye, az utolsó számlálócső behelyezéséről készített fényképem, illetve a számlálócsövek elhelyezkedését ábrázoló sematikus rajz láthatók.

A 2016 őszi és 2017 tavaszi félévek során öt, a RIKEN Program Tanácsadó Testület által jóváhagyott mérési kampányban neutrongazdag ^{28}Fe - és ^{65}Tb -izotópok között ~160 új mag esetében fogjuk az egy, két, illetve három késleltetett neutronkibocsátás valószínűségeit meghatározni, ezzel mintegy megduplázva a rendelkezésre álló adatbázis méretét. Az új kísérleti eredmények várhatóan az r-folyamat modelljei pontosságát fogják lehetővé tenni, illetve segítenek a jövőben a GSI-ben végrehajtandó mérések tervezésében.

Irodalom

1. C. Iliadis: *Nuclear Physics of Stars*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA (2007).
2. Gy. Gyürky, *Fizikai Szemle* 60 (2010) 37.
3. J. J. Cowan, *Nature* 440 (2006) 27.
4. J. Prochaska, *Nature* 423 (2003) 57.
5. S. Goriely és mts., *Astrophysical Journal Letter* 738 (2011) L21.
6. Nemzetközi Atomenergia Ügynökség, INDC (NDS)-0599 összefoglaló, <https://www-nds.iaea.org/publications/indc/indc-nds-0599>
7. G. Lorusso és mts. *Physical Review Letters* 114 (2015) 1925201.

SZIGETELŐ ANYAGOK IONNYALÁBOS ANALÍZISE

Szilágyi Edit, Kótai Endre

MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont, Részecske- és Magfizikai Intézet

Dielektrikumokat az anyagtudomány számos területén használnak, mint például űrtechnikában (hőszigetelő bevonatok), optoelektronikában, napelemeknél vagy polimerek széleskörű alkalmazásainál. Az ionsugaras mérőmódszerekkel, nevezetesen a visszaszórás-

szos spektrometriával (BS), a rugalmasan meglökött magok detektálásával (ERD), a magreakciós analízissel (NRA) a dielektrikumok vizsgálata során – mint minden más anyag esetén is – elsősorban a mintákat alkotó anyagok, szennyezők mélységeloszlása határozható meg. Az ionsugaras nukleáris analitikai (IBA, Ion Beam Analysis) mérőmódszerek lényege, hogy néhány keV-től néhány MeV-ig terjedő energiájú

A cikk az Eötvös Loránd Fizikai Társulat szegedi Vándorgyűlésén, 2016. augusztus 26-án elhangzott előadás alapján készült.



Szilágyi Edit, az MTA doktora, az MTA Wigner FK Nukleáris Anyagtudományi Osztály és az ionnyaláb-fizika kutatócsoport vezetője. Nevéhez fűződik az ionnyalábos analitikai mérőmódszerek energia- és mélység-felbontóképességének kísérleti és elméleti meghatározása, valamint e módszerek spektrometria-számításába beépítette az energiaelmosódás hatását is. A módszerfejlesztéseken túl az ionbesugárzás felületmódosító hatásai, vékony- és multirétegek, valamint nanosztruktúrák vizsgálatával is foglalkozik.



Kótai Endre, a fizikai tudomány kandidátusa, az MTA Wigner FK külső munkatársa. Főbb kutatási területe az ionnyaláb-analitika, ionimplantáció fizikai folyamatainak tanulmányozása. Nevéhez fűződik a több külföldi laboratóriumban is használt RBX szimulációs program kifejlesztése.

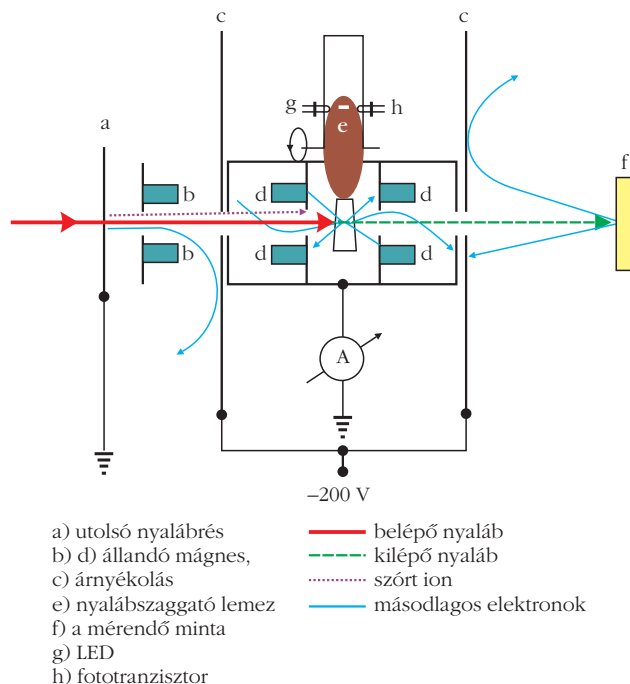
ionokkal bombázzuk az analizálni kívánt minta felületét, majd a minta atomjain kiváltott atomfizikai és magfizikai reakciók termékeit (röntgen- vagy γ -sugárzást, könnyű ionokat: p, d, α , esetleg neutron) detektáljuk. A reakciótermékek energiája függ attól, hogy milyen mélységben, milyen tömegű és rendszámú atomon, milyen reakció történt. Így általában egyidejűleg van lehetőség elem- és mélységanalízisre is [1–4]. A módszerek elterjedésében a félvezető detektorok megjelenése játszott szerepet.

Az elmúlt években egyre gyakrabban használják az ionlumineszcencia módszerét is. Ionnyaláb-kölcsönhatás során sok szigetelő anyag erős fénykibocsátást produkál, ami felhasználható az anyagok hibaszervezetének tanulmányozására. A fény detektálásával, valamint energiájának és intenzitásának meghatározásával információ nyerhető az anyagban lévő színcentrumokról, hibahelyekről, illetve ezek kémiai környezetéről [5].

Szigetelő anyagokból készült minták azonban az ionnyalábos besugárzás során világíthatnak, *feltöltődhetnek, illetve szikrázhatnak*. Egyik jelenség sem segíti az ionnyalábos kísérletek végzését, illetve a mérési eredmények értelmezését. A fenti jelenségek természetesen egyszerre zajlanak, így egyszerre kell megoldást találnunk az összes jelenségre, hogy pontos méréseket tudjunk végezni elektromosan szigetelő anyagokból készült mintákon is.

Árammérés

Az ionnyalábos analitikai mérések értelmezéséhez pontosan kell ismerni az analizáló ionok számát, függetlenül a minták szerkezetétől, összetételétől és az alkalmazott geometriától. Az ionok számát a begyűjtött töltésből határozzuk meg. Ez történhet a mintán keresztül áramintegrálással is, de ebben az esetben szigetelő minta nem mérhető. A pontos árammérést megnehezíti, hogy az ionok nemcsak szóródnak a szilárd anyagok atomjain, hanem úgynevezett másodlagos elektronokat keltenek. A mintát elhagyó elektronok száma függ az ion fajtájától, energiájától, a belépés szögétől, a minta összetételétől. Egy ion akár több elektront is kelthet. A mérés során ezért gondoskodni kell arról, hogy az elektronok ne szóródjanak szét, hanem azokat tereljük vissza a töltésmérő eszközbe. Ilyen eszköz a magfizikusok által már régóta használt Faraday-kalitka. A kalitka egy zárt doboz, amelynek egy szűk nyílása van csak, ahol az ion beléphet. Annak valószínűsége, hogy a szórt ionok vagy a kilökött elektronok kijussanak a kalitkából, igen csekély, ezért a kalitkába jutott töltések mérésével, kicsi hibával az ionok által hordozott töltéseket tudjuk megkapni. A módszer hátránya, hogy a mintát és a detektort is a kalitkában kellene elhelyezni úgy, hogy a mintát forgatni is tudjuk. Igen gyakran az egész vákuumkamrát tekintik egy Faraday-kalitkának, de szivárgó áramokkal ilyenkor is számolni kell. Szigetelő minták mérésekor a szikrázás igencsak zavaró hatású lenne, a feltöltődés



1. ábra. A transzmissziós Faraday-kalitka elvi vázlata [4, 6].

elkerülése érdekében a kamrába behelyezett elektronforrás pedig meghamisítaná az árammérést.

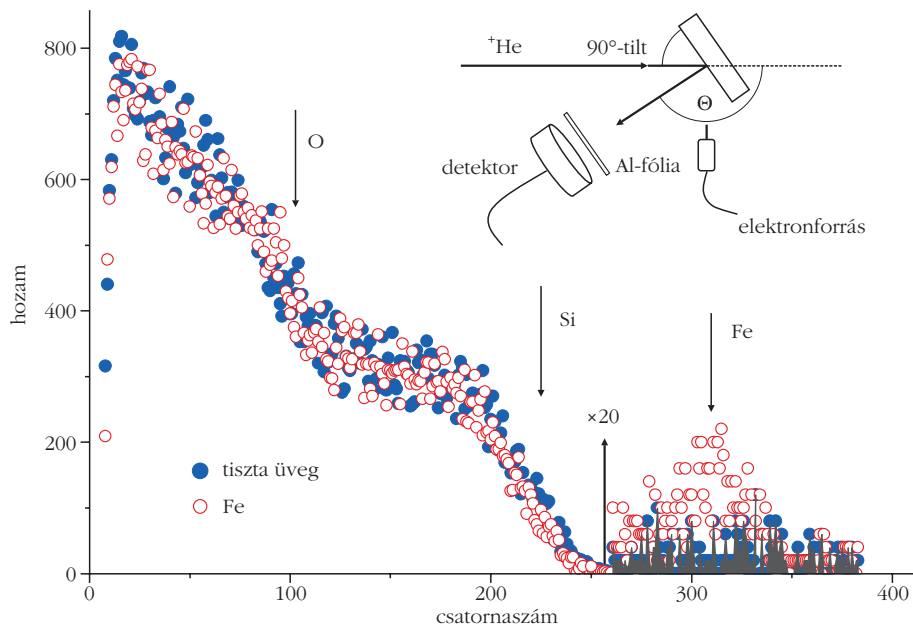
Csoportunkban már több mint 25 éve használunk egy – volt kollégánk, *Pásztai Ferenc* által kifejlesztett – transzmissziós Faraday-kalitkának nevezett árammérőt [4, 6], amely sokkal jobb megoldást nyújt az árammérésre. Az eszköz elvi ábrája az 1. ábrán látható. A kalitkán két, a nyaláb útvonala mentén elhelyezett lyuk található. Az egyikben belép az ionnyaláb, a másikon kilép, majd eljut a vizsgálandó mintára. A kalitkában egy forgó lemez található, amely periodikusan elzárja a nyaláb útját. Amikor a nyalábút zárva van, a berendezés úgy működik, mint egy valódi Faraday-kalitka, a nyalábút nyitott állapotában pedig mérhető a mintáról szórt spektrum. A zárt és a nyitott állapotok időtartamainak pontos beállításával – feltételezve, hogy a nyalábrám egy periódus alatt nem változik – pontosan meghatározható az ionok száma. Arról, hogy a mérőberendezés más elemeiben az ionok által keltett másodlagos elektronok ne jussanak a kalitkába, a be- és kilépő rések elé helyezett, feszültség alatt álló úgynevezett „szupresszor”-lemezek gondoskodnak. Ezzel a berendezéssel 1%-nyi pontossággal határozható meg az ionok száma [6]. Így ez a megoldás ideális szigetelő minták mérésére is.

Fénykibocsátás

A felületi záróréteges félvezető-detektorok kiürített rétegében fény hatására is keletkezik töltéshordozó (elektron-lyuk pár). Ez egyrészt hamis jeleket generál, és ezzel „zajossá” teszi a mért spektrumokat, másrészt olyan nagy áramok is folyhatnak a detektorokban, amelyek már tönkre is tehetik őket. A jelenség ellen

aránylag egyszerűen lehet védekezni: biztosítani kell, hogy a detektorok érzékeny tartományát ne érje fény. Ez történhet egy egyszerű vékony fényzáró fólia általi takarással is. A 2. ábrán erre mutatunk egy példát. Az alkalmazott 1 μm vastag alumíniumfólia ugyan rontja a mérés energiafelbontását, de lehetővé teszi a vas mennyiségének meghatározását [7].

A fényvédő fólia alkalmazásánál ma már sokkal jobb megoldást nyújt a fényre érzéketlen, úgynevezett vak detektorok használata. A vak detektorokra már gyárilag vékony fényátmeresztő réteget (például alumíniumot) párolnak. Ennek következtében az ilyen detektorok energiafelbontása csak egy kicsit rosszabb (~15 keV), mint a legjobb felbontású félvezető detektoroké (~12-13 keV).



2. ábra. Nitrogénnel besugározott (implantált) fémek kopásának mérése Rutherford-visszaszórással. A nitrogénnel implantált fémeket egy erre a célra kifejlesztett koptatógépen koptattuk egy üvegrúdra felcsévélve kopásnyommal. Az üvegrúdra tapadt vas mennyiségének mérésével (ez arányos a 260–350 csatornaszámmal levő csúcs területével) vizsgálható a kopás, a rudat milliméterenként végigmérve akár a kopási úthossz függvényében is. A spektrumok élének elmosódásáért a fényzáró fólia a felelős. A spektrumok mellett a mérési elrendezés látható a detektor, a fényzáró fólia és az elektronforrás helyzetének megjelölésével. Az elektronforrást a feltöltés elkerülése végett használtuk [7].

Feltöltődés – szikrázás

Az ionok által okozott feltöltődés következtében létrejövő szikrázás zavarja az elektronikát, és így zajossá teheti a mérést. A szigetelő minták mérésekor egyaránt fontos, hogy feltöltődésmentesen tudjunk mérni, illetve hogy észrevegyük a spektrumokon, ha a minta feltöltődött. A feltöltődést a mérések értelmezésénél figyelembe lehet venni, de a legjobb, ha a kísérlet azonnal megismételhető úgy, hogy feltöltődésmenteséget biztosítunk.

A feltöltődés és így a szikrázás elkerülésére több hatékony módszer is kipróbálható.

A minta csomagolása

A mintát magát ilyenkor egy vékony alumíniumfóliával borítjuk be, csak egy kicsi ablakot hagyva a méréshez. Így a mérési felülettől pár mm-re már vezető anyag lesz, ezzel biztosítjuk a töltések elszivárgásának lehetőségét. A módszer előnye, hogy olcsó és szinte mindig alkalmazható, ha előre számítunk a feltöltődésre. Hátránya, hogy a minta felületének nagy részét elveszítjük a mérés alatt, nagyobb felület homogenitástérképe ezért így nem állapítható meg. Az ionok súroló beesésekor, illetve kilépéskor a csomagoló anyag könnyen okozhat árnyékhatást, amennyiben a csomagolás nem tökéletesen fekszik fel a minta felületére.

Bevonat

Megpróbálhatjuk vezetőképessé tenni a felületet egy alkalmas vezetőképes bevonattal. Egészen vé-

kony szén- vagy aranyréteg elegendő ahhoz, hogy a feltöltődést elkerüljük. A módszer hátránya, hogy ezzel magát a mintát is megváltoztatjuk. Ráadásul egy komolyabb mintakészítő berendezésre is szükség lehet.

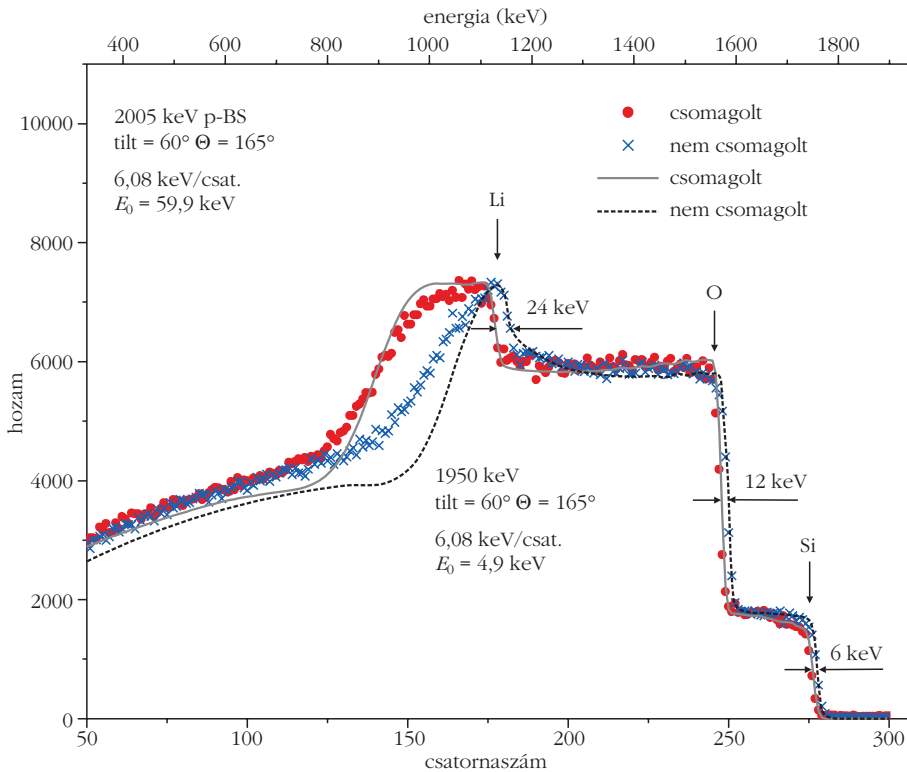
Kis áramerősség használata

A feltöltődés lényegesen csökkenthető, és a szikrázás elkerülhető, ha lényegesen csökkentjük a nyalábáramot. A nyaláb áramerősségét a szokásos 10-20 nA-ról 1-4 nA-re csökkentve a legtöbb minta mérhetővé válik, hiszen így elegendő idő lesz arra, hogy a felületre jutó töltés elszivárogjon. A módszer hátránya, hogy ugyanolyan jószágú (statisztikájú) mérése sokkal hosszabb mérési időre lesz szükség.

Elektronforrás

A leghatékonyabb védekezési mód a feltöltődés és szikrázás megakadályozására egy alkalmas elektronforrás használata. Saját készítésű, egyszerű, izzólámpából kialakított elektronforrás is megfelel a célra. Alkalmazásának feltétele, hogy az árammérés a mérőkamrától, illetve a mintától független legyen. Hátránya lehet, hogy megfelelő működésnél elég erősen világíthat, így csak vakdetektorral együtt érdemes használni.

A minta feltöltődés hatására elért feszültsége akár több 10 kV is lehet, anélkül, hogy szikrázna. Ez akkor következhet be, ha a felületi szivárgás következtében nem éri el a minta a szikra kialakulásához szükséges átütési feszültséget. A feltöltődés ekkor is



3. ábra. Protonvissaszórásos spektrometria (p-BS) feltöltődött és feltöltődésmentes $(\text{Li}_2\text{O}_x(\text{SiO}_2)_{1-x})$ kerámián [11]. A feltöltődés hatásának bemutatására az egyik mintát alumíniumfóliába csomagoltuk, a másik pedig nem kapott borítást. (A mért spektrumokat a szimbólumok, a számoltakat vonalak jelölik.) Mindkét esetben elmosódásmentes Li, O és Si felületi éleket kaptunk, amelyek a feltöltődés hatására a kinematikai faktornak megfelelően csúsztak a nagyobb energia felé 24, 12, illetve 6 keV-vel. A minta 55 kV-ra töltődött fel a mérés során és $q_1 = q_2 = 1$ adódott, ami várható volt a p-BS-nél. A Li hatáskeresztmetszete ebben az energiatarományban erősen függ a proton energiájától; 55 keV különbség erős torzulást okoz a spektrumban. A feltöltődés jól értelmezhető a nyálábenergia és az energiakalibráció nullpontjának együttes változtatásával.

lelassítja a bejövő iont, ami – a hatáskeresztmetszete energiafüggése révén – megváltoztathatja a spektrum alakját. A reakcióterméket – amennyiben az töltéssel rendelkezik – viszont gyorsítani fogja, és ezzel energiája a feltöltődésmentes méréshez képest jelentősen megváltozik. Ez gondot okoz az ionok energiaeloszlásán alapuló módszer mérési eredményeinek értelmezésében is.

Ez a jelenség ugyanakkor lehetőséget ad arra is, hogy akár mérés közben észrevegyük, ha a minta feltöltődik. A feltöltődésmentes minták segítségével meghatározott energiakalibrációhoz képest a feltöltődött minták felületi élei egy kicsit magasabb energián jelennek meg (amint az a 3. ábrán látszik), ugyanis a visszaszóródott ion energiája rugalmas szórás esetén

$$E_M = (E_0 - q_1 \Delta U) K + q_2 \Delta U,$$

ahol E_0 a nyáláb energiája, q_1 és q_2 a beeső, illetve a szóródott ion töltésállapota, K a kinematikai faktor (a szóródott és a bejövő ion energiájának hányadosa), ΔU pedig a minta feltöltődése. Az élek eltolódása a feltöltődés hatására:

$$\Delta E = (q_2 - q_1 K) \Delta U$$

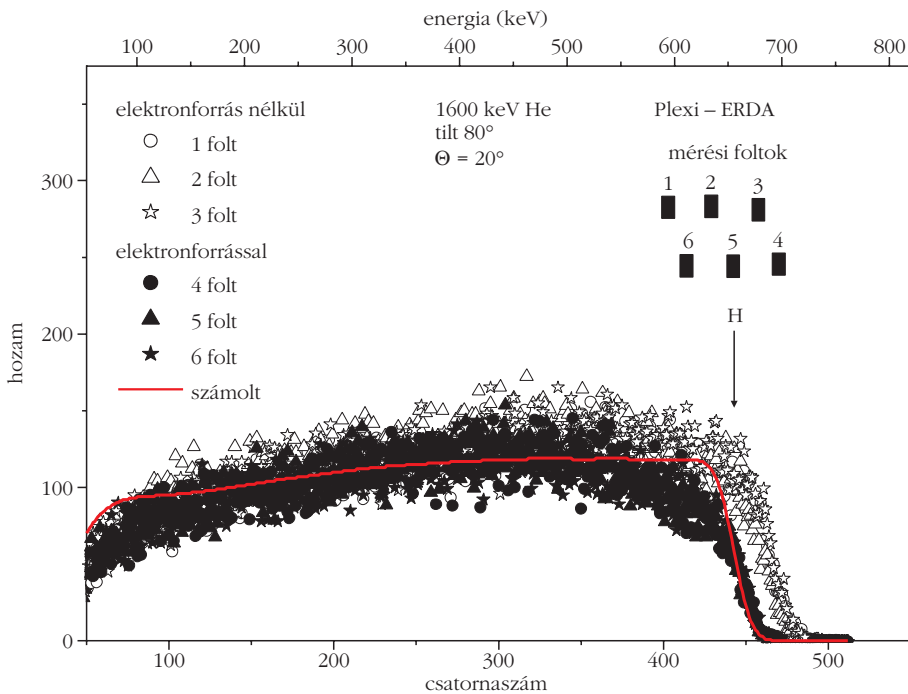
a kinematikai faktortól, azaz a szóró atom tömegétől fog függni, ami egyszerűen ellenőrizhető. Ha q_1 és q_2 állandó, az élek elmosódása nem várható. Ez következik be proton-BS esetén, ahol mind a beeső, mind a visszaszórt ion töltésállapota 1. Héliummal vagy nehézionokkal történő méréskor azonban csak a beeső ion töltésállapota ismert, a szóródott ioné viszont nem, pedig ennek ismerete is fontos [8, 9]. A több töltésállapot jó felbontású detektálási módszer esetén lépcsőket, rosszabb felbontású detektor esetén elmosódott éleket eredményez.

A feltöltődés hatása akkor jelentkezik igazán jelentősen a spektrumokban, ha a hatáskeresztmetszet energiafüggése nem hanyagolható el. Ez látszik a 3. ábra Li-hoz tartozó spektrumrészletében is. Az ionnyaláb-analitikai mérésekre használt legtöbb kiértékelő programba [10] a feltöltődés hatásainak számolását még nem építették be, ezért a mérések értelmezésekor csak valamilyen paraméterkorrekcióval lehet próbálkozni. Bár a feltöltődött minta spektruma jól értelmezhető a nyálábenergia és az energiakalibráció nullpontjának együttes változtatásával, a finomabb részletek (például a Li hátsó élének) leírásához a feltöltődési folyamat pontosabb leírása lenne szükséges.

Rugalmasan meglökött magok detektálásán (ERDA, Elastic Recoil Detection Analysis) alapuló mérőmódszernél, amelyet elterjedten használnak hidrogén meghatározására, ugyancsak zavaró lehet, hogy a felületi él nagyobb energián jelentkezik, mint ahol az a feltöltődésmentes mintákon alapuló mérésnél lenne. A feltöltődött minta spektrumának számolásánál a mérés során alkalmazott abszorbens okozhat nehézséget, így a számolás korrekciója helyett gyakran egyszerűbb feltöltődésmentesen mérni.

Az elektronforrásból származó felgyorsított elektronok is kölcsönhatásba léphetnek a mintával. Elvileg ez a kölcsönhatás is okozhatna szerkezeti vagy összetéleri változásokat, csakúgy, mint maga az ionnyaláb is (4. ábra). Az elektronok által okozott szerkezeti változások – legalábbis a jelen esetben – nem voltak jelentősek, mivel a megismételt mérések nem mutatnak mérési hibán kívüli eltérést.

Az ionlumineszcencia-módszer alkalmazásánál azonban, ahol éppen az ionok által keltett fénykibocsátást

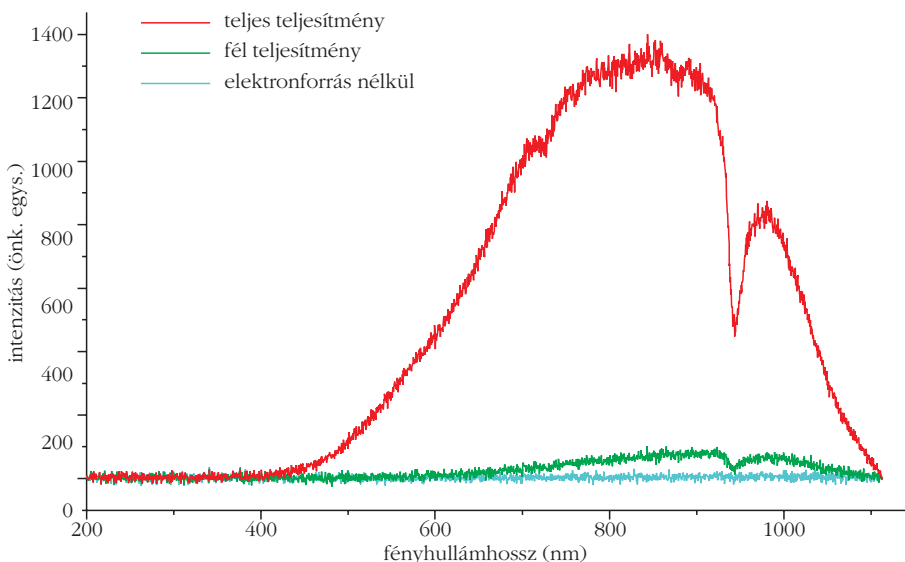


4. ábra. Feltöltődés hatása hidrogén meghatározására alkalmazott ERDA-módszernél. Az „utógyorsított” protonok lényegesen nagyobb energiával képesek áthatolni a fólián; ez okozza azt, hogy a felületi él körülbelül 20 keV-vel nagyobb energiánál jelentkeznek. A mérések sorrendje megegyezett a mérési foltok számozásával.

mérjük, más megoldást kell alkalmazni, mivel az elektronforrás fénykibocsátása zavarja a mérést (5. ábra).

Ebben az esetben a mintákra felületi vezető réteget sem érdemes tenni, mert ez megakadályozza a fénykibocsátást. A módszer annyira érzékeny, hogy törekedni kell a minél jobb és tisztább vákuumban való mérésre, hogy a felületre kirakódó szénhidrogén mennyisége is csökkenjen. A minta csomagolása elvileg járható út lenne, viszont ez a módszer erősen korlátozza a minta mérhető felületét. Az ionlumineszcencia-mérések során elég gyakran kell friss mérési pontra állni,

5. ábra. Az elektronforrás fénykibocsátásának zavaró hatása ionlumineszcencia-mérésnél a szikrázás megakadályozásához szükséges teljesítménynél (teljes teljesítmény), illetve fél teljesítménynél.



mert az ionok által okozott sugárkárosodás hatással van a fénykibocsátásra is. Ezért enél a módszernél aránylag kis áramerősséget (1-4 nA) szoktak használni, amivel elkerülhető a feltöltődés is.

Összefoglalás

Az elmúlt évek során csoportunkban a feltöltődés megakadályozására mindegyik módszert alkalmaztuk. A legjobb megoldásnak így szigetelő minták mérésére a Pászti-féle transzmissziós Faraday-kalitka, vakdetektor és elektronforrás együttes alkalmazását tartjuk a legtöbb ionsugaras mérési módszerre. Az ionlumineszcencia módszer alkalmazásánál elektronforrás helyett az áramerősséget kell elegendően lecsökkenteni a szikrázás elkerüléséhez.

Irodalom

1. J. R. Tesner, M. Nastasi (szerk.): *Handbook of modern ion beam materials analysis*. Mat. Res. Soc., Pittsburgh, PA, 1995.
2. W. K. Chu, J. W. Mayer, M. Nicolet: *Backscattering Spectrometry*. Academic Press, New York, 1978.
3. Gyulai J.: A Rutherford-visszaszórás és „karrierje” a mikroelektronikában. *Fizikai Szemle* 61 (2011) 293.
4. Kótai E., Szilágyi E.: Magyar innovációk a Rutherford-visszaszórási technikában. *Fizikai Szemle* 61 (2011) 301.
5. P. D. Townsend: Variations on the use of ion beam luminescence. *Nucl. Instr. Meth. B* 286 (2012) 35.
6. F. Pászti, A. Manuaba, C. Hajdu, A. A. Melo, M. F. Da Silva: Current measurement on MeV Energy ion beam. *Nucl. Instr. Meth. B* 47 (1990) 187.
7. E. Szilágyi, F. Pászti, Z. Vértsey: Influence of nitrogen ion implantation on wear studied by a new laboratory wear test. *Nucl. Instr. Meth. B* 58 (1991) 98.
8. E. Szilágyi: On the limitations introduced by energy spread in elastic recoil detection analysis. *Nucl. Instr. Meth. B* 183 (2001) 25.
9. Y. Kitsudo, K. Shibuya, T. Nishimura, Y. Hoshino, I. Vickridge, Y. Kido: Charge exchange of medium energy H and He ions emerging from solid surfaces. *Nucl. Instr. Meth. B* 267 (2009) 566.
10. E. Rauhala, N. P. Barradas, S. Fazinic, M. Mayer, E. Szilágyi, M. Thompson: Status of ion beam data analysis and simulation software. *Nucl. Instr. Meth. B* 244 (2006) 436.
11. D. E. Szócs, E. Szilágyi, Cs. Bogdán, E. Kótai, Z. E. Horváth: Lithium concentration dependence of implanted helium retention in lithium silicates. *Nucl. Instr. Meth. B* 268 (2010) 1857.

1436. június 6-án az alsó-frankóniai (bajor) Königsberg város melletti Unfinden nevű kis falu német nyelvű molnárának fia született. Így lett a neve *königsbergi Johannes Müller*, amit később *Regiomontanusra* latinositottak, mi meg magyarul Királyhegyi Jánosként emlegethetnénk.

11 évesen Lipszében kezdett matematikát és csillagászatot tanulni, majd ezt a bécsi egyetemen *Georg Peuerbachnál* folytatta. 1452-ben első fokú minősítést szerzett, 1457-ben 21 éves korában már magiszterként előadásokat is tartott. Bécsből *Bessarion* nikaiai bíborossal 1461 végén Itáliába utazott, akitől ott görög kéziratokat kapott ajándékba, s így becses könyvek birtokában tanult görögül. 1464-ben Páduában előadást is tartott *Alfraganus* munkásságáról. Az akkori csillagászat alapjainak, *Ptolemaiosz* kézikönyvének latin nyelvre fordítása és a kör négyesítésére vonatkozó vizsgálatai kapcsán sok humanista kortársával került közeli kapcsolatba. Ptolemaiosz-fordítását több alkalommal is kiadták, *Kopernikusz* és *Galilei* ezeket tankönyvként használta. A bolygók megfigyeléséből megállapította, hogy az a világmép, amely az ókorból fennmaradt, nem felel meg a valóságnak.

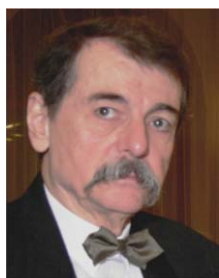
Ebben az időben *Janus Pannonius* (1434–1472) Itáliában Mátyás király, illetve *Vitéz János* (1400 k. – 1472; csillagászzal is foglalkozó humanista tudós, 1445–1465 között nagyváradi püspök, 1465–1472 közt esztergomi érsek és hercegprímás) megbízásából keresett professzorokat a Pozsonyban alapítandó *Academia Istropolitana* számára. Janus Pannonius hívására *Ilkus Márton* és Regiomontanus 1467-ben elfogadták a meghívást. (Ilkus eredeti nevén *Marcin Bylica z Olkusza*, 1433-ban született Lengyelországban 1463-ban csillagászatot tanított a páduai egyetemen, 1468-ban görzi főesperes és zágrábi kanonok lett, 1472-ben Budán plébános, s a teológia, valamint „a tudományok tanára”, királyi asztrológus. 1480-ban a budai dominikánus kolostorban tanított Ilkus és itt dolgozott *Hans Dorn*, a neves műszerkészítő mester is. Mátyás halála után *II. Ulászló* fogadta szolgálatába Ilkus Mártont, s a tudós egészen haláláig, 1493-ig Magyarországon tartózkodott. Ilkus, vagy maga a király által a krakkói egyetemnek ajándékozott műszerek (a Dorn-féle 1480. évi *égi*

glóbusz, az 1486-os *asztrolábium*, a ma már nem egészen teljes *torquetum*, a Bécsben ismeretes *napóra* és deklinációs iránytű meg egyebek) eredete is Regiomontanusra vezethető vissza.)

Regiomontanus a középkori hét szabad művészet legmagasabb fokát, a *quadriuium* tantárgyait (szám-tan, mértan, csillagászat és zeneelmélet) tanította a *II. Pál* pápa engedélyével *Academia Istropolitana* néven 1467. július 20-án megnyitott pozsonyi egyetemen. Amikor ideérkezett, megbízták horoszkópok kiszámítására és magyarázatára való pontos csillagászati táblázatok készítésével is, amivel hamarosan végzett. Ezt a *Tabulae directionum* című művét már 1467-ben Vitéz Jánosnak ajánlotta. A *Tabula primi mobilis*t Mátyás királynak ajánlotta, akárcsak a *Regula Ptolemaeiről* írt művét.

E munkák gerincét tizenhat táblázat alkotja, amelyek a horoszkópok felállításával kapcsolatosan a bolygók mozgásának, együttállásainak pontos meghatározását teszik lehetővé. Összesen több mint harminc csillagászati alapfeladat megoldását mutatják be a táblázatok használati ismertetői (például a zodiákuison levő vagy bármely más helyzetű bolygó vagy csillag deklinációjának és rektaszenciájának kiszámítása stb.). E táblázatok nemcsak tömördek aprólékos számítás elvégzését igényelték, hanem ezeket megelőzően komoly elméleti megalapozásra is szükség volt, azaz Regiomontanus a korabeli térmértani ismereteket érdemben bővítette új tudományos tételekkel és módszerekkel. A táblázatok – megalapozottságuk miatt – már nem a középkori tudomány folytatásai, hanem egy új tudomány alapjai, sőt alapos körülmények közötti átszámításokat, illetve a derékszögű gömbháromszögek oldalainak és szögeinek kiszámítását teszik lehetővé a képletek részletes ismertetései nélkül. A táblázatok használati útmutatói, a horoszkópok készítését segítő példák nagy pedagógiai gondattal vannak összeállítva. Sorrendjük megfelel az egymást követő, egyre nehezedő feladatok sorrendjének. A feladatok elején szinte szájbarágós alaposan ismerteti, mi az eljárás, ha a keresett érték nincs meg pontosan a táblázatban, vagyis az interpolálást is tanítja. Valamennyi példánál is lépésenként magyarázza, hogy azt hogyan kell általánosságban, utána pedig numerikusan is megoldani.

Negatív és törtszámok a táblázatokban nincsenek. Ezek elkerülésére a szinuszt egy 60 000 egységű sugarú körben méri az ókori hagyományok szellemében és a 60-as számrendszert használva, így a $\sin 90^\circ$ -nak 60 000-et megfelelően. Az értékek szögpercenként négy, nagyobb szögekre öt számjeggyel vannak megadva. (Regiomontanus készített olyan szinusztáblát is, ahol már 10-es alapú számrendszert használva a $\sin 90^\circ$ -nak 100 000 felel meg. Ezt az első, *modern* szinusztáblázatot is Mátyás király udvarában, Budán,



Molnár János a BME-n szerzett villamosmérnöki oklevelet, ismereteit később más területekkel bővítette. 1965-től 2000. évi nyugdíjazásáig az olajiparban dolgozott. 1970-től oktat egyetemeken előadóként, az UNIDO szervezésében és a Gábor Dénes Főiskolán. 1980-ban doktori dolgozatával társul az Országos Mérésügyi Hivatal Gázipari Hitelesítési Szabályzatainak elkészítéséhez. 450 oldalas könyve a napórák hagyományos és újdonság értékű szakmerteinek monográfiája.

1468-ban készítette.) A táblázatok között van a *Tabula foecunda* is, egy tangenstáblázat, amellyel itt találkozunk először Európában. A tangenstáblázatban fokenkénti, 5 jegyű értékek vannak, tg 45°-nak 100 000 felel meg, a szögek növekedésével már hétjegyű a táblázat.

1469-ben a *torquetumról*, a bolygók megfigyelésére használható műszerről szóló művét ugyancsak az érseknek ajánlotta. Regiomontanus kézíratai feltehetően Mátyás király udvarának olasz művészei által másolt szép kialakítású díszes művek nyomán készültek.

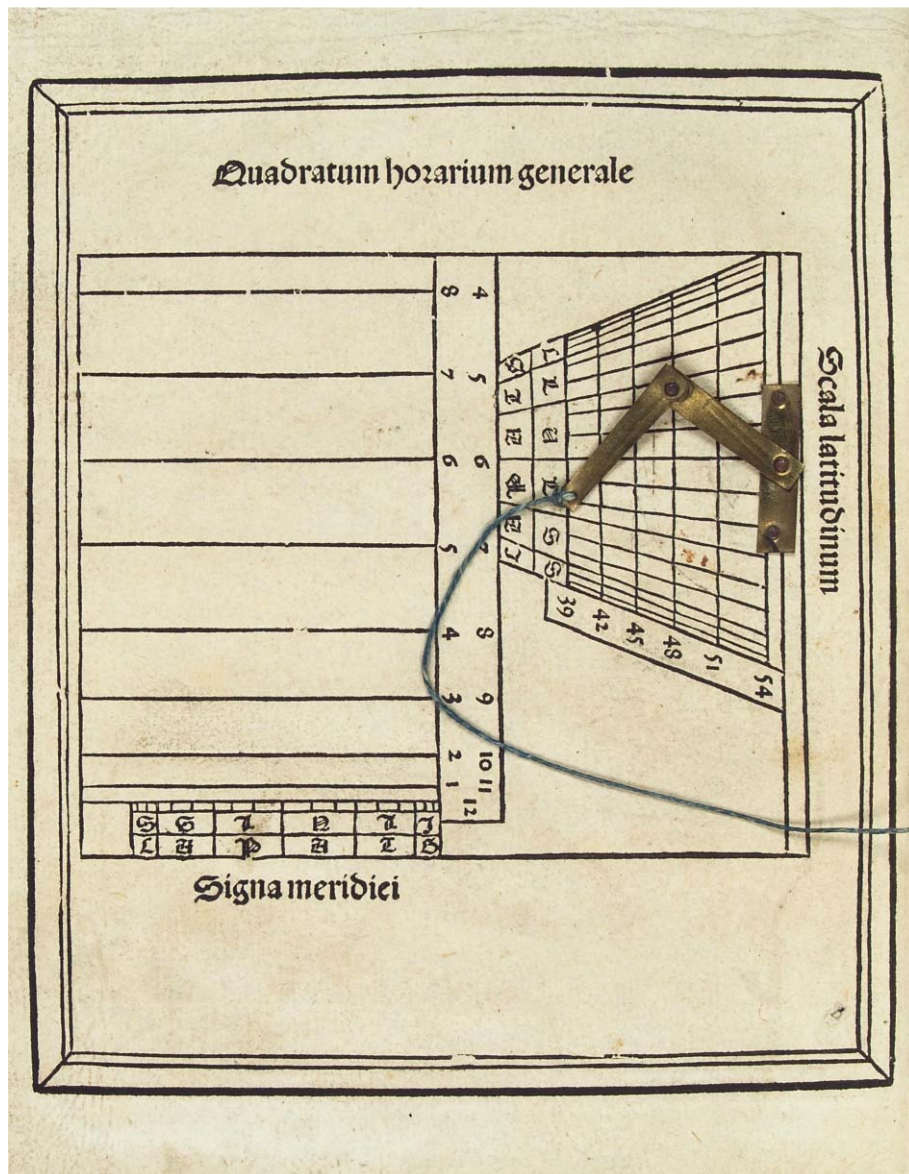
Regiomontanus Magyarországról 1471-ben Nürnbergbe költözött, csillagvizsgálót épített, ahol hosszú megfigyeléssorozattal akarta megvetni a bolygóelmélet reformjának alapjait. Ez az első olyan megfigyeléssorozat Európában, amely az adatgyűjtési körülmények (például az időjárás) gondos tekintetbevétele miatt pontosságával kitűnik. Emellett saját nyomdát alapított, hogy kiadja a legfontosabb ókori és újabb matematikai és csillagászati műveket, így saját műveit is. Ezek közül különös nevezetességre és becsretettek szert a Nap és Hold 1475–1531 évekre vonatkozó adatainak könyvei az *Almanachok* és az *Ephemerides* című táblázatai, amelyek az 1475–1506-os évek egyéb csillagászati alapadatait ismertették. E könyveket *Kolumbusz* és *Amerigo Vespucci* is használta tengeri útjai során. Nevezetes napóráját, az *Egyetemes óratáblát* kifejezetten az utazók igényei szerint készítette. Kalendáriuma függelékeként ezt *Quadratum horarium generale* néven (1. ábra) nyomtatásban is közreadta, és ismertette további néhány műszerének nyomtatott, papíralapú változatával együtt.

Regiomontanus 1475-ben Rómába rendelte IV. Sixtus pápa naptárreformja megalapoztatása érdekében, ám Regiomontanus 1476. július 6-án, alig 40 évesen meghalt Rómában, valószínűleg az akkoriban ott pusztító pestisben, de ismervén a kor szokásait, akár riválisainak is „köszönhetően”.

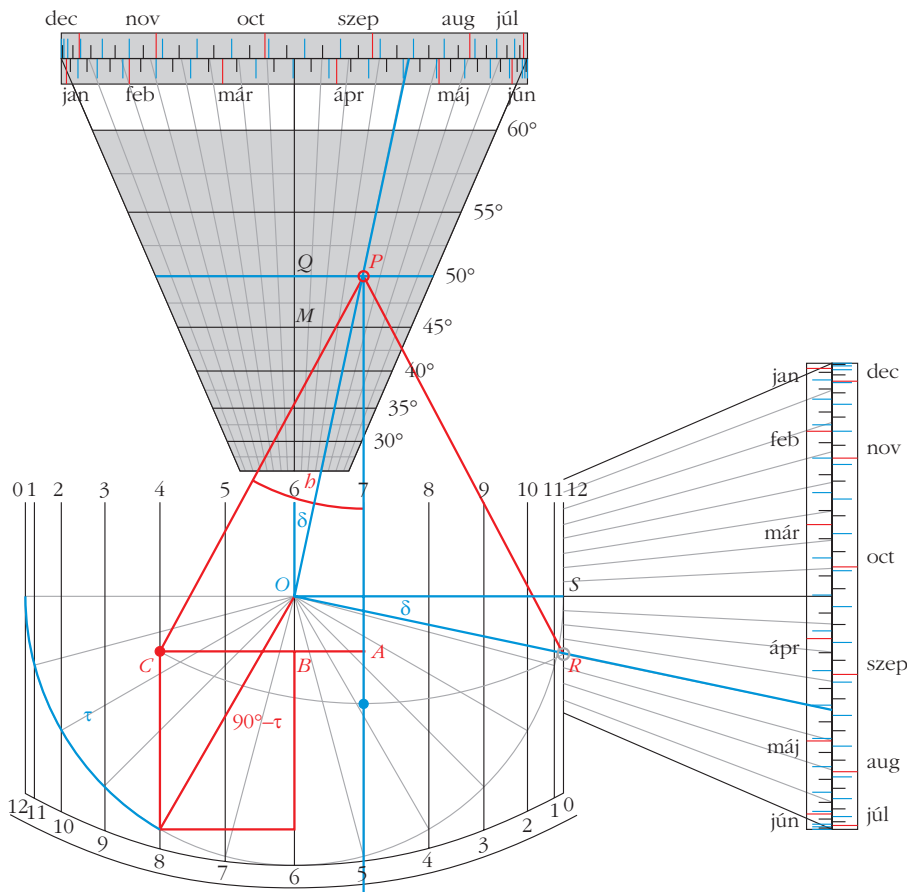
Regiomontanus számtalan más matematikai jellegű feladattal is foglalkozott. Vizsgálódott a diofantoszi egyenletek körében, foglalkoztatták *Eukleidész* geo-

metriájának algebrai lehetőségei, elemezte a Hold pályáját. Megfigyelte az 1472. évi üstökösöt és elsőként kísérelte meg kiszámítani annak távolságát és nagyságát.

Regiomontanus *Egyetemes óratábla* néven ismert, körülbelül 7×12 cm-es rézlemezbe gravírozott napóráját új, szokatlan elvre alapozta. A korábbi napórák a Nap irányszögét mérték alapadatként a helyi idő meghatározásához. A napórák szerkezeti formáját a használati hely földrajzi szélességéhez kellett illeszteni, azaz a napórák csak ott működtek pontosan, ahová szánták azokat. Utazók számára vagy más szerkezetű, vagy más elvű órák kellene. Regiomontanus a Nap magassági szögének mérésére alapozta napóráját. Szerkezete és ennek működési elve lehetővé tette, hogy a földrajzi hely, meg a napi dátum ismeretében a helyi idő meghatározásához szükséges összefüggéseket viszonylag egyszerűen figyelembe lehessen venni, azokkal való konkrét számolások nélkül. A



1. ábra. Regiomontanus egyetemes óratáblájának korabeli, nyomtatott változata.



2. ábra. A gravírozott változat skálaszerkezete és működési magyarázata.

meglehetősen összetett feladat megoldására zseniálisan kidolgozott módszerét és ennek eszközét mai fogalmaink szerint az első analóg, síkgeometrikus célszámítógépként, vagy pontosabban egy négyváltozós képlet nomogramjával egybeépített szögmérőként tisztelhetjük.

A számítóra több részre tagolt vonalhálózataihoz és skálaosztásaihoz egy szellemes kialakítású irányzékos szögmérő és egy töbcsuklós, beállítható helyzetű karrendszer, meg ennek végére szerelt függőn tartozik, aminek zsinórján mozgatható-rögzíthető jelzőgyöngy van. Mindezt a nevezetesebb európai városok földrajzi szélességét tartalmazó táblázat egészíti ki. És természetesen a műszer használatának ismerete. A nomogram működését a skálahálózat felépítését szemléltető 2. ábra nyomán ismerhetjük meg.

A szerkezet alkalmazásakor a városok feliratai alapján (vagy egyéb módon) határozzuk meg a használati hely földrajzi szélességét, majd a tetszőleges helyzetben tartott tábla (alaphelyzetében függőleges) OM tengelyének skálaosztásaihoz igazodva ennek megfelelő helyre állítjuk a csuklós kar csúcspontját, a zsinór rögzítési pontját.

Ismervén a mérés napjának dátumát, keressük meg a szerkezet felső részén lévő (vízszintes) naptárskála (zodiákus) megfelelő osztáspontját és kövessük az ennek megfelelő helyről lefelé haladó osztásvonalat, amíg az el nem éri az előbb beállított csuklós kar csúcspontjából induló vízszintes skálavonalat. Helyez-

zük át a kar csúcspontját az ennek a metszéspontnak megfelelő helyre, és rögzítsük ide. Ekkor a függőn zsinórja a tábla koordináta-rendszerében a φ földrajzi szélességnek és a Nap éppen időszerű δ deklínációjának megfelelő pontból indulva lenghetne.

Keressük meg a (még mindig tetszőleges helyzetben tartott) szerkezet oldalsó részén lévő másik (függőleges) naptárskálán is a mérés dátumának megfelelő skálavonali pontot, majd az innen befelé induló skálavonalnak az S ponthoz tartozó, 12 óra jelzésű (függőleges) idővonallal való, R -rel jelölt metszéspontját.

Állítsuk a tábla síkját olyan függőleges helyzetbe, hogy a függőn zsinórja közvetlenül a tábla előtt, de szabadon lógjon, és illeszkedjen az előbb kijelölt R pontra is. Ilyen helyzetben csúsztassuk a függőn zsinórján lévő jelzőgyöngyöt az R ponthoz. Ne engedjük a zsinóron rögzített helyzetéből kimozdulni!

Ezen előkészületek után mérhetjük a Nap magassági szögét. Ehhez a tábla síkját olyan függőleges helyzetbe kell forgatni és dönteni, majd ott nyugalomban megtartani, hogy a tábla tetején lévő irányzólyukon átvilágító napsugár a tábla tetejének másik szélén lévő céltábla közepére essen, miközben a zsinór szabadon lóg közvetlenül a tábla síkja előtt.

Olvassuk le az időskála és ennek vonalhálózata alapján a jelzőgyöngy mutatta időt, ami a Nap deleléséhez igazodóan a helyi időt jelenti. A skálaosztások felirata szerint ez vagy délelőtti 0–12 óra, vagy délutáni 12–24 óra közt lehet. A választáshoz Regiomontanus nem adott útmutatást...

Kapunk viszont egy járulékos, kiegészítő szolgáltatást: könnyen meghatározhatjuk a Nap kelési és nyugvási idejét, és ezek alapján a nappal meg az éjszaka hosszát. Ehhez a táblát tetszőleges irányú függőleges síkban úgy kell tartani, hogy a függőn zsinórja párhuzamosan lógjon az óraskála (függőleges) koordinátavonalaival. Ekkor a tábla tetején lévő irányzólyuk és a céltábla közepe egy vízszintes egyenesen lesz, azaz a kelő, illetve nyugvó Nap 0 magassági szögének megfelelően. A függőn zsinórja szerint leolvasott idők ezért a Nap kelési, illetve a nyugvási idejét adják.

A szerkezet működési elvét a következők alapján ismerhetjük meg: a gömbháromszögek oldalai és szögei közti összefüggések közül (többek közt Regiomontanusnak is köszönhetően) a Nap magassági szögét a

$$\sin b = \sin\varphi \sin\delta + \cos\varphi \cos\delta \cos\tau$$

képlettel számíthatjuk. Itt b a Nap magassági szöge, φ a hely földrajzi szélessége, δ a Nap évszaktól függő deklinációs szöge, τ a deleléstől mért helyi idő (óraszög). A képlet láthatóan szimmetrikus a szélességi és a deklinációs szög szempontjából, bár értelmezési és előfordulási tartományaik ($20^\circ < \varphi < 66^\circ$, illetve $-24^\circ < \delta < +24^\circ$) különbözőek. Emiatt a szerkezet egyes skálarészeinek felépítése bár hasonló, de skálaosztásaik nem egyformák. Az eredeti szerkezeten $39^\circ \leq \varphi \leq 54^\circ$ és 3 fokenként számozott, jelzett skálavonalak voltak.

Az 1. ábra szerinti O pont a skálavonalak koordináta-rendszerének kezdőpontja, az $r = OM = OS = 1$ távolságok egységnyiek, merőlegesek, és mint ilyenek, kijelölik az OM függőleges és az OS vízszintes koordinátatengelyek pozitív irányait is. A P pont a példaként felvett $\varphi = 50^\circ$ és $\delta = 12^\circ$ (~április 21.) adatokhoz tartozik. Értelmezés szerint az $OQ(\varphi)$ távolságokra $OQ = \operatorname{tg}\varphi$, továbbá a POQ szög = ROS szög = δ , illetve az $SR(\delta)$ és $QP(\delta)$ távolságokra $SR = \operatorname{tg}\delta$ és $QP = \operatorname{tg}\varphi \cdot \operatorname{tg}\delta$. A kívánt deklinációs szög skálavonalát a vonatkozó dátumok és a megfelelő állatövi jegyek szerint lehet kiválasztani, az ábrán a skálaközök 5 naponként jelöltek, havonta feliratozottak. A tábla jobb oldali részén levő zodiákus skála csak az egységes megjelenés és kényelmesebb használat miatt ismétli a vízszintes rész méretét és formáját, mert ennek érdemi része csak az S ponton átmenő függőleges rövid „vetületi” szakasza. A földrajzi szélesség 2,5 fokenként jelölt, 5 fokenként számozott.

Az O pont, mint középpont körül lefelé rajzolt egységnyi sugarú félkör kerületét S pontból kiindulva 1 óra = 15 fokos középponti szögtávolságonként $S = 12$ kezdőértékkel kell jelölni, majd ezeken az osztáspontokon keresztül párhuzamosokat kell húzni a függőleges OM tengellyel. A $0 - 6 - 12$ és $12 - 18 - 24$ számozású vonalak adják az időtengely skálaosztásait. (A középkor napi óraszámozási, illetve a különböző napkezdési időpontokat használó gyakorlata miatt az időtengely óraszámjai az esti napnyugvástól kezdődő, vagy a hajnali napkeltéhez igazodóan más számozást is kaphattak, de a működési elv ettől függetlenül azonos.)

A POR derékszögű háromszögre felírt Pitagorasztétel és az értelmezések nyomán kapjuk:

$$PR^2 = OR^2 + OP^2 = (OS^2 + SR^2) + (OQ^2 + QP^2),$$

$$PR^2 = 1 + \operatorname{tg}^2\delta + \operatorname{tg}^2\varphi + \operatorname{tg}^2\varphi \operatorname{tg}^2\delta,$$

$$PR^2 = (1 + \operatorname{tg}^2\delta)(1 + \operatorname{tg}^2\varphi) = \frac{1}{\cos^2\varphi \cos^2\delta},$$

$$PR = \frac{1}{\cos\varphi \cos\delta}.$$

Azzal, hogy a szerkezetet a Nap b magassági szögét mérő helyzetbe állítottuk, a függőön zsinórjának megjelölt R pontját átállítottuk a tábla C pontjába. Emiatt igaz, hogy

$$CPA \sphericalangle = b = 90 - \tau,$$

továbbá

$$BC = \sin b = \sin(90 - \tau) = \cos\tau,$$

$$AC = PR \sin b = \frac{\sin b}{\cos\varphi \cos\delta} = AB + BC.$$

A függőön csúcspontjának beállítása és a C -hez rendelt óraszög miatt

$$AC = \operatorname{tg}\varphi \operatorname{tg}\delta + \cos\tau = \frac{\sin b}{\cos\varphi \cos\delta},$$

azaz

$$\sin b = \cos\varphi \cos\delta (\operatorname{tg}\varphi \operatorname{tg}\delta + \cos\tau),$$

ami végül megegyezik a Regiomontanusnak is köszönhető kiindulási képlettel.

Felhasznált források

1. Zinner Ernő: Regiomontanus Magyarországon. *Matematikai és Természettudományi Értesítő* (1937) 280–287.
2. Ernst Zinner: *Leben und Wirken des Job. Müller von Königsberg, genannt Regiomontanus*. Otto Zeller Verlag GmbH, Osnabrück, 1968.; angolul Regiomontanus: his life and work. (ford.: E. Brown) North-Holland, Amsterdam–New York–Oxford–Tokyo, 1990.
3. Vargha Domokosné: Mátyás király csillagásza. *Élet és Tudomány* (1997/35) 1103–1105.
4. Barlai Katalin közleményei Mátyás kódexeiről.
5. Fer J. deVries, Mac Oglesby, William S. Maddux, Warren Thom: Universal Card Dials with Nomograms for Babylonian, Italian, and Antique Hours. *Compendium 5/4* (1998).
6. Johann Müller von Königsberg (Regiomontanus): *Quadratum horarium generale* és *Allgemeinen Uhrtafelchen*. 1474.
7. Peter Bennewitz (Apianus, 1495–1552): *Instrument Buch* 1533.
8. Johann Stab: *Horoscopion* 1512.
9. Klaus Hünig, Nils Rhode: *Die Regiomontanus-Sonnenuhr*. Astro-Media, Würzburg, 1981.

Jobb egy mentőötlet mint öt mentő egylet

– írta Karinthy Frigyes az egyletistápolás margójára.

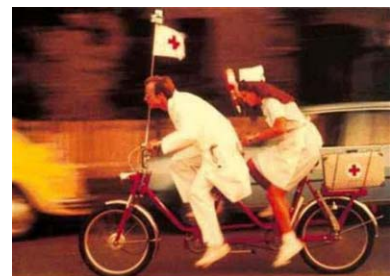
Most Társulatunk kér egyletmentő ötleteket!



Ezek az ötletek nem vesznek el,

ha a <http://forum.elft.hu>

linken, az ELFT stratégiai vitafórumán adjuk elő.



FORTUNA SZEKERÉN...

Nagy Péter – Pallasz Athéné Egyetem, GAMF Kar

Tasnádi Péter – Eötvös Loránd Tudományegyetem, Természettudományi Kar

„...tudni: az ész rövid, az akarat gyenge,
 hogy rá vagyok bízva a vak véletlenre.
 És makacs reménnyel mégis, mégis hinni,
 hogy amit csinálók, az nem lehet semmi.”

(Teller Ede)

A véletlenszerűség jelenléte a természetben és hétköznapjainkban mindenki által megélt közvetlen tapasztalat, így a középiskolában és a felsőoktatásban vezető kollégiumaiban is meg kell mutatnunk tanítványainknak azokat a gondolatmeneteket, amelyekben valószínűségi megfontolásokat alkalmazunk. A statisztikus fizika jellegzetesen az a terület, amely valószínűségi gondolkodást igényel és középiskolai tárgyalása is időszerűvé vált. Fogalmai és módszerei azonban mind matematikai apparátusukban, mind szemléletükben idegenek, nehezen érthetőek akár a középiskolás diákok, akár a BSc szintű fizikakurzusok hallgatói számára. Jelentős módszertani kihívás, hogy ezeket a fogalmakat érdekes hétköznapi jelenségekhez kapcsolva tárgyaljuk, hiszen a diákok motiválása ebben az esetben különösen fontos. Ezt újszerű, izgalmas jelenségek tárgyalásával és az érdeklődést felkeltő korszerű (multimédiás) eszközök felhasználásával érhetjük el. A számítógépek használata ezen a

területen lényegében megkerülhetetlen. Jelen cikkünkben néhány példa tömör bemutatásával illusztráljuk ezeket a módszereket, a bemutatott szimulációk letölthetők az [1] linkről. A részletezve bemutatott példák mellett néhány más alkalmazásra csak megfelelő linkek megadásával, kifejtés nélkül, pusztán az említés szintjén hivatkozunk. Ezzel – vállalva az esetlegesség kockázatát – az a célunk, hogy a cikk korlátozott keretei között is rámutassunk a valószínűségi gondolkodás széles lehetőségeire.

Valószínűségi gondolkodás

A szerencsejátékok és a rájuk épülő fogadások életszerűek és haszonelvűek, így kiválóan alkalmasak a véletlenszerű jelenségek, folyamatok bevezetésére. A fogadások tárgyalása nagyon hatékony lehetőség, hogy a diákokat ráhangoljuk a valószínűségi megfontolásokra. Az egyszerű dobókocka-dobási fogadások során a relatív gyakoriságon keresztül bevezethető a valószínűség, majd a várhatóérték fogalma. A valószínűség, valószínűség-eloszlás, várhatóérték fogalma és hasznosítása a fogadásokban kiválóan szemléltethető a közismert *Galton-deszka modell* kapcsán, amelyre számos nagyszerű számítógépes szimuláció áll rendelkezésre (például az [1] linkről letöltött csomagban a *galton* könyvtárban az *index.html* fájl megnyitása után a leírásban kipróbálható egy javascript alapú szimuláció).

Minden roppant egyszerűnek és a „józan paraszti ész” szerint is nyilvánvalónak tűnik, míg egyenletes eloszlású valószínűségi változóval van dolgunk. Ám a „józan paraszti ész” rögtön katasztrofális csődöt mond, ha az eloszlás nem egyenletes. Például tegyük fel a következő kérdést: hány fős társaságban fogadnál 1:1 arányban arra, hogy van két ember, akik azonos napon ünneplik a születésnapjukat? A diákok többsége abból kiindulva, hogy egy évben 365 nap van, 183 fős társaságot jelöl meg, néhányan az intuíciójuk sugallatára (és csapdát sejtve) ennél kisebb számot mondanak, de szinte senki nem megy 80 fő alá a becslésével. Igazi döbbenetet kelt, amikor az *1. táblázat* bemutatásra kerül: a táblázat második és negyedik oszlopában azon p_n érték áll, hogy az adott n fős társaságban mekkora annak valószínűsége, hogy van két azonos születésnapú ember. Kiderül, hogy 23 fős társaságban már nagyobb a nyerés esélye, mint a vesztesé, 40 fős társaságban a fogadás már távolról sem úriemberhez méltó, hiszen

A cikk az Eötvös Loránd Fizikai Társulat szegedi Vándorgyűlésén, 2016. augusztus 25-én, *A fizikaoktatás kutatásának hazai és nemzetközi irányai II.* szekcióban elhangzott előadás alapján készült.



Nagy Péter 1985-ben fizikus diplomát, 2014-ben PhD fokozatot szerzett az ELTE-n. 1985 óta tanít Kecskeméten, főiskolai docens. Fő érdeklődési területe a modern fizika újabb eredményeinek beépítése a BSc szintű oktatásba, nemlineáris, illetve komplex rendszerek számítógépes szimulációja, valamint elektronikus oktatási anyagok készítése. Kiemelten fontosnak véli a fizika tanítását és népszerűsítését, ezért örömmel vállal tevékeny szerepet az ELTE Fizika Tanítása Doktori Iskolájában.



Tasnádi Péter CSc az ELTE TTK nyugalmazott professzora. 1966-tól nyugdíjba vonulásáig dolgozott a TTK-n, amelynek 1997–2007-ig oktatási dékánhelyettese, 2007–2012-ig a TTK Természettudományos Oktatásmódszertani Centrumának elnöke volt. Oktatási és kutatási területe a fizikatanítás módszertana, az anyagfizika és a dinamikus meteorológia. Társzerzőkkel több mint 20 egyetemi és középiskolai tankönyvet és ismeretterjesztő művet írt. Magyar és idegen nyelvű szakcikkeinek száma több mint 150.

1. táblázat

Az azonos napon születettek előfordulási valószínűsége a csoport létszámának függvényében			
n	p_n valószínűség	n	p_n valószínűség
10	0,1169	40	0,8912
20	0,4114	50	0,9704
22	0,4757	60	0,9912
23	0,5073	70	0,9992
30	0,7063	80	0,9999

csaknem 90% a nyeresé esélye, a továbbiakról már nem is beszélve... A valószínűséget megadó képlet (a komplementer kimenetel valószínűségét kivonva egyből):

$$p_n = 1 - \frac{365 \cdot 364 \cdot \dots \cdot (365 - (n - 1))}{365^n}$$

Hasonló megrázó erejű példa az úgynevezett *Monty Hall játék*. Kvízműsorok végén az izgalmas fokozására a nyertest még egy utolsó próbatételnek teszik ki: tippelnie kell, hogy három ajtó közül melyik mögött van a nyereménye az alább látható forgatókönyv szerint:

1. A díjat D ajtó mögé helyezik, a műsorvezető tudja, hogy ez melyik a háromból.
2. A játékos a J ajtóra mutat, de nem azt nyitják ki.
3. A műsorvezető kinyitja az M ajtót, ami mögött nincs díj és a játékos sem választotta (M nem azonos D -vel és J -vel).
4. A játékos dönthet, hogy a megmaradt két ajtóból melyiket választja. Ez a kinyitandó K ajtó lehet az eredeti J vagy a másik.
5. Kinyitják a K ajtót, ha ez azonos a díjat tartalmazó D ajtóval, akkor a játékos nyert.

Alapvetően két stratégia létezik a játékos számára: vagy marad az elsőnek választott ajtónál (nevezzük ezt AZONOS stratégiának), vagy a másik még csukott ajtót választja (nevezzük ezt KOMPLEMENTER stratégiának). Szinte minden diák szerint a két csukott ajtó mögött 50-50% valószínűséggel van a nyeremény, tehát mindegy melyik stratégiát választjuk. Igen hatásos, ha a valóságban, vagy a számítógép segítségével (például az [1] linkről letöltött csomagban a *montyball* könyvtárban az *index.htm* fájl megnyitásával) szimulálva elkezdjük játszani a szituációt. Általános megdöbbenésre kiderül, hogy a KOMPLEMENTER stratégiával kétszer akkora a nyeresé esélye, mint az AZONOS stratégiával! Még ezután sem könnyű ezt a tényt a diákok számára matematikailag emészthetővé tenni (talán a legfrappánsabb magyarázat: ha a játékos eredetileg nem-nyerő ajtót választott, akkor biztosan megmutatják neki a másik nem-nyerő ajtót, így a váltással biztosítja, hogy nyerjen és mivel eredetileg 2/3 esélye van nem-nyerő ajtót választani, a váltással 2/3 eséllyel nyer).

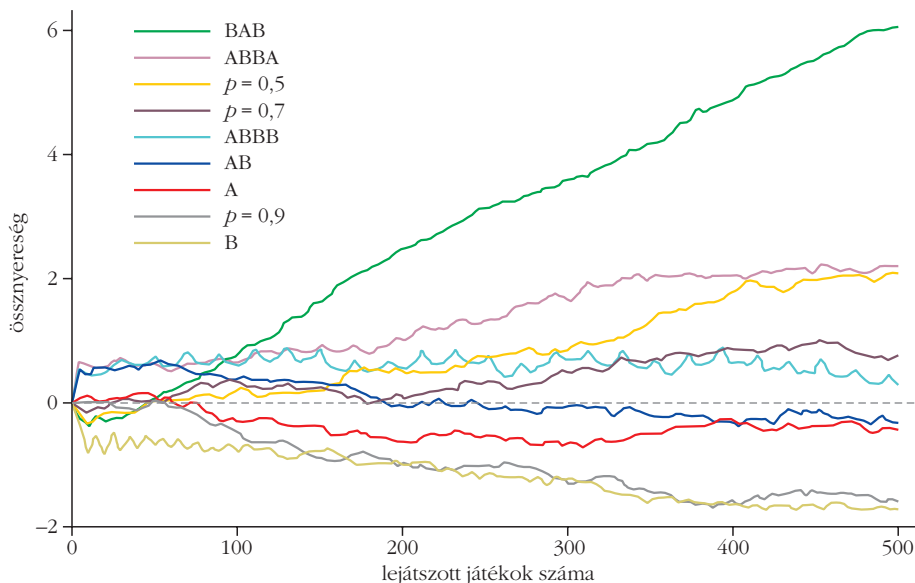
Parrondo-paradoxon

A jelen szakaszban tárgyalt példák részletes kidolgozása megtalálható a *Fizikai Szemlében* közölt korábbi cikkünkben [2], illetve a cikk színesebb, részletes matematikai számításokat tartalmazó elektronikus változatában, amely tematikus oldalunkról [3] letölthető, ahol az anyagot sok képpel, videóval, szimulációval és futtatható alkalmazással illusztráljuk.

Hétköznapjaink során, folyóiratokban, televízióban és rádióadásokban egyre gyakrabban találkozunk kockázatbecslésekkel, döntéshozatalt megkönnyítő valószínűségi megfontolásokkal, következtetésekkel. A természettudományos törvények egy része is valószínűségi megfogalmazásban jelenik meg és a mindennapok döntéshozatalaiban valóban fontos szerepet játszanak a valószínűségi megfontolások. E gondolatmenetek egyik legkézzelfoghatóbb és legtisztább megjelenése a játékelméletben található, ezért tárgyalásunkat játékelméleti bevezetéssel indítjuk.

A legtöbb játék sok lépésből áll, s a játékosoknak lépésenként kell újabb és újabb döntéseket hozni. Ha a játékos döntéseit valamilyen egyértelmű szabály alapján hozza meg, tehát ebből a szabályból adott helyzetben mindig ugyanaz a lépés következik, akkor a játékelmélet szerint *tiszta stratégiát* játszik. A nem tiszta stratégiák alkalmazásakor a döntéshozatal nem egyértelmű. *Nem tiszta stratégiát* választ például az a futballjátékos, aki ugyanabban a szituációban éppen akkori hangulata, megérzése szerint passzolja tovább a labdát. *Kevert stratégiás* játékmód esetében a játékos a játék folytatásának különböző lehetőségei között előre meghatározott valószínűséggel választ, azaz az általa meghatározott valószínűségek szerint véletlenszerűen hozza meg a döntését.

A tudomány számtalan konkrét szituációban – a fizikától kezdve a biológiáig, a közgazdaságtól a szociológiáig – megmutatta, hogy adott helyzetben mindig valamilyen véletlenszerű kevert stratégia az optimális. Például az állatok táplálékkeresési mozgására irányuló megfigyelések azt mutatják, hogy egyes állatfajok (például ragadozó halak, albatroszok, majmok) nem egyszerű (Brown-típusú) bolyongással, hanem az úgynevezett Lévy-eloszlást követve mozognak: ebben az eloszlásban a rövid távú véletlenszerű bolyongást ritkán előforduló hosszabb lépések bontják meg. Ezt úgy is megfogalmazhatjuk, hogy a táplálékkeresők véletlenszerű kevert stratégiát alkalmaznak, a lokális, rövid távon végzett bolyongást (kicsiny terület átfésülését) véletlenszerűen váltogatják a nagyobb léptékű, határozottabb irányultságú mozgással (területváltás). A mikrorendszereket leíró kvantumállapot a rendszer makroszkopikusan (klasszikus fizikai szituációkban) mérhető tulajdonságaihoz rendelhető állapotainak lineáris kombinációja, komplex amplitúdókkal súlyozott kevert állapot (izgalmas és lényegi eltérés az, hogy itt a kimeneteli valószínűségeket ezen amplitúdók négyzetei adják). Egyértelműen kijelenthető, hogy a kevert stratégiák a tudományban és a mindennapi életben egyaránt kiemelt jelentőséggel bírnak.



1. ábra. A <http://www.cut-the-knot.org/ctk/Parrondo.shtml> oldal szimulációját használva.

A kevert stratégiákra vonatkozóan *Juan Parrondo*, a madridi egyetem fizikusa igen különös és döbbenetes felfedezést tett, ami erősen foglalkoztatja a legkülönbözőbb tudományterületek (például fizika, biológia, közgazdaságtan és szociológia) képviselőit. Azt a ma már *Parrondo-paradoxon* néven ismertté vált – e helyen játékelméleti megfogalmazásban interpretált – állítást bizonyította, hogy *két, stabilan veszteséges stratégiát keverten játszva – akár véletlenszerű kevert stratégiával, akár megfelelő fix minta szerint keverve – az eredmény folyamatos, nagy nyereség lehet!*

Tekintsünk példaként két (**A** és **B**) szerencsejátékot, amelyekben minden egyes játékmenet során legyen a tét egységnyi. A játékok részletes leírása a fentebb megadott hivatkozásokon megtalálható, e helyen elegendő annyit rögzítenünk, hogy mindkét játék nyeresége negatív várható értékű, azaz veszteséges a játékos szemszögéből. Parrondo megmutatta, hogy *ha ezt a két játékot keverten játszunk, akár véletlenszerűen döntve el, hogy éppen melyik játékot játszunk, akár megfelelő fix séma szerint felváltva játszva a két játékot, akkor hosszú távon stabilan nyereségre tehetünk szert!* A várakozással ellentétben tehát a kevert játék nem marad veszteséges, hanem alapvető változás áll be: a két veszteséges játék (véletlenszerű, vagy adott séma szerinti) változtatásával nyereséges játék alakulhat ki!

Az Olvasó figyelmébe, kipróbálásra ajánljuk az [1] linkről letöltött csomagban a *parrondo* könyvtárban található három alkönyvtárban levő szimulációkat. Jól látható, hogy mind az **A**, mind a **B** játék negatív várható értékű (a pontos számítás szerint az **A** játék nyereségének várható értéke játékonként $-0,01$, míg a **B** játéké $-0,0087$). Ezzel szemben, ha a két játékot determinisztikus vagy véletlenszerű kevert stratégiával játszunk, akkor bizonyos stratégiák esetén a nyereség várható értéke pozitív lesz! Adott minta szerinti kevert játék jelentése a következő: például a **BAB** minta szerinti játékmene-

tek során újra és újra egy **B**, majd egy **A**, végül újra egy **B** játékot játszunk. Például a **BAB** minta szerinti kevert stratégiával a nyereség várható értéke $0,0574$, vagy az **ABBA** mintáé $0,0147$, viszont például az **AB** mintáé $-0,0067$. Véletlenszerű kevert stratégiák során mindig valamilyen adott p valószínűséggel játszunk **A** játékot és $1-p$ valószínűséggel **B** játékot. Például $p = 0,5$ vagy $p = 0,7$ valószínűség esetén a nyereség várható értéke $0,0156$, illetve $0,0084$ lesz, viszont például $p = 0,9$ valószínűséggel játszva $-0,0034$ (a számítások szerint $0,0703 < p < 0,8471$ esetén nyereséges a stratégia).

Az 1. ábrán számítógépes szimulációt használva ábrázoltuk az **A**, illetve **B** játékok, valamint különböző kevert stratégiák során az össznyereség alakulását a lejátszott játékok számának függvényében.

A Parrondo-paradoxon természetesen nem csak a játékelméletben jelenik meg, átfogalmazható például mechanikai mozgásokra vonatkozó állítássá is, egy konkrét példa tekinthető meg a [4] hivatkozásokon található videón. A modellben mind a sárga színű **A**, mind a zöld színű **B** mozgólépcső lefelé halad. Az **A** lépcső egyenletesen lefelé, a **B** lépcső pedig alternáló mozgással: rövid ideig felfelé, majd ugyanannyi ideig kétszer akkora sebességgel lefelé mozog, így tehát végül **B** átlagsebessége is lefelé mutat, még hozzá azonos értékű **A** sebességével. A két mozgólépcsőt külön-külön üzemeltetve tapasztalhatjuk, hogy a fekete golyóval reprezentált utas bármelyik lépcsőn lefelé mozog. Ha azonban egyszerre működtetjük a két mozgólépcsőt, és mozgásukat megfelelően szinkronizáljuk (az alternáló lépcső n -edik foka a másik lépcső n -edik és $(n-1)$ -edik foka között „rezeg”), akkor azt láthatjuk, hogy a két, egyenként lefelé haladó mozgólépcsőn az utas megfelelő pillanatban átlépve az egyik lépcsőről a másikra, felfelé haladhat. Az úgynevezett *molekuláris (Brownian ratchet) motorok* modelljei értelmezhetők a Parrondo-paradoxon interpretációjaként [5]. Két, külön-külön például balra mutató eredő erőhatású potenciált kapcsolgatva a potenciáltérben mozgó mikrorészecskék statisztikus átlagban jobbra haladhatnak (a fentebbi mozgólépcsős modellel való szoros analógia igen nyilvánvaló). A témáról magyar nyelven a *Fizikai Szemlében* megjelent [6] cikket ajánljuk olvasásra.

Nyilván sokakban vetődik fel a kérdés, hogy miként lehetne ezt az izgalmas felfedezést a hétköznapi életben, például a szerencsejátékokban, vagy mondjuk a tőzsdén kamatoztatni. A szerencsejátékok vonatkozásában érdekes és részletes elemzés található a [7] oldalon a pókerben való alkalmazásra. Bár a gazdasá-

Ising-típusú modellek

modell	ágensek, <i>elemi állapotok</i>	lokális kölcsönhatás, J	globális hatás, H	fluktuációk, T
mágnes	elemi mágneses dipólusok, <i>felfelé-lefelé</i>	rövid távú mágneses vonzó- és taszító erők	külső mágneses tér	hőmérsékleti fluktuáció
agy	neuronok, <i>aktív-passzív</i>	szinaptikus erősítések és gátlások	külső inger	küszöbpotenciál-ingadozás, elektrokémiai zaj...
választás	választópolgárok, <i>republikánus-demokrata</i>	beszélgetések, munkakapcsolatok, szex...	média, áremelés, természeti katasztrófák	hangulatváltozások, magánéleti történések

gi tudományokba csak lassan hatol be ez az új eredmény, de azt már kimutatták, hogy bizonyos esetekben két külön-külön hosszútávon veszteséges részvényportfólió közötti véletlenszerű tőkeátcsoportosítások révén az alaptőke növekedhet! Két kapcsolódó érdekes olvasnivaló található a [8], illetve [9] címeken. A [3] honlapunkon a témához kapcsolódó linkgyűjtemény is segíti a további tájékozódást.

Komplex rendszerek

A fizikában nagy jelentőségűek az olyan modellek, amelyekben az alkotóelemek nagy száma és a közöttük lévő kölcsönhatás révén a rendszer globális viselkedése az egyes elemekétől lényegesen eltérő sajátosságokat mutat. Másképpen fogalmazva: a kooperatív viselkedés következtében az egész nem egyszerűen a részeinek összege. Az ebből kialakuló komplex rendszerek fogalma napjainkra interdiszciplinárisá vált és a tudomány számos területén megjelenik olyan kölcsönható rendszerekben, ahol az egyes egyedek valamilyen optimális állapot elérésére törekednek. Ilyen típusú viselkedés megfigyelhető a gazdaságban, a szociológiában, a biológiában vagy fizikai rendszerekben is, ahol a kölcsönható elemek (ágensek) nagyon eltérőek, de hasonló korrelatív viselkedésük a háttérben univerzális törvényeket sejtet. Ezen rendszerekben a komplexitás az egyszerre jelenlévő különböző tényezők eredő hatásaként jelenik meg, úgymint az egyedek (fizikai) kölcsönhatása, vagy dinamikai viselkedését leíró törvényszerűségek (például sejtautomata-szabályok), vagy valamilyen külső tényező befolyása, esetleg a rendszer speciális geometriai struktúrájából eredő kényszerek.

A komplex rendszerek igen széles osztálya írható le az alábbi tulajdonságú modellekkel:

- azonos típusú, véges sok lehetséges állapottal rendelkező ágenszt (elemet) tartalmaznak,
- az ágensek száma igen nagy (termodinamikai határesetben végtelen),
- az ágensek meghatározott topológiában (többnyire valamilyen rácsstruktúrában) helyezkednek el,
- az ágensek között *lokális* (rövid távú „szomszéd-szomszéd”) *kölcsönhatások* vannak,
- létezhetnek a rendszer egészét (azaz minden ágenszt) érő *globális* (külső) *hatások*,

- az ágensek szintjén *véletlenszerű állapotváltozások* (fluktuációk) történnek.

A fenti sajátosságokkal bíró *Potts-típusú modellek* számos különböző tudományterületen használatosak, mint például fizika (mágnesek, gázok, rugalmas testek stb.), kémia (oldatok, autokatalitikus reakciók stb.), biológia (populációdinamika, agy stb.) és humán tudományok (szociológia, makrogazdasági folyamatok stb.). A kétállapotú Potts-moddell az *Ising-moddell*, amelyben a rendszer ágensei csak két lehetséges elemi állapottal rendelkeznek. Az érdeklődés felkeltése céljából csupán két kapcsolódó olvasnivaló: [10] cikkben az Ising-moddell szociológiai interpretációját, míg a [11] tanulmányban a Potts-moddell keresztretjvények megoldására való alkalmazását találhatjuk.

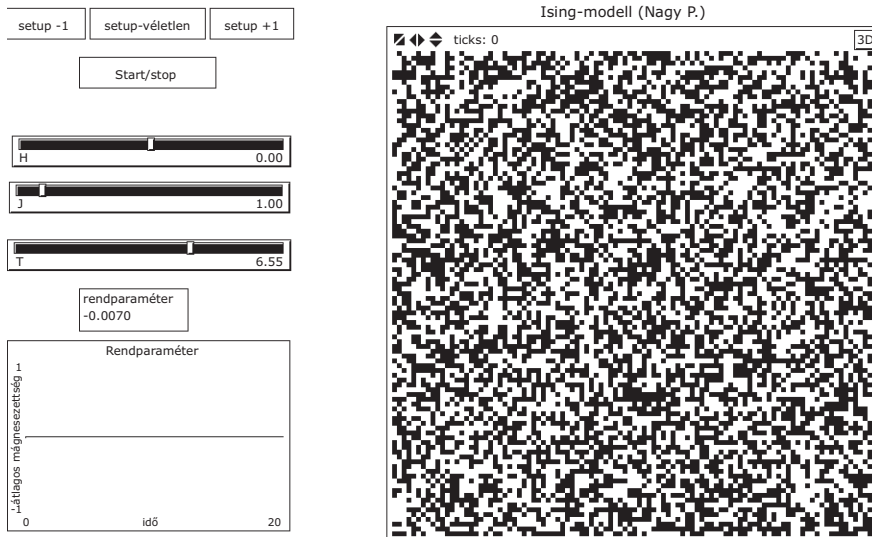
A 2. táblázat néhány példát mutat az Ising-moddell leírható rendszerekre.

Jelölje az i indexű ágens elemi állapotát $s_i = \pm 1$ és vegyük figyelembe, hogy a szomszédos elemek közötti kölcsönhatás az elemi állapotok szorzatával arányos potenciálisenergia-csökkenést eredményez. Egy ágens E potenciális energiáját (Hamilton-függvényét) könnyen felépíthetjük úgy, hogy az *energiaminimum elvét* követve az egymást erősítő („vonzó”) lokális szomszéd-szomszéd állapotkapcsolatok csökkentésük, az egymást gyengítő („taszító”) állapotkapcsolatok pedig növeljék az energia értékét, illetve az E energiát növelő („taszító”) és azt csökkentő („vonzó”) külső tereket veszünk figyelembe, például:

$$E(s_i) = -J \sum_j^{\text{„szomszéd”}} s_j s_i - H s_i = -s_i \left(J \sum_j^{\text{„szomszéd”}} s_j + H \right), \quad (1)$$

ahol az összegzés az ágenssel lokális kölcsönhatásban levő „szomszédos” ágenseken fut végig, a paraméterek jelentését lásd a 2. táblázatban és k egy specifikus állandó (fizikai rendszerekben a *Boltzmann-állandó*).

A modell viselkedését számítógépes szimulációval tanulmányozhatjuk a *Monte-Carlo módszerek* közé tartozó *Metropolis-algoritmus* segítségével [12]. Az algoritmus úgy szimulálja a rendszer időfejlődését, hogy egy-egy elemi szimulációs lépésben valamely véletlenszerűen kiválasztott ágens aktuális állapotát



2. ábra. Az Ising-modell NetLogo szimulációjának képernyőmásolata (részlet).

$$w(s_i \rightarrow -s_i) = \begin{cases} 1, & \text{ha } \Delta E \leq 0 \\ \exp(-\Delta E/kT), & \text{ha } \Delta E > 0 \end{cases}$$

átmeneti valószínűséggel megváltoztatja, amely kifejezésben a felső eset annak felel meg, hogy az energiaminimum elve szerint az állapotváltozás biztosan engedélyezett, ha az energiaváltozás negatív (hiszen csökkenti az energiát); míg az alsó eset szerint a pozitív energiaváltozással járó állapotváltozás is megvalósulhat a statisztikus fizikából ismert $\exp(-\Delta E/kT)$ Boltzmann-faktorral meghatározott valószínűséggel a (hőmozgásból eredő) fluktuációk által.

Egy Monte-Carlo lépésnek nevezzük, ha átlagosan minden ágens egyszer részt vett elemi szimulációs lépésben. A fenti algoritmus olyan ergodikus Markov-folyamatot generál, amely az egyensúlyi eloszláshoz konvergál, azaz megfelelően nagyszámú Monte-Carlo lépés után a rendszer a termodinamikai egyensúlyának megfelelő állapotba kerül.

A rendszer fentebb leírt szimulációs algoritmusát NetLogo programozási környezetben valósítottuk meg. Az ágens alapú komplex rendszerek szimulációjára kifejlesztett ingyenes programozási környezet telepítő fájlja letölthető a [13] honlapról. Telepítés után az [1] linkről letöltött csomagban az *ising* könyvtárban található *Ising_np.nlogo* fájl indításával futtathatjuk a szimulációt.

A modell vizuális megjelenítése a következő:

- az N darab ágens egy négyzetháló cellái,
- a lokális kölcsönhatásban levő „szomszéd” ágens az élszomszéd cellák,
- a +1 állapotú ágenset (cellákat) piros, a -1 állapotúakat zöld színnel jelöljük.

A rendszer globális (makroszkopikus) állapotának jellemzésére bevezetjük az

$$m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s_i = \frac{N_+ \cdot (+1) + N_- \cdot (-1)}{N}$$

rendparamétert, ahol N_+ , valamint N_- a +1, illetve -1 állapotú ágensek számát jelenti (a rendparaméter értéke +1, illetve -1 a homogén, teljesen rendezett állapotokban és 0 a rendezetlen állapotban).

Alapértelmezésben egy 100×100 méretű négyzethálónk van, tehát az ágensek száma $N = 10^4$. A 2. ábrán egy a „setup-véletlen” gomb megnyomása után generált inhomogén, rendezetlen ($m \approx 0$) kezdeti konfigurációt láthatunk. A szimuláció roppant felhasználóbarát kezelőfelülettel rendelkezik:

- a modell (négyzetháló) méretét a felső – az ábrán nem látható – menüsorban levő „Settings...” gombra kattintás után megjelenő ablakban állíthatjuk be,

• kezdeti konfigurációkat a „setup” gombok valamelyikére kattintással generálhatunk,

- a modell fentebb definiált három (H , J és T) paraméterének értékét a megfelelő csúszkák segítségével állíthatjuk,
- a szimulációt a „Start/Stop” gombbal indíthatjuk, illetve állíthatjuk le,
- a szimuláció sebességét (speed) a felső – az ábrán nem látható – menüsorban levő csúszkával állíthatjuk (húzzuk jobb felé a csúszkát, de ne ütközésig).

A szimuláció futtatása során a megjelenítési mezőben mintegy „filmszerűen” vizuálisan követhetjük a rendszer állapotának időbeli alakulását, valamint a bal alsó részen a rendparaméter pillanatnyi numerikus értékét és időbeli (szimulációs lépések szerinti) grafikonját is.

A szimuláció segítségével igen izgalmas és fontos jelenségeket tanulmányozhatunk. A továbbiakban a J paraméter értéke legyen mindig 1.

Fázisátalakulás

(a) Állítsuk a H paraméter értékét 0-ra (tehát nincs „külső tér”), majd először futtassuk a szimulációt magas T értéknél ($6 < T$). Ekkor a rendszer mindvégig a kezdeti rendezetlen, diffúz ($m \approx 0$) állapotban marad, lásd a 3.a képet.

(b) Ezután csökkentsük a T paraméter értékét, legyen $T \approx 2,3$ és futtassuk újra a szimulációt. Ekkor a rendszer állapotának jellege megváltozik: fokozatosan (az ágens méretéhez képest lényegesen) nagyobb kiterjedésű homogén területek, domének jönnek létre, amelyek folyamatosan változnak, de viszonylag hosszú ideig fent is maradnak, lásd a 3.b képet.

(c) Még tovább, 1 alá csökkentve a T paraméter értékét, azt tapasztaljuk, hogy a domének mérete drasztikusan növekszik. A rendezett állapot fő ismérvének tekintjük, hogy a rendszer méretével összemérhető nagy-

ságú egybefüggő domének jönnek létre, lásd a 3.c képet.

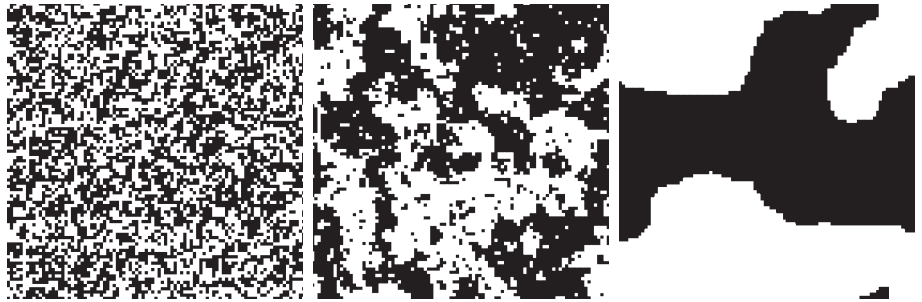
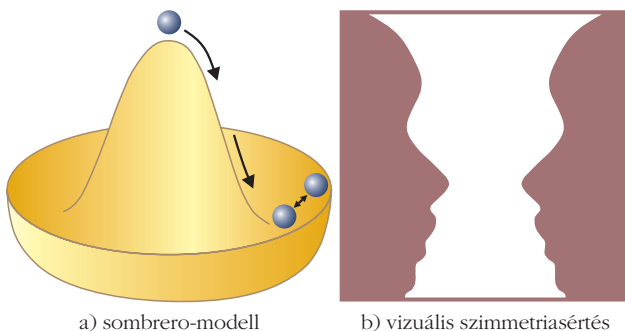
A T paraméter tehát *kontrollparaméter* szerepét tölti be: magas T értéknél a rendszer rendezetlen állapotban (fázisban) van, míg alacsony T értéknél rendezett állapotban (fázisban) találjuk. A T kontrollparaméter változtatásával tehát *fázisátalakulás* történik, az átalakuláshoz tartozó T_c *kritikus érték* (ahogy azt némi kísérletezés árán megállapítható) valahol 2 és 2,5 között van, a pontos elméleti érték:

$$T_c = 2 \frac{J}{\ln(1 + \sqrt{2})} = 2,27.$$

Spontán szimmetriasértés

Alacsony T értékekkel sokszor futtatva a szimulációt azt tapasztaljuk, hogy néha elkülönült, érdekes geometriai mintázatú frakciók jönnek létre ($m \approx 0$), sokszor azonban hosszú futási idő után teljesen rendezett állapotok alakulnak ki, azaz a rendszer „bezuhan” az egyik $m = +1$, vagy $m = -1$ homogén állapotba. Vegyük észre, hogy a rendszer dinamikáját meghatározó (1) képlettel adott Hamilton-függvény $H = 0$ esetben invariáns arra, ha az összes ágens állapotát ellentétesre változtatjuk, azaz szimmetrikus az $s_i \rightarrow -s_i$ ($\forall i$) cserére, de a kialakuló homogén stabil állapotok már nem rendelkeznek ezzel a szimmetriával. Ezt a viselkedést *spontán szimmetriasértésnek* nevezzük. A jelenséget jól szemlélteti a 4.a ábrán látható „sombro-modell”: a kalap alakja forgásszimmetrikus, viszont a tetejére helyezett (instabil helyzetű) golyó csak a perem körüli völgyben találhat stabil egyensúlyi állapotot, és hogy adott kísérletben éppen hol, az véletlenszerű – pontosabban fogalmazva extrém érzékenységet mutat a kezdeti feltételre –, de az egyensúlyi állapot már semmiképpen sem mutat forgásszimmetriát. Ez a fizika egyik legfontosabb és legizgalmasabb jelensége (olvasásra ajánljuk például a [14] oldalt), ezen alapszik többek között a *Higgs-mechanizmus*, amely a részecskefizika standard modellje szerint az

4. ábra. A spontán szimmetriasértés jelensége.



3. ábra. A fázisátalakulás jelensége.

elemi részecskék tömegét magyarázza és melléktermékként létrehozza a napjainkban elhíresült Higgs-bozont, amely után a CERN új LHC gyorsítójában folyt intenzív kutatás (2013. évi fizikai Nobel-díj).

Könnyű megmutatni, hogy agyunk (érzékelésünk, gondolkodásunk) is produkálja a szimmetriasértés jelenségét. A 4.b ábrát nézve két különböző alakzatot ismerhetünk fel, vagy egy fehér vázát, vagy két szembenéző fekete arcot, adott pillanatban mintegy véletlenszerűen választva a két lehetőségből. A [15] oldalon látható animáción forgó macska sziluettjét nézhetjük, amelyet véletlenszerűen láthatunk forogni az óramutató járása szerint, vagy ellentétesen is. (Kérjük az Olvasót próbálkozzék a forgásirány tudatos megválasztásával, illetve megváltoztatásával. Nem mindenkinek sikerül!)

Hiszterézis

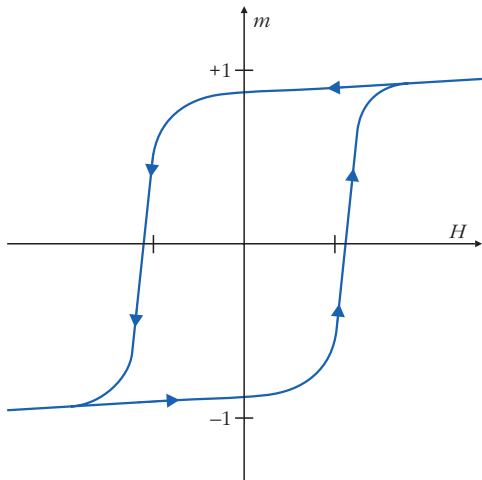
A J paraméter értéke továbbra is maradjon 1, de most T értékét is rögzítsük, legyen $T = 1$, viszont kapcsoljunk be „külső teret”, tehát a továbbiakban $H \neq 0$. Végezzük el az alábbi két szimulációsorozatot, anélkül, hogy újraindítanánk a futtatást (tehát futás közben változtassuk H értékét)! Minden új H érték mellett legalább fél percig várjunk, majd mielőtt megváltoztatnánk H -t jegyezzük fel az aktuális H értékhez kialakult egyensúlyi m rendparaméter értéket! Az általunk „mért” sorozat:

- (a) $H = 1; H = 0,8; H = 0,6; H = 0,4; H = 0,2; H = 0; H = -0,2; H = -0,4; H = -0,6; H = -0,8; H = -1;$
 (b) $H = -1; H = -0,8; H = -0,6; H = -0,4; H = -0,2; H = 0; H = 0,2; H = 0,4; H = 0,6; H = 0,8; H = 1.$

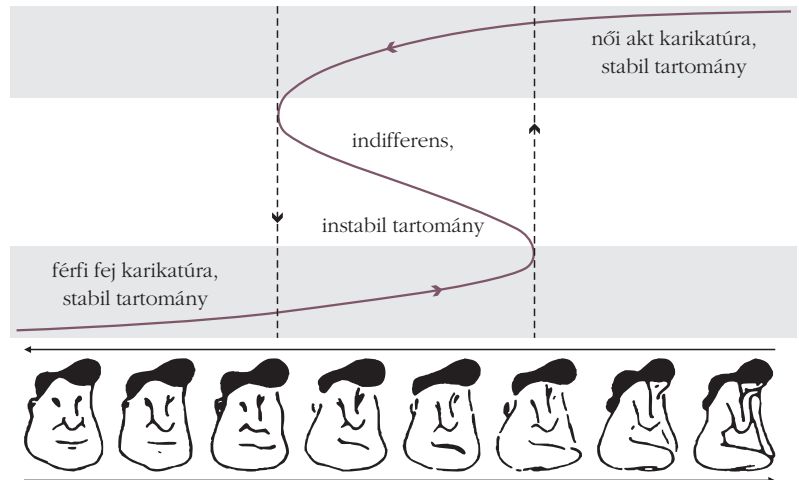
Ábrázoljuk grafikonon az összetartozó H - m értékpárokat!

A kapott grafikon az 5.a ábrán látható jellegű lesz, amely roppant fontos jelenséget reprezentál: a *hiszterézis* jelenségét. Külső tér jelenléte esetén a fázisátalakulás típusa megváltozik: a korábbi másodrendű fázisátalakulás helyett elsőrendű fázisátalakulás jelenik meg, amely legmarkánsabb megnyilvánulása a *hiszterézis*. A *hiszterézis alapvető vonása minden memóriával rendelkező rendszernek*.

Természetesen agyunk (illetve gondolkodásunk) is (mint tipikus emlékezettel bíró komplex rendszer) produkálja a hiszterézis jelenségét. Az 5.b ábrán nyolc kis rajzot láthatunk. Ha a rajzokat nem egyszerre, hanem sorban egymás után jelenítjük meg, akkor – attól függően, hogy jobbról-balra, vagy pedig balról-



a) hiszterézisgörbe



b) vizuális (kognitív) hiszterézis

5. ábra. A hiszterézis jelensége.

jobbra jelenítjük meg őket – a közepén levő rajzokon más figurát érzékelünk (jobbról-balra sorrendben női akt figurát, balról-jobbra sorrendben pedig férfi fej karikatúrát látunk). Az 5.b ábra értelmezése rávilágít arra, hogy agyunk vizuális információfeldolgozása (a fentiekkel analógiában) tipikus hiszterézis-jellegű viselkedést mutat. A hiszterézis jelensége azonban a gondolkodás manipulációjának is alapja. A [16] videón remek, mulatságos példát láthatunk arra, hogy megfelelő kérdéssorral gondolkodásunk miként vezérelhető a megfelelő irányba, ugyanarra az eldöntendő kérdésre ellentétes választ kaphatunk, ha más irányú kérdéssorozatokkal jutunk el hozzá.

Irodalom

1. <http://csodafizika.hu/szimulaciok.zip>
2. Nagy P., Tasnádi P.: Parrondo paradoxon – avagy a kevert stratégiák csodája. *Fizikai Szemle* 63/2 (2013) 37–42., http://fizikaiszemle.hu/archivum/fsz1302/NagyP_TasnadiP.pdf

3. <http://csodafizika.hu/parrondo/>
4. http://csodafizika.hu/parrondo/store/parrondo_lepcso.avi
5. <http://arxiv.org/pdf/cond-mat/9810326.pdf>
6. Czírók A., Csahók Z., Derényi I., Vicsek T.: Biológiai mozgások statisztikai fizikai modelljei. *Fizikai Szemle* 46/6 (1996) 189.
7. <http://parrondoparadox.blogspot.co.uk/>
8. <http://www.sais.se/mthprize/2002/almberg2002.pdf>
9. http://www.cmth.bnl.gov/~maslov/optimal_investment_ijtaf.pdf
10. Jávor M., Geszti T.: Kollektív döntéseket hozni – hogyan látja ezt a szociofizika. *Fizikai Szemle* 66/2 (2016) 59–64., http://fizikaiszemle.hu/archivum/fsz1602/JavorM_GesztiT.pdf
11. K. Jimbo, H. Takamura, M. Okumura: Solving Crossword Puzzles Using Extended Potts Model. In H. Hattori et al. (eds.): *New Frontiers in Artificial Intelligence*. JSAI 2008 Conference, LNAI 5447, 39–47, 2009. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-642-00609-8_5#page-1
12. <http://cserti.web.elte.hu/okt/MonteCarlo-cikk.pdf>
13. <https://ccl.northwestern.edu/netlogo/>
14. <http://www.lasp.cornell.edu/sethna/OrderParameters/>
15. <http://jaced.com/2010/10/01/spinning-cat-illusion/>
16. http://indavideo.hu/video/Tudat_manipulacio

ÚRKUTATÁSSAL A SZERETHETŐBB FIZIKÁÉRT

Komáromi Annamária

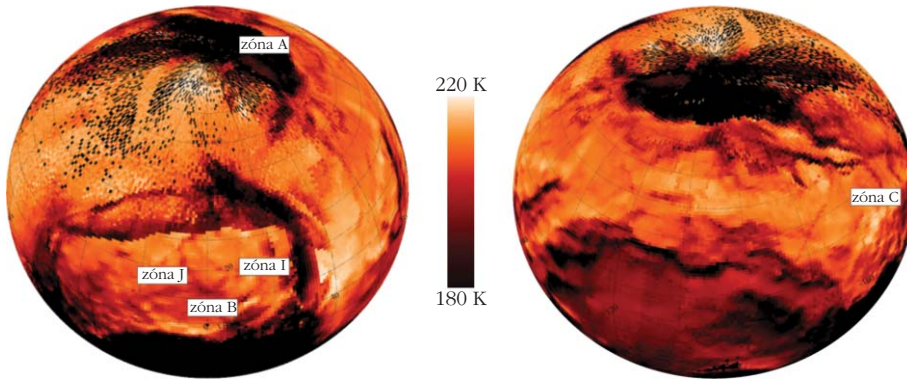
Balassi Bálint Nyolcévfolyamos Gimnázium

Első hallásra talán merész vállalkozásnak tűnik, hogy többek között műholdak, űrszondák segítségével il-



Komáromi Annamária fizikatanár doktori fokozat megszerzésére készül az ELTE Fizika Doktori Iskola Fizika Tanítása program keretében. Angol, olasz és magyar nyelvű publikációinak és előadásainak fő témái az űrkutatás fizikaoktatásba való nagyobb mértékű bevonása és a részecskefizika népszerűsítése. Tagja a Magyar Asztronautikai Társaságnak és az Eötvös Társulatnak. A Skylab űrállomás modelljén bemutatott hővédőernyő-kísérletével bekerült az európai Science on Stage 2017 fesztiválra.

lusztráljuk és magyarázzuk a középiskolai fizika tananyag nagy fejezeteinek alapvető törvényszerűségeit. Azonban, ha jobban belegondolunk, tanításunk során ezek az eszközök meglepően sok területen segíthetnek bennünket. Az űrkutatás révén olyan jelenségekről is egyre bővülő ismereteket kaphatunk, amelyek meghatározó szereplői Földünk további sorsának. Ennek ellenére az űrkutatás mindeddig nagyon szerény mértékben volt jelen az iskolai tantervekben, s csak mostanában kezd hangsúlyosabb szerepet kapni. Külön figyelmet fordítok arra, hogy minél többet hivatkozzak az Európai Űrügynökség (ESA) CubeSat programjának keretében, oktatási céllal készült első ma-



1. ábra. A 67P Csurjumov–Geraszimenko üstökös hőterképe, a zónák a leszállóegység szóba jehető landolási helyei [1].

gyar műholdra, a Masat-1-re, hiszen ez a műhold hazánk büszkesége. Tekintettel arra, hogy tervezői nagyrészt egyetemista diákok voltak, akik csak néhány évvel idősebbek a középiskolás korosztálynál, részletesebb tárgyalásával talán közelebb lehet hozni a természettudományokat a diákokhoz. A fizika tanítása során nagyon fontosak a kísérletek. A Masat-1-nek azért is helye van a fizikaórán, mert általa egy rendkívül sikeres diákkísérletnek lehetünk részesei.

Ebben a cikkben a fizika egy olyan témakörében mutatom be az űrkutatás – ezen belül a mesterséges égitestek – tananyagba történő beillesztését, illetve a tananyag megértését segítő alkalmazását, amelyben ez első ránézésre – talán – nem tűnik nyilvánvalónak, s ez a hőtan.

Hőmérséklet a Földön és az „égben”

A hőmérséklet fogalmának bevezetését követően egy on-line internetes műholdkövető honlap (www.n2yo.com) tanórai bemutatása közben feltehetjük a kérdést, mekkora hőmérsékletű térben keringenek a műholdak, illetve mekkora lehet a mesterséges hold külső felületének, valamint belső terének, berendezéseinek hőmérséklete. Mondjuk el, hogy a mesterséges égitestek rendkívül nagy külső hőmérsékleti tartományban kell, hogy jól működjenek. Ekkor megbeszélhetjük a diákokkal, nem mindegy, hogy a műhold keringése során – bár abban a magasságban a hőmérséklet közel állandó – melyik oldala néz a Nap felé: az árnyékos és napos oldal között jó néhány száz fok eltérés is lehetne, éppen ezért szokták forgatni a műholdat, hogy anyagában ne lépjenek fel akkora mechanikai feszültségek, amelyek a műhold meghibásodásához vezethetnének. A már említett CubeSat program „pikomű-

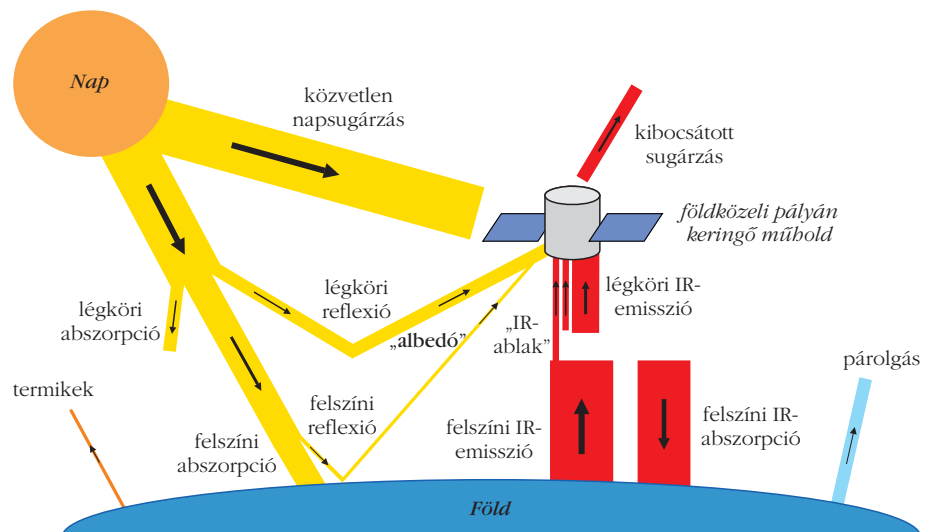
holdjai” közül például a teljes életrajzában (2012. február 13. – 2015. január 9.) kitűnően működő Masat-1-nél folyamatosan figyelték a belső hőmérsékletét is, és amikor $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ alá süllyedt, akkor elindult a fűtés, hogy védje az érzékeny akkumulátort. Fűtésre olyankor volt szükség, amikor a Masat-1 a Föld árnyékában tartózkodott, és így az oldalait borító napelemek nem tudták hasznosítani a Nap energiáját.

Még mindig a hőmérséklet fogalmánál maradván a mesterséges holdak felhasználási területei között megemlíthetjük, hogy az utóbbi években segítenek a vulkánkitörések előrejelzésében is, ugyanis vulkánkitörés előtt megemelkedik a kráter fölött a hőmérséklet, és ezt műholdas távérzékeléssel ki lehet mutatni. Ki lehet vetíteni – érdekességképpen – a Rosetta-űrszonda által 2014 augusztusában a 67P Csurjumov–Geraszimenko üstökösről készített hőterképet (1. ábra) [1]. Ez a hőterkép segített kijelölni a Philae leszállásának helyét, hogy a terület ne legyen se túl hideg, se túl meleg. Az üstökösrag túl hideg területén nem várható jelentős gáz- és porkibocsátás – amit érdekes lenne megfigyelni, megmérni –, illetve a túl meleg területen túl sok a kibocsátott por és ez veszélyt jelent a leszállóegység műszereire, berendezéseire, napelemeire.

Hőterjedés

A hő terjedésének módjait (hőáramlás, hővezetés és hősugárzás) felsorolva, megbeszélhetjük, hogy ezek közül melyik nem lehetséges a világűrben. A hősugárzás illusztrálásához célszerű kivetíteni a 2. ábrát.

2. ábra. Földközeli pályán keringő műholdat érő sugárzások a [2] alapján.



Az ábrán jól lehet elemezni a műholdat érő különböző hősugárzásokat. Egyúttal lehetőség nyílik a planetáris albedó fogalmának tisztázására is, amely ugyan nem tananyag, de hasznos megemlíteni. Az ábra továbbá felhívja a diákok figyelmét arra, hogy minden test hőt sugároz ki magából, amely tény *Kirchhoff* már a 19. században megállapította.

Fényvisszaverő, hővédő „napernyő” – a Skylab űrállomás hővédelme

Az Apollo-program során már megépített, de megmaradt Saturn V hordozórakéta S-IVB harmadik fokozatából alakították ki az első amerikai űrállomást, a Skylabet, amelyet 1973-ban – még személyzet nélkül – juttattak földkörüli pályára. Indításakor azonban az egyik napelemtábla leszakadt és megsérült a hővédő burkolat. A megmaradt fél napelemtábla nem adott elegendő energiát az űrállomás „klimatizálásához”, a hővédő pajzs hiánya ráadásul fokozta az űrállomás felfűtődését. Az első személyzet űrséta során egy – magával vitt fényvisszaverő és hőszigetelő – „napernyőt” nyitott ki és helyezte el az űrállomáson kívül, megfelelő helyen. Ennek következtében az űrállomás belső tere az üzemi hőmérsékletre csökkent és az így elviselhetővé vált hőmérsékleten megkezdődhetett a munka a fedélzetén [3]. A Skylab „napernyője” három rétegű volt: a Nap felőli felső rétege alumínium bevonatú mylar (erősített poliészterfilm), középső rétege laminált, hasadásnak ellenálló nylon, legalsó rétege pedig vékony nylon. Iskolai kísérlettel – egyszerű hőmérsékletméréssel – földi körülmények között is szemléltetni tudjuk azt, hogy egy hővédő ernyő miként védheti meg a mögötte levő tárgyakat egy hőforrás, például egy hősugárzó hőjétől.

Hőtágulás

Ebben a témakörben – miután elvégezzük az alapkísérleteket – ismét érdemes képzeletben kilépni a világrűrbe. Tanulságos azon feladat megtárgyalása, hogy hány százalékkal volt kisebb a Masat-1 éleinek a hossza, felszíne és térfogata a keringése közben, amikor hőmérséklete elérte a kritikus 5 °C -ot, ha feltételezzük, hogy a startnál 25 °C volt a környezet hőmérséklete. A feladat első ránézésre könnyen megoldhatónak tűnik, hiszen ha megadjuk a vázát képező fém anyagát, a függvénytáblázatból már kinézhető annak hőtágulási együtthatója. Közöljük, hogy 1 mm vastag speciális repülőgép-alumíniumból készítették a műholdat, majd beszéljük meg a tanulókkal, hogy tekintsünk el a speciális jelzőtől, számoljunk egyszerűen az alumíniummal. A diákok között van olyan, aki ezután a szokott képletbe behelyettesít, majd a számolás végeztével úgy gondolja, rendben megoldotta a feladatot. Néhányan talán elolvassák a táblázat felső sora fölött levő zárójeles megjegyzést, mely szerint ezek az adatok $101\,325\text{ Pa}$ nyomáson, azaz

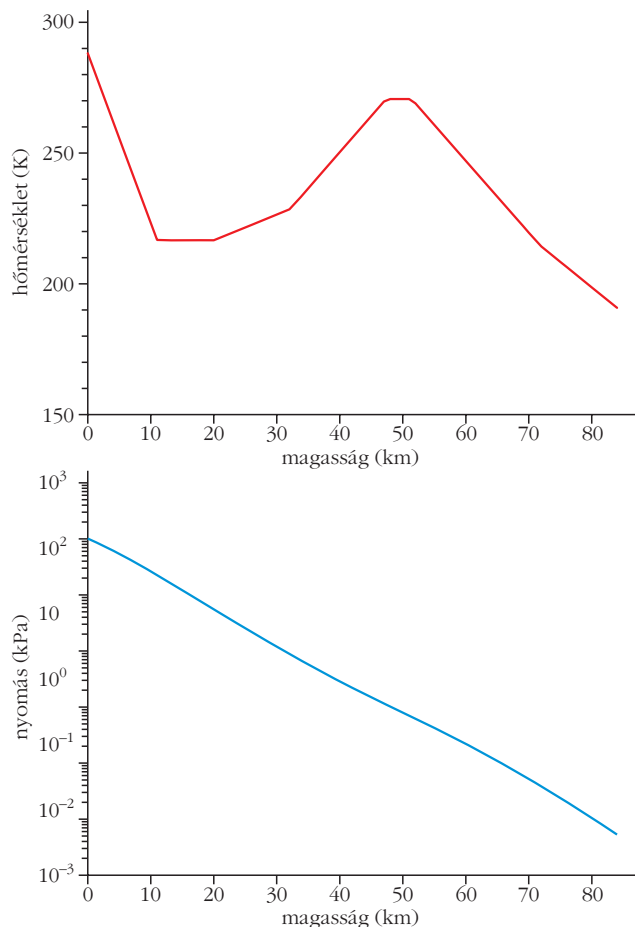
csak normál légköri nyomáson érvényesek, tehát az eredmény nem csak azért lehet különböző a valóságtól, mert nem a speciális alumíniummal számoltunk, hanem a nyomás eltérése miatt is. Ezt elemezve határozottabban tudjuk megbeszélni, a tervezők számára milyen nagy műszaki kihívás a műhold építő elemeit úgy megválasztani, hogy az illesztéseknél, a forrasztásoknál, az integrált áramkörök belső kötéseinél az űrben se legyen probléma.

Itt megemlíthetjük az űrtechnika fogalmát, amelynek keretén belül azok a kutatások és fejlesztések történnek, amelyek lehetővé teszik az űreszközök űrbéli működését. Példaként elmondhatjuk, hogy az űrtechnika fejlődésének köszönhetően a VesselSat-2 30 cm -es élhosszúságú kocka alakú műholdnál sikerült elérni, hogy a pálya mentén végighaladva a belső hőmérséklet ingadozása 1 °C -nál ne legyen több, illetve a Föld Nap körüli keringéséből adódó naptávolsági, illetve napközeli besugárzásból eredő hőmérséklet-ingadozás sem több 6 °C -nál [4]. A diákokat például azzal is motiválhatjuk, hogy elmondjuk, az említett műhold fedélzeti digitális modulátorát magyar űripari cég készítette.

Gáztörvények

A gáztörvények kapcsán érdemes foglalkoznunk a Föld légkörével. Ismertethetjük, hogy a mérések alapján a légkört alkotó gázok sűrűsége a magasság függvényében exponenciálisan csökken. Szakkörön részletesebben is megbeszélhetjük, hogy a barometrikus magasságformula szerint homogén gravitációs térben, állandónak tekinthető hőmérsékleten, a tengerszinttől felfelé haladva a nyomás is exponenciálisan csökken. Hívjuk fel a diákok figyelmét arra, hogy exponenciális összefüggések grafikus megjelenítése során célszerű logaritmikus skálát használni (3. ábra). Az ábra két grafikonját (hőmérséklet-magasság, illetve nyomás-magasság) együtt elemezve, első ránézésre ellentmondásba kerülünk az állandó hőmérsékletre vonatkozó előbbi feltételünkkel. A grafikonokat figyelmebben megvizsgálva azonban látható, hogy arányaiiban a hőmérséklet-ingadozás messze eltörpül a nyomás változásához képest, másrészt a nyomást ábrázoló görbén ki lehet venni az „enyhe hullámzást” (két alig észrevehető domborulat) a hőmérséklet változásainak megfelelően. Szintén kutatómunka lehet, hogy milyen okok húzódnak meg a hőmérséklet ingadozása mögött.

Az órán elmondjuk azt is, hogy a légkörnek nincs meghatározható felső határa. A részecskesűrűség közelítőleg $300\text{--}400\text{ km}$ magasságban éri el a Naprendszer bolygóközi részecskesűrűségének igen alacsony értékét. Itt említsük meg, hogy a műholdpályák magassága is legalább ekkora kell legyen ahhoz, hogy e műholdak zavartalanul működhessenek. Érdemes kis kitérőt tennünk a Marsra és a Vénuszra. Ezen Föld típusú bolygók teljes kémiai összetétele nagyon hasonló a Földéhez, a fő légköri összetevőjük viszont a CO_2 . A Mars légköre



3. ábra. A légkör hőmérsékletének és nyomásának változása a magasság függvényében a <http://www.pdas.com/atmosTable1SI.html> adatai alapján.

annyira ritka, hogy csak 0,7-0,9 kPa a felszíni légnyomás, a Vénusz felszínén ezzel szemben a légköri nyomás 9,2 MPa. Gyakorló feladatként a diákokkal kiszámoltathatjuk, hogy az óceánban milyen mélyen lenne ekkora a hidrosztatikai nyomás. Az említett két bolygó nemcsak felszíni légköri nyomásában tér el jelentősen a Földtől, hanem hőmérsékletében is. Az átlagos hőmérséklet a Marson 218 K, a Vénusz felszínén 730 K.

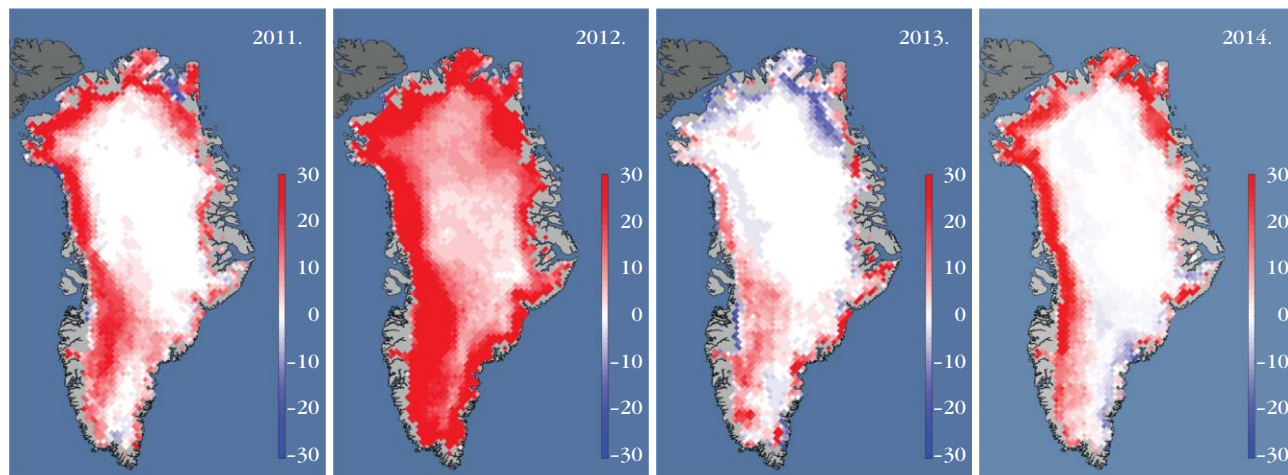
Halmazállapot-változás, éghajlatváltozás

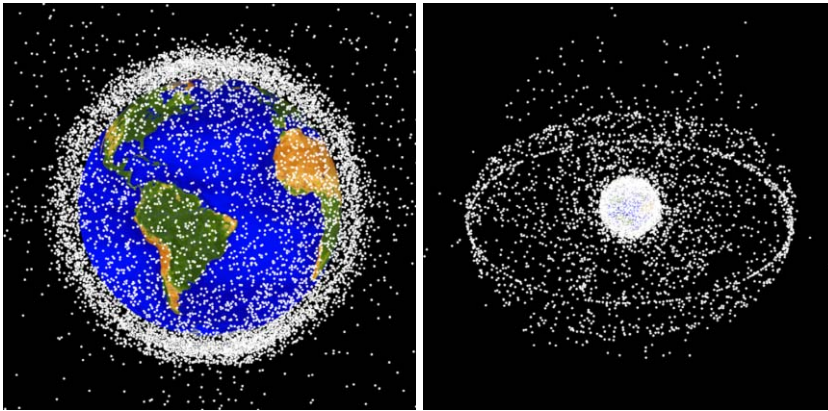
A termodinamikában vizsgáljuk a halmazállapot-változásokat. A 21. század fizikaóráján nem tehetjük meg, hogy az olvadásról például csak a főzőpohárban levő jég olvadása kapcsán beszéljünk. A halmazállapot-változás kapcsán felvetődhet az állandó jégtakarók nagyságának csökkenése, és így szóba kerülhet a klímaváltozás. Itt megint segítségünkre vannak a mesterséges holdak, amelyek segítségével évről évre vizsgálják az állandó jégtakarók alakulását. Az 4. ábrán a grönlandi jégtakaró esetében figyelhetjük meg négy egymást követő évben, hogy a különböző területeken a sok éves átlaghoz képest hány napon át volt olvadt a jég.

Az ábra alapján megállapíthatjuk: ahhoz, hogy éghajlatváltozásról lehessen beszélni, és az erre vonatkozó prognózist fel lehessen állítani, feltétlenül szükséges a folyamatos, hosszú távú adatgyűjtés. Ugyanis, mint az itt is látható, a folyamatok rövid távú mintavételezés alapján nem értelmezhetők, illetve téves következtetések vonhatók le. A kutatók az éghajlatváltozásra vonatkozó előrejelzéseiket hosszú távon gyűjtött adatok alapján elkészített modellek segítségével fogalmazzák meg. Mivel a modellek különböznek, így eltérések adódnak a különböző kutatási központok „jóslatai” között.

Beszélnünk arról is, hogy az adatokat különböző jellegű mérőállomásokon lehet regisztrálni. Két alapvető csoportot különböztethetünk meg: felszíni bázisú és űrbázisú mérések. A műholdak mérései jelentős szerepet töltenek be a klímaváltozás-modellek megalkotásában. A meteorológiai műholdakkal megfigyelhetjük a felhőzetet, a levegő páratartalmát, a légmozgásokat, valamint a felszín hőmérsékletét. Ezen adatok alapján születnek – többek között – az időjárás előrejelzések. A mesterséges holdak komoly előnye, hogy egy időben nagy területet látnak. Erre korábban egyetlen módszer sem volt alkalmas. Fizikátörténeti érdekességként emondhatjuk, hogy az első meteorológiai műholdat 1960-ban helyezték Föld körüli pályára.

4. ábra. Olvadásos napok anomáliája Grönlandon 2011 és 2014 között [5].





5. ábra. Űrszemét a Föld körül közel és távol.

A termodinamika első főtétele és az Űrszemét

A termodinamika első főtételének tanításakor rávezetjük a diákokat, hogy abban igazából az energia megmaradásának törvényét fogalmazzuk meg. A törvény jobb megértését szolgálja, ha minél szélesebb területről veszünk példákat. Nézzük meg, hogy a műholdak esetében milyen példát hozhatunk fel a törvény érvényességének bizonyítására. Probléma felvetése: tekintsünk egy geostacionárius műholdat. Együtt kering a Földdel, így a műholdat és a Földet zárt rendszernek tekinthetjük, amelyben a műhold és a Föld között fellépő gravitációs erő belső erő. Miért nem mond ellent ez az „örökmozgás” a termodinamika I. főtételének, amely tulajdonképpen az energia megmaradásának általánosabb törvénye? Valószínűleg azonnal érkeznek a válasz a diákoktól, hogy a műholdak nem maradnak örökké pályájukon, előbb-utóbb a sűrűlódás következtében (amely ugyan nagyon kicsiny, az érintett magasságokban és ezért lehet sokáig eltekinteni tőle) összenergiájuk csökken, ezzel keringési magasságuk is kisebb lesz, idővel bekerülnek a Föld légkörébe. A növekvő sűrűlódás (közegellenállás) hatására bekövetkező légkörbe kerülés és megsemmisülés a műholdaknál időben nagyon eltérő hosszúságú folyamat lehet. Így előfordulhat, hogy egy már működésképtelen műhold évekig, esetleg évtizedekig is kering még az űrben. Meglepő példa erre az ESA ENVISAT földmegfigyelő műholdja, amely előrejelzések szerint még 150 évig „kísért” majd. Ez a probléma a huszonegyedik században egy újabb kihívást jelent az űrkutatók számára. A sokasodó Űrszeméttel ma már feltétlenül foglalkozni kell, a 2013-as adatok alapján a félmilliót is meghaladja a Föld körül keringő kisebb nagyobb űrtörmelék. Fizikaórán is érdemes beszélni róla, és a téma érdekessége miatt biztosan van olyan diák, aki szívesen elmélyed az „űrszemétben”. A 5. ábrán illusztrációt láthatunk a Földün-

ket körülvevő sokasodó Űrszemétről [6], a 6. ábra pedig a Föld körül keringő nyilvántartott mesterséges objektumok számának érzékelteti [7].

Az ESA honlapján egy 2014. júniusi hírben megemlítik, hogy az Európai Űrügynökség új, érdekes módszert próbál kidolgozni az Űrszemét begyűjtésére [8]. Ez egy ősi vadászati technikához való visszatérést jelent: szígonnyal próbálnák levadászni a már működésképtelen és irányíthatatlan űreszközöket. A világűrben keringő irányíthatatlan objektumok kapcsán a diákokban is felmerülhet a kérdés, hogy mi történik akkor, ha

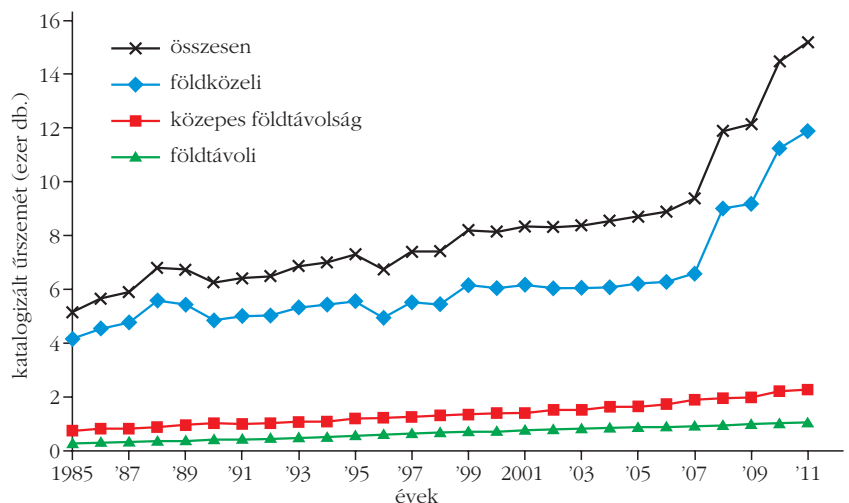
összeütköznek? Az Űrszemét hihetetlenül nagy mennyisége ellenére számítások alátámasztják, hogy az ütközés valószínűsége nagyon kicsi.

Az említett űrkutatási vonatkozásokat tanításomban folyamatosan változtatom, bővítem, hogy ezzel színesítem a fizika tananyagot. Fontosnak tartom, hogy olyan diákok is közelebbi információkat szerezzenek az űrkutatásról, akik egészen más területen képzelik el továbbtanulásukat, hiszen századunkban az űrkutatás egyre nagyobb hatással van mindennapi életünkre is.

Irodalom

1. <http://blogs.esa.int/rosetta/2014/09/08/virtis-maps-comet-hot-spots/>
2. Jánosi Imre, Tél Tamás: *Bevezetés a környezeti áramlások fizikájába*. Typotex, Budapest, 2012; http://etananyag.ttk.elte.hu/FiLeS/downloads/EJ-Janosi-Tel_kornyaram.pdf
3. <http://history.nasa.gov/SP-4208/ch14.htm>
4. http://www.urvilag.hu/hazai_kutathelyek_es_uripar/20140109_vesselsat2_a_hibatlan_keteves
5. <http://nsidc.org/greenland-today/2015/01/2014-melt-season-in-review>
6. http://www.nasa.gov/mission_pages/station/news/orbital_debris.html#.VQWyJo5wspk
7. www.oosa.unvienna.org/pdf/pres/stsc2011/tech-31.pdf
8. http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2014/06/Harpoon_used_to_capture_a_satellite

6. ábra. Egyre sokasodó Űrszemét.



A SZERKEZETI HIERARCHIA ÉS A FÖLÉPÍTÉS-LEBONTÁS (SZÉTSZEDEM-ÖSSZERAKOM) ELV

Bérczi Szaniszló
ELTE, Anyagfizika tanszék

Törekvések a természettudományok hatékony oktatására

A természettudományok a közoktatás fontos részét képezik, ezért megkedveltetésük folyamatosan napirányban lévő feladat. Az oktatási formák frissítését kívánja a változó élet is, az egyre összetettebbé váló világ működésének megértése céljából. Írásom egy olyan nézőpontrendszerrel mutat be, amely több természettudományos tantárgy tanítását is segítheti és a tanárképzés során is előnyöket jelent az egyetemi hallgatók fölkészülésénél. Ez a nézőpont a jelenségek szinteken átnyúló kapcsolati rendszerét teszi láthatóvá. Kiemelkedő szerephez jutnak benne a szinteket meghatározó állandóságok.

Amikor az anyagtudományt a lehető alkalmazásokkal együtt építjük föl, akkor természetes elindulásnak kínálkozik az anyagokhoz történő *kétféle megközelítés*. Az anyagokat egyrészt vizsgálat tárgyává tehetjük és elemezhetjük (szétszedhetjük, javított szerkezettel rakhatjuk össze stb.). Másrészt az anyagokat tekinthetjük fölhasználásra váró nyersanyagoknak, építőelemeknek is. Ez a kétféle megközelítés alapvetően két tudományági irányt jelöl ki. Az első: az *elemző nézőpont* kutatja az anyag belső szerkezetét, analitikus szemléletű, és a természettudományok világába vezet el bennünket. A második: *a fölhasználó* az anyagokból építő szemlélet a mérnöki tudományokhoz vezet el. Ezt az anyagok vizsgálatánál használt stratégiát az *1. táblázatban* mutatjuk be [1, 2].

Először foglalkozunk az anyagot vizsgáló ismeretrendszer kiépülésével. Kedves példám a NASA-holdkőzetek bemutatón egy geológiai példásor. A szerkezeti fölbontás a geológia természetes adottsága, hiszen egyszerre vizsgál az embernél jelentősen kiterjedtebb és az embernél számottevően kisebb anyagi rendszert: a hegységet, és a belőle vett kőzetmintát. A szétszedem-összerakom elv azzal indul, hogy föltér-

A szerző megköszöni *Radnóti Katalinnak*, hogy javaslataival segítette a cikk jobbá tételét.



Bérczi Szaniszló az ELTE-n szerzett fizikuscsillagás oklevelet (1975), doktorált matematikából (1987), majd lett a földtudomány (planetológia) kandidátusa (1995). 42 éve tanít az ELTE TTK-n. A planetológiában, kozmikus és földi anyagvizsgálatokban, a szimmetria, valamint az eurázsiai műveltségek fejlődésének témakörében végez kutatásokat. Egyik fő munkája a *Kristályoktól bolygótestekig* című monográfia (Akadémiai Kiadó, 1991). A köz- és a felsőoktatás részére úrszondamodell fejlesztésében vesz részt.

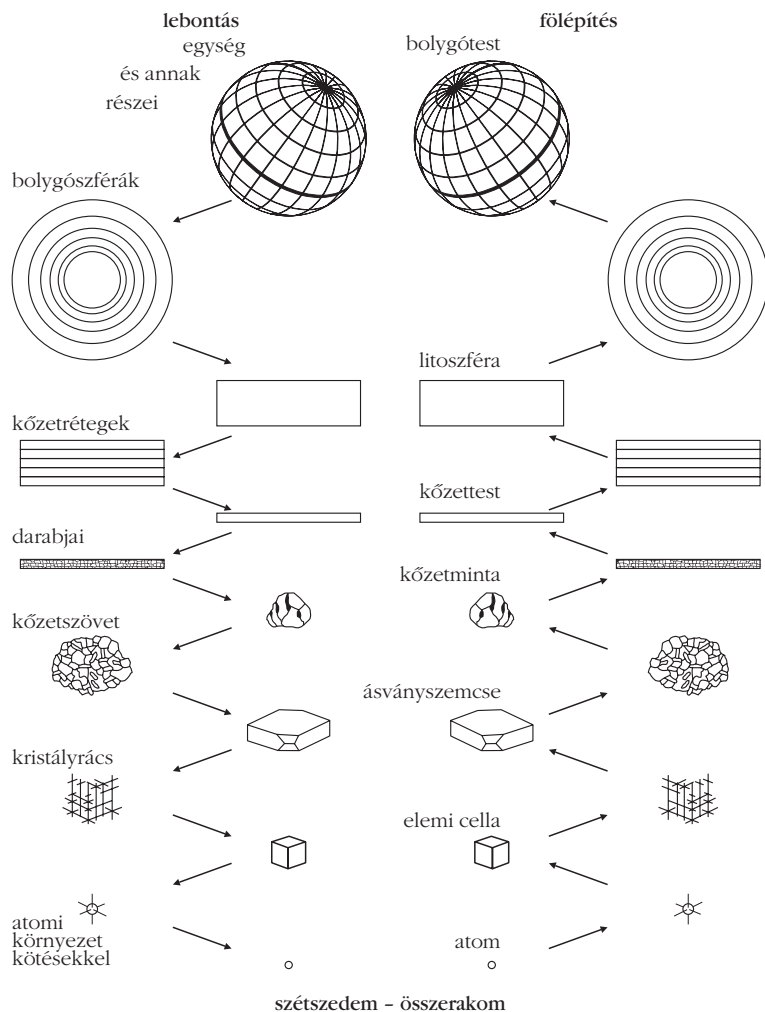
<i>1. táblázat</i>	
Az anyagvizsgálat természettudományos (rendszer) és mérnöki (eszköz) szemlélete	
rendszer	eszköz (építőelem)
fő célja az anyagok vizsgálata fölbontása, egyre kisebb alkotóelemekre szedése, ezek analitikus vizsgálata, az elemek közötti kapcsolatok szerveződésének föltárása	fő célja az anyagok tulajdonságainak összehasonlítása, belőlük a legalkalmasabbak kiválasztása, az anyagok előnyös szerepének fölismerése
kulcsszavak	
az elemzői oldalán: összetétel, szerkezet	a fölhasználói, építői oldalán: tulajdonság, funkció

képezem a kőzettestet, például a Badacsony tetején fekvő hatalmas bazalttestet, majd mintát veszek belőle – egy öklömnyi nagyságú „kézipéldányt” –, és azt további vizsgálatra a laboratóriumba viszem.

Vannak olyan kőzetek, amelyek kézipéldányán már megfigyelhető az összetettség következő lépcsője: a kőzet ásványokból áll. Vékony csiszolatot készítve ez minden kőzetnél megfigyelhető. Ez egy 30 mikrométer vastagságú, 2×4 cm-es üveglapra fölragasztott, áttetsző preparátum, amelyet kőzettani mikroszkóppal lehet tanulmányozni.

A kőzettesteket térképező geológiától, a kőzetek kialakulását tanulmányozó kőzettanon át eljutottunk az ásványokat tanulmányozó ásványtanig, de minden „tudományági emeleten” csak rövid ideig tartózkodunk. Ebből már látszik, hogy a *szerkezeti hierarchia* építése tantárgyanként megismert tudományágakat is összekapcsol amellest, hogy a vizsgált anyagi rendszer ugyanattól a nagyobb rendszertől indult el, és szervesen bontja föl a vizsgálati anyagot. Szervesen összetartozó alrendszereket mutat be. Kétségtelen, hogy az ásványokhoz érkező fizikai föltárás különböző irányokba is elindulhat: vizsgálhatja a mágneses alrendszerekre bontást, eljutva például a mágneses doménekig, majd az atomi és részecske szintű mágneses jelenségekig. Egy másik ágon haladva, röntgenkristallográfiával megmutathatja a kristályrács szerkezetét. Kémiai megközelítéssel eljuthat a molekulák, atomok világáig és sugárzásos vizsgálatokkal az atommagokig. Mindez csak érzékelteti azt, hogy a szétszedéses vizsgálat a különféle alrendszerek vizsgálatával mégis egységes képbe rendezi az anyag szerkezetét a *geo-, fiziko- és kemovonalakon*.

A megfigyelhető állandóságok sorozatából előttünk áll egy hierarchia, amely *egymásba ágyazottsági* sort is képvisel [3]. Egy adott szintig vitt szétszedés során a



1. ábra. A Földtest szerkezeti hierarchiája a geoszféráktól bontva. Első példánk ennek a kőzettest és az atomi szint közötti szakaszát említi. A bal oldali oszlop a szétszedés, a jobb oldali oszlop az összerakás szempontjából nyilazza az irányokat a szerkezeti szintek között.

szétszedés szintjén található készletek, a szereplők gyakorisága, energetikai viszonyai is fontos jellemzői lehetnek e szintnek. (Például az atomok szintjén a variációs készlet a kémiai elemek periódusos rendszerében szereplő elemek, ezek gyakorisága lehet például a kozmikus elemgyakoriság, energetikájukra jellemző lehet például az ionizációs potenciál).

Egy nagyobb rendszert minél több ilyen szintre tudunk fölbontani – ismereteink alapján –, annál árnyaltabban, többféle kölcsönhatásból tudjuk azt (gondolatban) megépíteni. Tekintsünk például egy bolygótestet. Szétszedési sorozatát mutatja az 1. ábra. Rendszerének elemzését, szétszedését erőtereivel (gravitációs, mágneses) kezdhetjük, folytathatjuk a geoszférákkal, majd ezek egyikénél – például a litoszféránál – folytatva a szétszedést, fölbonthatjuk rétegtani sorozatokra, és ezek egyik alrendszerénél jutunk el az említett badacsonyi bazalttréteggig, egy kőzettestig, ahonnan már ismerjük a fölbontást (1. ábra).

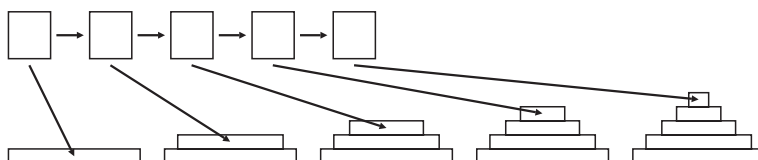
Egy anyagvizsgálati tantárgyi vizsgához ennyi talán elég is lehet. De a szerkezeti

hierarchia vizsgálatának összképbe rendező munkái ezzel csak elkezdődtek, hiszen számos más tudományág a saját vizsgálati tartományában is elvégzi a fölbontást. Mielőtt ezeket is bevonnánk a szintézisbe, mutassunk be egy másik fölhasználási szempontot is. Ennek rövid összefoglalása az lehet, hogy a műszaki alkalmazások is, időben előre haladva, egyre összetettebb szerkezeteket építettek össze. E szerkezetek a szerkezeti hierarchia újonnan megismert mélyebb rétegeit hasznosították, egyre mélyebbre jutva a szerkezeti lépcsőkön. Megfordítva: az anyagok ismeretéhez kötött műszaki műveltségben, időben visszafelé haladva, (gondolati szétszedéssel) a mai szerkezetek ősi elemeit találjuk meg. Ha egy villanymozdonyból (Kandó Kálmán találmánya) kivesszük az elektronikát, a 20. század eleji villanymotorral hajtott villamost találjuk, amely a lóvasút mintájára kifejlesztett közlekedési eszköz. A lóvasút megjelenése előtt kocsik (postakocsik) mozognak lóvontatással, a síneket pedig a bányaiiparban használták először csillék mozgatásánál (Hell Károly). Ha a lovas kocsit egyszerűbb elemekre szedjük szét, akkor a tengelyekre szerelt kocsiszekrényt és a kerekeket találjuk alapegységként (Budakalász, MNM). Természetesen ez csak egy vázlat a fejlődésről, és más útvonalakat is bejárhatunk a műszaki építő, anyagokat fölhasználó tevékenységek fejlődési pályáját nyomozva. A szerkezeti hierarchiának van egy tudománytörténeti és fölhasználási szempontokat egyesítő használhatósága is.

Szerkezeti hierarchia és a rétegek időrendje

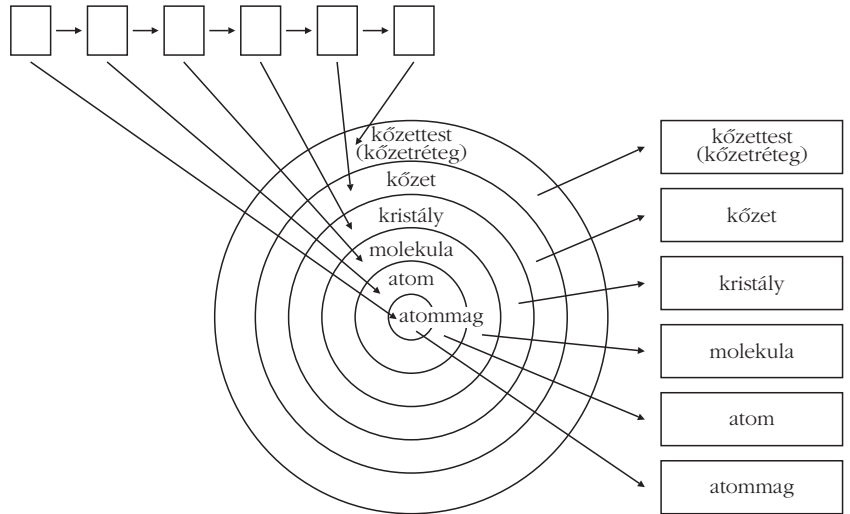
Az anyagszerkezet megismerésének és a megismerés eseménytörténeti rétegződésének van egy ábrába sűrítendő megfogalmazása. Ez a geológiából származik. A geológia a kőzetrétegek tudományaként indult. Steno 350 éve ismerte föl és mondta ki a települési törvényt [4]. Ez kimondja, hogy a fluid (gáz vagy folyadék) közegben ülepedéssel létrejövő kőzettestek felülről lefelé haladva egyre idősebbek, és mindig a legfelül települt réteg a legfiatalabb. A 2. ábrán be-

2. ábra. Steno első törvénye: a települési törvény. Az események leírása és a létrejött rétegtani állapotok leírása egy fölpülő rétegsor esetén. A rétegsor alján a korábbi, idősebb, fölfelé haladva pedig az egyre fiatalabb események rétegei következnek. Ez egy ideális rétegsor.



mutatjuk azt az állapotsort, amit a település, a kőzetestek lerakódása hoz létre. A létrejövő rétegek sorozatát, rétegsorát egy piramis jellegű „építménnyel” jelképezzük, amelyben *legfölül áll a legfiatalabb réteg és alatta rendre egyre idősebb rétegek következnek* [5]. E tudományág virágzására a legjobb példa, hogy a bolygótestek rétegeit ma is ezekkel, a Steno nyomán kifejlesztett módszerekkel végzik [6, 7].

Steno kimondott egy másik törvényt is: az *a kőzetdarab, ami be van ágyazva egy másikba, idősebb a beágyazónál, vagy egykorú vele* [5]. Az egymásba-ágyazódási rétegsor sok mindenben hasonlatos az első Steno-axióma esetéhez, de itt az egymásra következés mérettartományokat foghat át. Ilyen markánsan értelmezett rétegsor tehát az anyag – följebb szétszedéssel bemutatott – belső szerkezete is. Ennek rétegsorát azonban nem csak eseménysorral, hanem a szerkezeti hierarchiával is leképezhetjük. A szerkezeti hierarchia egy tartalmazási sorozat, amelyet „létraként” is és egymásba ágyazott körök sorozatával is ábrázolhatunk (3. ábra).



3. ábra. Steno-zárványok bezárási törvénye, kiterjesztve az anyag belső szerkezetéig, az atommagokig. A „szétszedés”, a belső szerkezet föltárása eseményei az itt ábrázolt eseményekhez képest fordított sorrendben játszódtak le. Előbb ismertük meg a felsőbb hierarchiaszinteket, és idővel az egyre mélyebben fekvő szinteket [3]. A mélyebb szintekhez különféle „szétszedési” módszerekkel jutottunk el.

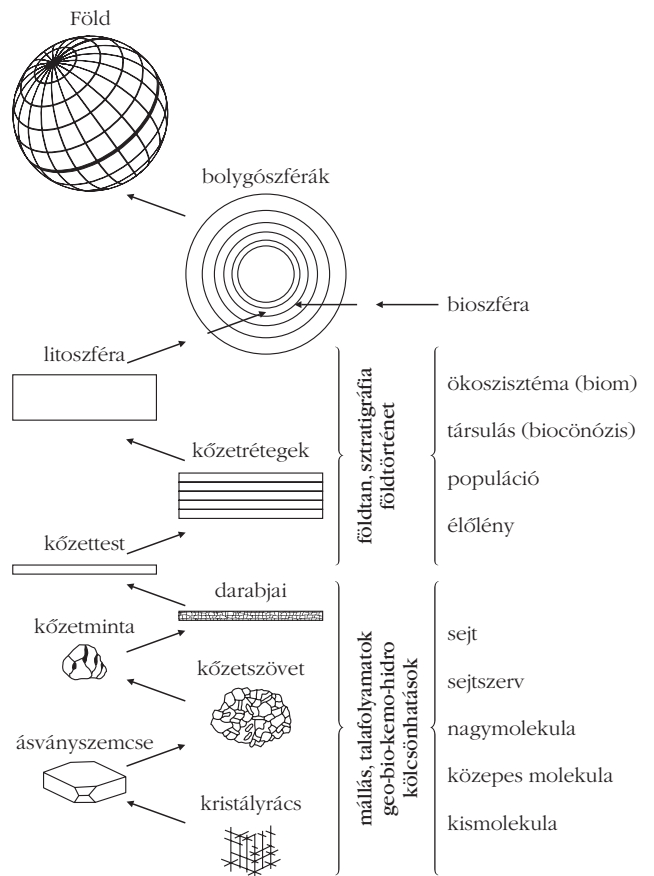
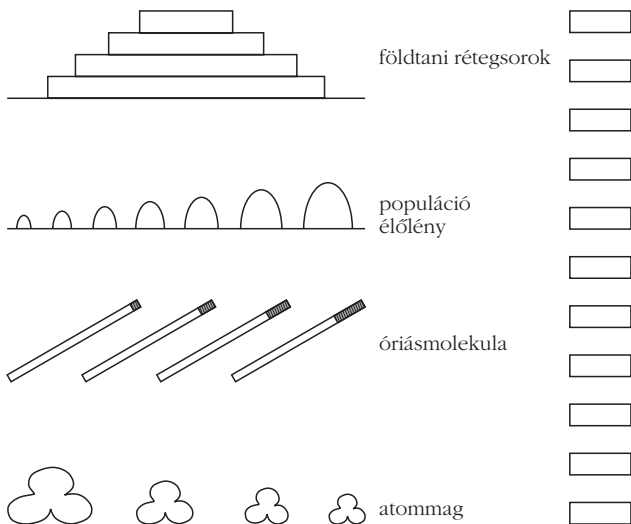
jelenségek szétbontásával fejlődő tudományág, és kiépülése idején – a kőzetekbe zárt ősi kővületek révén – szoros kapcsolatot tartott a biológiával. A biológia a ma élő és megfigyelhető állat- és növény-

5. ábra. Két szerkezeti hierarchia-sorozat (fiziko-, geo- és biosorozat) kapcsolt formában ábrázoló rendszer, ahol a középső sávban azokat a nagy földtudományi egységek vannak kiemelve, ahol a szintek csatolása lényeges szempontokat hoz a vizsgált alrendszer elemzésénél.

Szerkezeti hierarchia-rendszerek kapcsolódása: a geológia és biológia (majd fizika) szövetsége

Eddig egyetlen hierarchia-lépcsősört vizsgáltunk részletesebben, nevezhetjük azt geo- és fizikolépcsősornak is. A geológia természetes útja, hogy az összetett

4. ábra. A szerkezeti hierarchia egymásra rétegződő jelenségeire fölbontott oszlopát (jobb szélén) az egymásba ágyazott órák szintjeinek kiemelésére használjuk föl. Az órák szintjénél megadjuk a fölismérés évszázadát. Legfölül: földtani rétegsorok (Steno nyomán) – 18. század. Az élővilág evolúciója (*Darwin*) – 19. század. Óriásmolekulák genetikai órája – 20 század második fele. Atommagok bomlása – 20. század első fele.



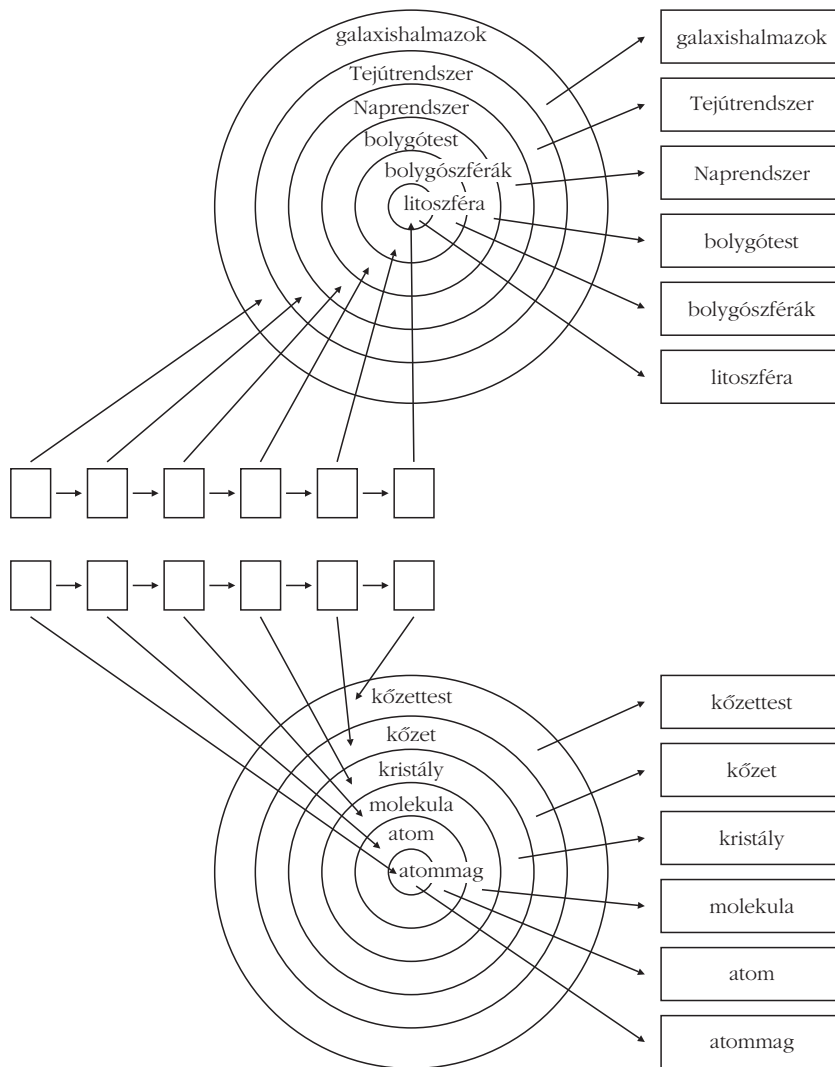
alakokat kapcsolatba hozta az ősi (megkövesedett) vázakkal. A fossziliákban fennmaradt olyan alaksorozatok és alakcsoportok sorozatát – egykori élőlényeket – vizsgált, amelyek a különböző korú kőzetekbe vannak beágyazva. A két tudományág a kutatások során fölismerte egymásrataltságát. A geológia a beágyazott biológiai alakcsoportok alapján tudta a távoli rétegeket azonosítani (a földtani korreláció törvénye). A biológia viszont, a geológiában megalkotott rétegsorok segítségével, az egy időben élt állat- és növénycsoportokról kapott időbeli metszeteket. Mindkét tudományág közreműködött tehát az *evolúció törvényének fölismerésében* [8]. A leglátványosabb evolúciós törvényszerűség – az élő alaksorozatok sorozatán – *Haeckel* nevéhez fűződik, aki az embriók időben egymásra következő alakjaiban ismerte fel azt, hogy az egyedfejlődés – nagy lépésekben – megismétli a törzsfjlődést.

Kétféle egymásra képezést is megfigyelhetünk ezen a példán. Egyrészt a geológia mindkét vizsgálati módot, a *térszerkezeti hierarchiát* és az *időbeli egymásra következőséget* is hasznosítja. Másrészt azt is, hogy mindezt – már a geológiai rendszer kiépülése idején – hasznosítani tudta egy másik tudományág, a biológia, pedig akkor lényegében csak egyetlen hierarchiaszintet, a test megmaradó vázát tudta fölismerni a fossziliákon.

Ma már a fossziliák különböző szerkezeti szinteken és többféle tudományágból gyűjthető készletén a legkülönbözőbb tudományágak végeznek időmérést e rendszer segítségével (4. ábra). A rétegsorok nagy léptékű, illetve a talajok kisebb mérettartományba eső vizsgálatainál is szoros a kapcsolat a két szerkezeti hierarchiaszint jelenségei, folyamatai között (5. ábra).

A szerkezeti hierarchia fölhasználása a Világegyetem szerkezetének kiépülését bemutató modelleknél

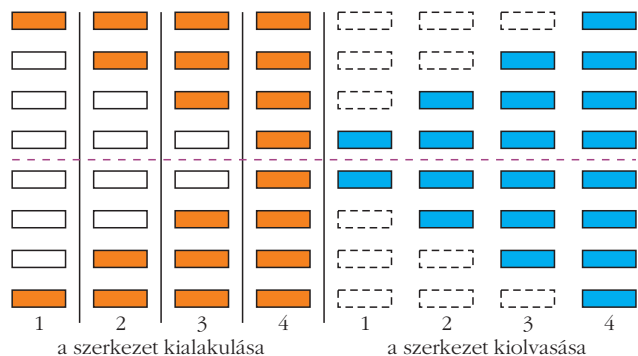
Láttuk, hogy a szerkezeti hierarchia másfajta fölhasználását jelenti az, ha általa a megismerés sorrendjét akarjuk bemutatni. Most ismét egy másik irányt mutatunk be, a „fölszintű világ” szerkezeti hierarchiáját. Ennek az egymásba ágyazottsága éppen fordított globális kiépülési időrendet mutat, amennyiben a szerveződések lépcsősora a külső szintek felől, foko-



6. ábra. Két irányba kiépített szerkezeti hierarchia-ábra sematikus képe. A felső hierarchiaszintek körbevesznek bennünket, az alsókat viszont mi (a testünkben például) tartalmazzuk. Ezzel a kettős rétegsorral a legkisebbtől a legnagyobbig átfoghatjuk az ismert szerkezeteket.

zatosan épült ki. Bár ez sematikus kép, de segítségével – egy szempontból – rámutathatunk az Univerzum néhány jelentősebb korszakára (6. ábra).

Ennek legfontosabb mozzanatait az összefoglaló, 7. ábrán érzékeltetjük. Az Univerzum néhány jelentősebb korai korszakára jellemző, hogy az Univerzum üres, még nincsenek benne a mai világ belső struktúrái [9]. A forró Univerzum az elemi részek világával párhuzamosan fejlődött. Egy későbbi, természetesen folyamatosan ismétlődő, mégis a hierarchiatábla szerint tagolható korszaka volt az, amikor a csillagok belsejében (felső szintek egyike) atommagok épültek ki (alsó, belső szintek egyike). Egy fontos harmadik korszak volt, amikor a csillag körül, a már jelen lévő nehezebb elemekből ásványövezetek alakultak ki: bolygótestek (felső szint) és ásványok (alsó szint) tartománya párhuzamos fejlődési szakaszban jött létre [10]. *Marx György* 80-as évekbéli előadásain említett [11] egy olyan evolúciós folyamatszakaszt, amikor az óceánokban (geoszféra, felső szint) sejtállal körülvett sejti szintű elemek (alsó szint) épültek ki és ezzel lét-



7. ábra. Az anyagfejlődés-történet hierarchikus szerkezete. Az ábra bal oldalán a besatírozott tartományok a párhuzamosan kiépülő felső és alsó szintek együttes evolúciójára utalnak. A szerkezet kiolvasása feliratú rész viszont azt tárja föl, hogy nagy vonalakban párhuzamosan haladt a mikrovilág és a makrovilág szintjeinek kiolvasása és így az Univerzum szerkezetének a megismerése. Elég csak, ha a forró Univerzum korai idején a részecskevilágban fölmert háttérsugárzásra és a galaxisok táguló világára utalunk. De ugyanígy párhuzamosan zajlott a csillagok energetikájának megismerése a napfizikával, és előtte az elektronburok spektroszkópiái jelenségeken keresztüli megismerése a napléggöri és földi gázok ionizációs folyamatainak megismerésével. Kétségtelen, hogy a szerkezeti hierarchia alkalmazása a gondolkodási keretek összképbe rendezését segíti. De a távoli jelenségek együttes látásában – úgy érezzük – nélkülözhetetlen.

rejött a Föld mai atmo-hidro-bioszférikus rendszere. Ebből a négy példából jól látható, hogy az Univerzum és az élet fejlődéstörténete során több alkalommal is csatolt szerveződési szintek együttes evolúciója zajlott [12]. A 7. ábra arra mutat rá, hogy a szerkezeti hierarchia-ábrán mind a nagy evolúciós korszakok néhány csatoltan fejlődő szintje, mind ezek egymásutánisága, mind pedig – a jobb oldali ábrán – a belső és külső világ

megismeréstörténete nagy vonalaiban jól ábrázolható. A szerkezeti hierarchia ábrázolásának ez az együttlátás az egyik legfontosabb szervező képessége.

Összefoglalóan: írásomban bemutattam néhány olyan, a körülöttünk lévő világ megismerésére és leírására alkalmas, interdiszciplináris módszert, amelyet az oktatás során is érdemes alkalmazni.

Irodalom

1. Bérczi Sz.: *Anyagtechnológia I.* Egyetemi jegyzet, Tankönyvkiadó, Budapest (J3-1333), 1985.
2. Bérczi Sz.: *Szimmetria és Struktúraépítés.* Egyetemi jegyzet, Tankönyvkiadó, Budapest (J3-1441), 1990.
3. Bérczi Sz.: Cyclicity in the Evolution of Matter and its Application to the Evolution of the Solar System. *Acta Geologica Acad. Sci. Hung.* 23/1–4 (1980) 163–171.
4. Dudich E.: Rövid Stenográfia. *Földtani Közlemények* 127 (1997) 211–221.
5. Steno, N.: *De solido intra solidum naturaliter contento dissertationis prodromus.* (A szilárd testekben természetes módon előforduló más szilárd testekről.) Firenze, 1669.
6. Wilhelms, D. E., McCauley, J. F.: Geologic Map of the Near Side of the Moon. *U. S. Geol. Survey Maps I-703.* (1971) Washington D. C.
7. Wilhelms, D. E.: The Geologic History of the Moon. *U. S. Geological Survey Professional Paper* (1987) 1348. Washington D. C.
8. Darwin, K.: *Harcz a természetben. I. II.* A Magyar Kereskedelmi Közlöny Hírlap és Könyvkiadó Vállalat, Budapest, 1909.
9. Sagan, C.: *A kozmosz. 1–13.* Filmsorozat és könyv, 1980.
10. Bérczi Sz.: „Kettőskristályosodás” a Naprendszerben. *Fizikai Szemle* 29/11 (1979) 412–419.
11. Marx Gy.: Szubjektív világtörténelem. *Fizikai Szemle* 50/11 (2000) 362.
12. Lukács B., Bérczi Sz., Lábos E., Molnár I. (szerk.): *Mutual Dynamics of Organizational Levels in Evolution.* (Csatolt szerveződési szintek együttes evolúciója.) MTA-KFKI-1992-32/C. Budapest (1992) 137 old.

HÍREK – ESEMÉNYEK

HAIMAN OTTÓ, 1920–2016

2016. november 10-én elhunyt nagyszerű kollégánk, *Haiman Ottó*. Halálakor ő volt az ELTE Fizikai Intézet legrégebb óta dolgozó oktatója, kutatója, aki 95 évesen is bejárt az intézetbe, és aki még ekkor is ötleteket, hasznos tanácsokat tudott adni nekünk, fiatalabbaknak.

Haiman Ottó 1920. december 29-én született Bécsben. Szülei *Haiman Leó* és *Dr. Wéber Stefánia*. Egy testvére volt, egy nála néhány évvel fiatalabb öccse. Anyai felmenői a Bánságból származtak, apai ági rokonai Erdélyben éltek. Édesapja egy fakereskedő társaságnál dolgozott Bukarestben. Ottó fiuk születésekor éppen Bécsben tartózkodtak. A kis Ottó gyermekkorát Bukarestben töltötte. Magántanulónak nem a román, hanem a francia nyelvet sajátította el, amellet, hogy a családban a magyar után a német volt a második nyelv. Ottó 10 éves volt, amikor édesapja egy hivatalos útján (Alexandria kikötőjében) szívrohamban

meghalt. Ottó ezután először az erdélyi rokonoknál lakott, majd felváltva Budapesten, illetve Bécsben járt elemi iskolába. Középszintű tanulmányait a Budapesti Német Birodalmi Gimnáziumban folytatta. A német és a francia mellé újabb idegen nyelvként itt tanulta meg az angolt és a latint. 1939-ben érettségizett. Sokoldalúságára jellemző, hogy fiatal korában nemcsak zongorázni, hanem orgonálni is tanult.

Egyetemi tanulmányait Szegeden kezdte, az ott frissen beindult vegyész szakon. Az első évek után átkerült Budapestre a Pázmány Péter Tudományegyetemre, kémia-fizika szakos tanárjelöltként. Bizonyítványának dátuma a vegyészeti tanulmányok elvégzéséről 1946. március 12. Egy évvel később kapta meg vegytan-teremtettan szakos tanári diplomáját. Közben, 1945 áprilisától díjtalan gyakornokként kezdett kísérleti munkát végezni a Kísérleti Fizikai Intézet laboratóriu-

mában.¹ *Fenyves Ervin* gyógyszerészhallgatóval együtt bekapcsolódtak a *Barnóthy Jenő–Forró Magdolna* házaspár által még a 30-as években megkezdett mérésekbe, amelyekkel a kozmikus sugárzás tulajdonságait vizsgálták.² Haiman Ottó és Fenyves Ervin, egyebek mellett, tanulmányozták a kozmikus sugárzás következtében keletkező müonok elnyelődését ólomban, majd hosszú időn keresztül a tatabányai szénbányákban folytattak méréseket a müonok tanulmányozására.

Haiman Ottó doktori értekezését 1950-ben védte meg. Közben, 1948-ban a Barnóthy–Forró-házaspár eltávozott az Amerikai Egyesült Államokba, és a kozmikus sugárzás vizsgálatát az 1950-ben Dublinból hazatért *Jánossy Lajos* folytatta. Haiman Ottó az ő munkatársaként dolgozott tovább. Egyrészt az akkorra már Eötvös Loránd Tudományegyetemre átnevezett egyetem Kísérleti Fizikai Intézetében, majd 1958-as megalakulásától kezdve az Atomfizikai Tanszéken. Másrészt, a KFKI megalakulásakor *Bozóky László*, későbbi akadémikus Radiológiai Osztályán dolgozott évekig, egészen annak átszervezéséig. Itt széleskörű tevékenységet folytatott, amelyet azután a fejlődő KFKI több osztálya, intézete, külső kutatóintézetek és gyárak vittek tovább. Addigra már oroszul is megtanult, így a szakkönyveket öt különböző nyelven, eredetiben olvasta. Rajongott a szaktudományi könyvekért, idős korára hatalmas saját könyvtára gyűlt össze.

Haiman Ottó tudományos karrierje szebben alakulhatott volna, ha a politika nem szól közbe, ennek illusztrálására álljon itt egy adalék. 1948-ban az Országgyűlés létrehozta a Magyar Tudományos Tanácsot, amelynek elnöke *Gerő Ernő*, ügyvezető titkára *Alexis György* lett. Egy évvel a Barnóthy–Forró-házaspár Amerikába távozása után „a fizikusok azt javasolták, hogy a Baselben szeptemberben rendezendő magfizikai kongresszusra 4 tagú delegáció utazzon ki. (*Novobátzky Károly, Szigeti György, Szamosi Géza, Haiman Ottó.*) Alexis azzal terjesztette elő Gerőnek a javaslatot, hogy ő ezt ellenzi. »Igaz ugyan, hogy a kérdés rendkívül fontos, azonban Novobátzky teljesen teoretikus, Szigeti és Haiman elvtársak viszont egyelőre sokkal polgárabb gondolkodásúak, semhogy a mai helyzetben Svájcba küldjük őket, amely helyről tudjuk, hogy a fizikusaink disszidáltatásának európai központja...«.³

Haiman Ottó 1960 és 1964 között az 1958-ban alapított Méréstechnikai Központi Kutató Laboratóriumban (MKKL) dolgozott, majd újból visszakerült az Atomfizikai Tanszékre. Kapcsolatát a későbbiekben is fenntartotta az MKKL-lel és hasonlóképpen a MOM-mal is.

1965-ben jelent meg Haiman Ottó – Fenyves Ervinnel közösen írt – *Die Physikalische Grundlagen der Kernstrahlungsmessung* című német nyelvű könyve az MTA kiadásában, amelyre néhány évvel később megkapták az Akadémia nívódíját.

¹ Haiman Ottó: Barnóthy né Forró Magda (1904–1995) – viharból szélcsendbe *Fizikai Szemle* 45/5 (1995) 167.

² Fenyves Ervin: Haiman Ottó most decemberben 80 éves *Fizikai Szemle* 50/12 (2000) 446.

³ Kónya György: *A Magyar Tudományos Tanács (1948–1949)*. MTAK Budapest, 1998, 165. o.

Haiman Ottó oktatói karrierje, saját elmondása szerint, elsőéves medikushallgatók fizika zárthelyi dolgozatírásain való „csöszködéssel” kezdődött. Később mind hallgatói laboratóriumokban, mind a katedra mellett nagy lelkesedéssel és elmélyült tudással oktatta a különböző szakos hallgatókat a fizika rejtelmeire, elsősorban elektrodinamikából és optikából. Több évtizeden keresztül tartotta a két féléves fizika tantárgyat a vegyész szakos hallgatóknak. A kémikusok közül nagyon sokan, közöttük akadémikusok is, szeretettel és tisztelettel gondoltak vissza Haiman Ottóra, akitől – elmondásuk szerint – rengeteget tanultak: nemcsak fizikai ismereteket, hanem fizikusi szemléletmódot is. Magam sokat beszélgettem Ottóval, különösen miután nyugdíjba menetele után átvettem tőle a kémikusok fizikaoktatását. Nagy tudású, széles látókörű, barátságos és segítőkész embernek ismertem meg. Tudását és segítőkészségét nyugdíjba menetele után is, az elmúlt három évtizedben a Fizikai Intézet sok kollégája élvezhette. Bárki fordult hozzá, mindig szívesen és hozzáértéssel segített, legyen szó a szivárvány fizikájáról vagy a trilobiták látásáról, vagy bármilyen más optikai problémáról.

Nyugdíjasként továbbra is részt vett először még az Atomfizikai Tanszék, majd 1997-es megalakulása óta egészen a legutóbbi időkig a Biológiai Fizika Tanszék, valamint *Vicsek Tamás* MTA kutatócsoportjának munkájában. A kutatócsoportnak nagyon sok segítséget nyújtott a videomikroszkópiai, képalkotó polarimetriai és biotechnológiai fejlesztésekben. Emellett továbbra is folytatott oktatói munkát és aktív tagja volt a tanszéki szemináriumoknak. Az Eötvös Loránd Tudományegyetem 2007-ben a Pro Universitate Emlékérem arany fokozatával tüntette ki.

Haiman Ottó halálával az Eötvös Loránd Fizikai Társulat egyik legrégebbi tagja távozott közülünk. A Társulat nyilvántartása szerinti törzsszáma 20 volt. 1952-ben megkapta az ELFT Schmid Rezső-díját. Egy időben a Társulat elnökségének is tagja volt. A kezdetektől fogva majdnem egészen a haláláig állandó munkatársa volt a *Fizikai Szemlének*. 1951. áprilisban a *Fizikai Szemle* legelső évfolyamának 2. számában már megjelent egy írása *A szovjet fizika eredményei* címmel. Amellett hogy cikkeket írt a Szemlébe, a *Fizikai Szemle* tartalomjegyzéke a belső oldalon fél évszázadon át az ő fordításában jelent meg – a magyar mellett – angolul, németül és oroszul. Ezt a munkát még 95 éves korában is igényesen végezte. Az utolsó, általa 3 idegen nyelvre fordított tartalomjegyzék 2015 szeptemberében jelent meg. Ekkor azonban jelezte, hogy ezt a feladatot nem tudja tovább vállalni. Ahogyan ő fogalmazott, a blikkfangos címek fordítása 95 évesen már egyre jobban fárasztotta.

A Társulat érdekében sok évtizeden át kifejtett munkájáért idén megkapta az ELFT Eötvös Plakettjét, amelyet *Patkós András* elnök és *Kármán Tamás*, a *Fizikai Szemle* műszaki szerkesztője az otthonában adtak át Haiman Ottónak.

Kedves Ottó! A szűkebb és a tágabb körbeli kollégáid, barátaid nevében búcsúzunk Tőled!

Kürti Jenő

FROM TEACHERS
FOR TEACHERS



2017. JÚNIUS 29. – JÚLIUS 2.

INVENTING THE FUTURE OF SCIENCE EDUCATION

SCIENCE ON STAGE Fesztivál 2017, Debrecen

Több mint 400 európai és néhány Európán kívüli tanár jön mintegy 300 projekttel Debrecenbe, a Kölcsey Központba a jubileumi, tizedik Science on Stage Europe fesztiválra, hogy kiállításon, műhelyeken, illetve színpadi előadásokon bemutassák egymásnak leginnovatívabb módszereiket, amelyekkel a természettudományos tárgyakhoz csinálnak kedvet a fiataloknak. A nagyközönség a Nyílt Napon tekintheti meg a fesztivált. További információk magyar nyelven: <http://szinpadon-a-tudomany.hu> és angolul: <http://sons2017.eu>

SCIENCE ON STAGE 2017
DEBRECEN

THE EUROPEAN NETWORK OF SCIENCE TEACHERS

SZERVEZŐK:

