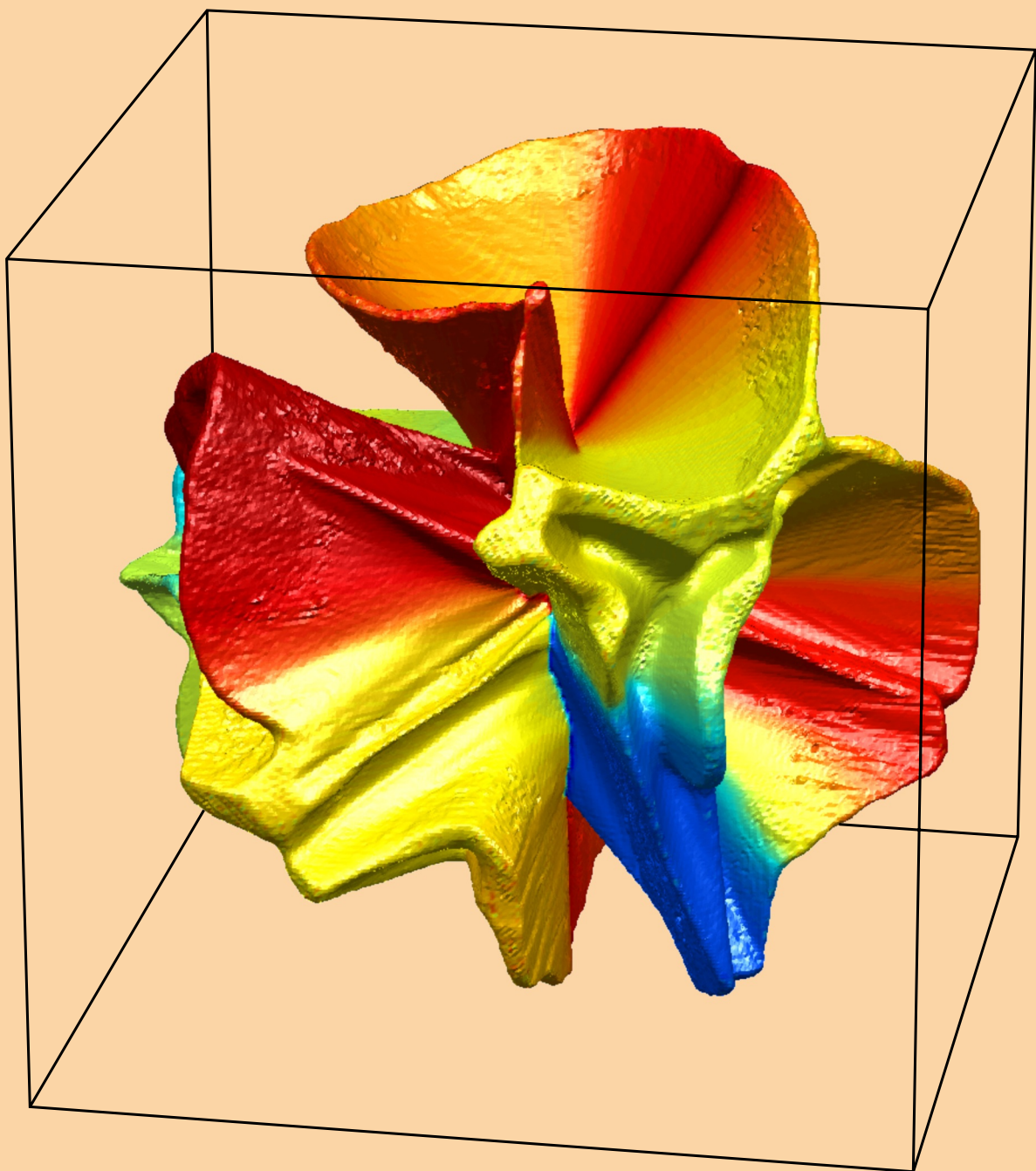
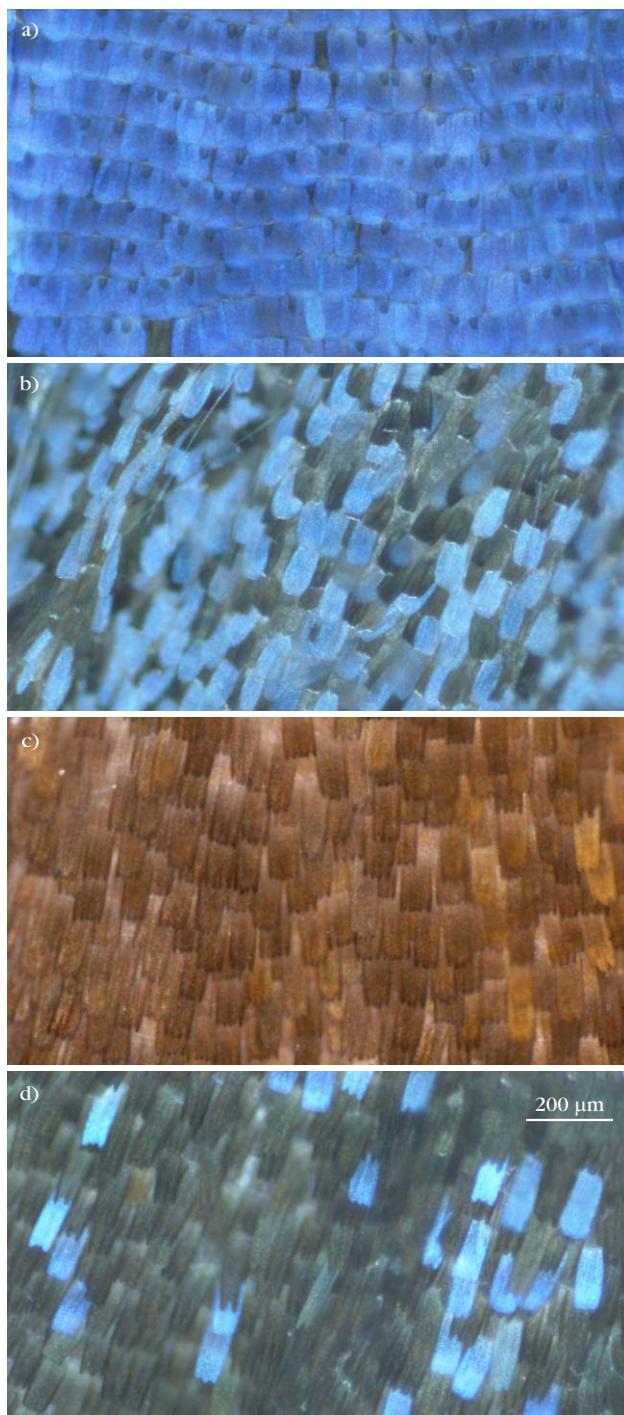
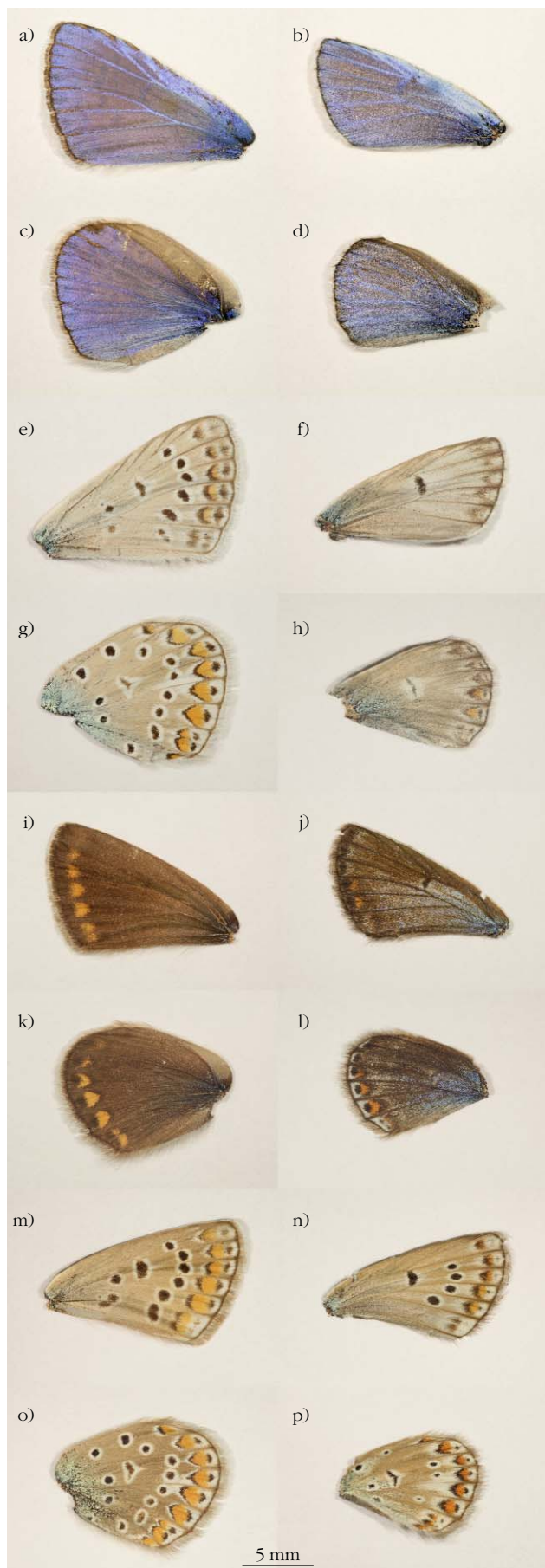


fizikai szemle



2018/7–8



5. *ábra.* Ikarusz boglárka hím és nőstény egyedeinek szárnyairól készült optikai mikroszkópos felvételek. (a) Hűtetlen hím szárnyfelszíne, (b) 22 napig hűtött hím szárnyfelszíne, (c) hűtetlen nőstény szárnyfelszíne, (d) 20 napig hűtött nőstény szárnyfelszíne. (Lásd Piszter Gábor és szerzőtársai írását a 225. oldaltól.)

1. *ábra.* Bábállapotbeli hűtés hatása Ikarusz boglárka lepkék imágóinak szárnyaira. Hűtetlen hím egyed szárnyainak felszíne (a, c) és fonákja (e, g), 62 napig hűtött hím szárnyainak felszíne (b, d) és fonákja (f, h), hűtetlen nőstény szárnyainak felszíne (i, k) és fonákja (m, o), 40 napig hűtött nőstény szárnyainak felszíne (j, l) és fonákja (n, p). (Lásd Piszter Gábor és szerzőtársai írását a 225. oldaltól.)



DUPLASZÁM

Remélem, hogy a szokás szerint augusztus végén megjelenő nyári duplaszámunkban – amiben néhány terület több cikkel is szerepel – minden Olvasónk sok, számára érdekes írást talál.

Részecskefizikával két cikk foglalkozik: *Horváth Dezső* a CERN Nagy Hadronütköztetőjénél kapott érdekes, de más kísérletek által sem megerősített, sem megcáfolt eredményekkel ismertet meg, amelyek akár „új fizika” születését is jelezhetnék. Ugyanakkor a szerző felhívja a figyelmet, hogy mindig óvatosan kell kezelni a feltűnő új jelenségek észlelését: fontos az eredmény megfelelő matematikai-fizikai megbízhatósága és a független mérés általi megerősítése. A „Fizika tanítása” rovatunkban *Oláh Éva Mária* és *Fülöp Csilla* cikke azt vizsgálja, hogy milyen lehetőségeink vannak, hogy a 14–18 éves diákjainkat megismertessük az érdeklődés középpontjában álló részecskefizikával.

Ugyancsak két írásunk foglalkozik az élővilág és a fizika találkozásával: *Piszer Gábor* és munkatársai cikke a lepkék szárnyának nanoarchitektúráját mutatja be korszerű vizsgálati módszerekkel végzett méréseik alapján; a tanítási cikkek között pedig *Rajkovits Zsuzsanna* a víziállatok életjelenségeinek egész sorát tárgyalja a hidrosztatika témaköréhez kapcsolódóan. *Piszer Gábor* írása ugyanakkor az anyagtudomány nanoszerkezeteket vizsgáló vonulatához tartozik, és ugyancsak a korszerű anyagtudomány számítógépes módszereinek alkalmazására mutat példákat *Pusztai Tamás* és munkatársai cikke.

Az egyre fejlettebb mérési módszerek jelentőségét a csillagászat és asztrofizika területéről érkezett két cikk is igazolja. *Szűcs Tamás* a csillagokban lejátszódó magreakciók leírásában fontos, igen alacsony hatáskeresztmetszetek pontosabb laboratóriumi meghatározásának – a detektorok aktív árnyékolásán alapuló – lehetőségét mutatja be. *Kóspál Ágnes* és munkatársainak írása a csillagkeletkezési folyamatok részleteinek vizsgálatát segítő új óriásberendezésekkel ismerteti meg minket, egyebek között az 1 milliárd eurós költséggel Chilében megépített ALMA teleszkóppal.

A nukleáris ipar és technológia iránti tanulói érdeklődés fokozása különösen fontos jelenleg, amikor elkezdődött a két új paksi blokk létesítésének előkészítése. Az erre irányuló két nagy hagyománnyal rendelkező rendezvénysorozatról, az Országos Szilárd Leó Nukleáris Tanulmányi Versenyről, illetve a Nukleáris Szaktáborról egy-egy cikkünk számol be.

A nyár ad aktualitást egy különleges témával foglalkozó írásnak, amelyben *Molnár János Albert* az általa konstruált síófoki kétszálás napórát mutatja be.

E számunkban – régi törekvésünknek megfelelően – a fizika tanításának minden szintjével foglalkozunk. *Oláh Éva Mária* és *Fülöp Csilla* már említett cikke mellett *Simon Ferenc* írása az egyetemi oktatás egy témáját dolgozza fel. *Juhász András* és *Tél Tamás* pedig az ELTE Fizika Tanítása doktori programjának – amely gyakorló fizikatanárok számára teszi elérhetővé a doktori fokozat megszerzését – 10 éves tapasztalatait és eredményeit foglalja össze.

Nagy örömünkre szolgál, ha egy korábban megjelent cikkünkhöz érkezik kiegészítés vagy magyarázat, mint amelyet *Kürti Jenő* küldött *Kiss Miklós* relativitáselmélet oktatásáról szóló, áprilisi számunkban közölt írásához.


Lendvai János
főszerkesztő

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

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

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:
Lendvai János

Szerkesztőbizottság:
Bencze Gyula, Biró László Péter, Czitrovszky Aladár, Füstöss László, Gyürky György, Hebling János, Horváth Dezső, Horváth Gábor, Iglói Ferenc, Kiss Ádám, Koppa Pál, Ormos Pál, Papp Katalin, Simon Ferenc, Simon Péter, Sükösd Csaba, Szabados László, Szabó Gábor, Takács Gábor, Trócsányi Zoltán, Ujvári Sándor

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:

Egy polikristályos csírából kialakuló különleges növekedési forma, amelyet az MTA Wigner FK SZFI munkatársai állítottak elő fázismozgómódel segítségével. Hasonló virágszerű szferolitok a természetben is megfigyelhetők.

TARTALOM

<i>Lendvai János:</i> Duplaszám	217
<i>Horváth Dezső:</i> Új felfedezések a CERN Nagy Hadronütköztetőjénél: furcsa részecskék	219
<i>Piszer Gábor, Kertész Krisztián, Horváth Zsolt Endre, Biró László Péter, Bálint Zsolt:</i> Ikarusz boglárka lepkék szerkezeti és pigment eredetű színeinek stresszállósága	225
<i>Szücs Tamás:</i> Alacsony háttérű magfizikai mérések, avagy a nukleáris asztrofizika kihívásai	230
<i>Kóspál Ágnes, Ábrahám Péter, Varga József:</i> A csillagkeletkezés vizsgálata új interferometrikus műszerekkel	235
<i>Pusztai Tamás, Rátkai László, Gránágy László:</i> Anyagtudomány számítógéppel – 2. rész	241
<i>Molnár János Albert:</i> Kétszálás napóra – egy ritkaság Siófokon	245
<i>Jubász András, Tél Tamás:</i> Tíz éves az ELTE Fizika Doktori Iskola „Fizika Tanítása Programja” gyakorló fizikatanárok számára	251

A FIZIKA TANÍTÁSA

<i>Rajkovits Zsuzsanna:</i> Fizika az élő természetben	256
<i>Kürti Jenő:</i> Relativitáselméletről középiskolában – másként, kiegészítés	263
<i>Sükösd Csaba:</i> XXI. Országos Szilárd Leó Nukleáris Tanulmányi Verseny – 1. rész	267
<i>Mester András:</i> A tizedik Nukleáris Szaktábor	272
<i>Rátz Tanár Úr életműdíj, 2017 – Mester András tanár úrral Radnóti Katalin beszélget</i>	275
<i>Simon Ferenc:</i> Nagyfrekvenciás jelek kábelbeni terjedésének fizikai alapjai – 1. rész	278
<i>Oláh Éva Mária, Fülöp Csilla:</i> A csapból is részecskefizika folyik?	283

KÖNYVESPOLC

<i>Daniel Whiteson, Jorge Cham:</i> Halványlila gőzünk sincs (<i>Szalai Tamás</i>)	288
--	-----

HÍREK – ESEMÉNYEK

<i>Ötven évvel ezelőtt hunyt el Gyulai Zoltán, a hazai kísérleti szilárdtest-fizika úttörője</i>	289
<i>Sólyom Jenő:</i> Emlékbeszéd Gyulai Zoltán mellszobránál	289
<i>Hartmann Ervin:</i> Tanítványok tanítványai	291
<i>Búcsú: Bonifert Domonkosné Bottyán Katalin</i>	291
<i>Humboldt-díjban részesült Legeza Örs</i>	292

J. Lendvai: Double-issue

D. Horváth: New inventions at the LHC of CERN: strange particles

G. Piszer, K. Kertész, Zs. E. Horváth, L. P. Biró, Zs. Bálint: Stress resistance of structural and pigmentary colors of polyommatus icarus butterflies

T. Szücs: Low background nuclear measurements or the challenges of nuclear astrophysics

Á. Kóspál, P. Ábrahám, J. Varga: Investigation of star formation by new interferometric instruments

T. Pusztai, L. Rátkai, L. Gránágy: Computational materials science – Part 2

J. A. Molnár: Double strand sun dial in Siófok

Jubász András, Tél Tamás: 10 years of “Teaching of Physics” Program of ELTE’s PhD School in Physics

TEACHING PHYSICS

Zs. Rajkovits: Physics in living nature

Kürti Jenő: Comments on a paper of Miklós Kiss

Cs. Sükösd: 21st Szilárd Leo National Nuclear Study Competition – Part 1

A. Mester: 10th Nuclear Specialized Camp

Rátz Life Achievement Award of 2017 – A. Mester, teacher interviewed by K. Radnóti

F. Simon: Propagation of high frequency signals in wires – Part 1

É. M. Oláh, Cs. Fülöp: Particle physics all around

BOOKS, EVENTS

Fizikai Szemle
MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

megjelenését támogatják:



ÚJ FELFEDEZÉSEK A CERN NAGY HADRONÜTKÖZTETŐJÉNÉL: FURCSA RÉSZECSKÉK

Horváth Dezső
MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest
és MTA Atommagkutató Intézet, Debrecen

Új fizika jelei az LHC-nál?

A részecskefizika mindig az érdeklődés élvonalában van, és jelentősebb eredményeiért gyakorlatilag kijár a Nobel-díj. Ezért szinte évente felsejlik valamilyen új felfedezés benne, és nem okvetlenül mérési hiba következtében, mint a fénynél gyorsabb neutrínók esetében. Amint korábban megírtuk, a CERN Nagy Hadronütköztetőjénél (1. ábra) az ATLAS és a CMS kísérlet 2015-ben az addigi adatoknak ellentmondani látszó új jelenséget látott kialakulni: Higgs-bozon-szerű részecske jelét $750 \text{ GeV}/c^2$ -es tömegnek megfelelő energiánál, amely azonban nem egyezett a Higgs-bozon tulajdonságaival. Az új jel a két kísérlet 2016-ban gyűjtött adataiban fokozatosan elenyészett, beleolvadt a háttérbe. Ugyanakkor viszont az anti-anyag vizsgálatára szakosodott LHCb együttműködés egész sor olyan új részecske megfigyelését jelentette be, amelyeket több korábbi kísérlet már látni vélte, más kísérletek pedig megcáfoltak. A továbbiakban néhány furcsa és eddig más kísérlet által sem megérősített, sem pedig megcáfolt részecskefizikai megfigyelést írunk le.

A mindenható standard modell

A részecskefizika jelenlegi elmélete, amelyet történeti okokból standard modellnek hívunk, a világot anyagi és kölcsönhatást közvetítő részecskék segítségével írja le, az előbbieket *Enrico Fermi* olasz fizikus nevé-



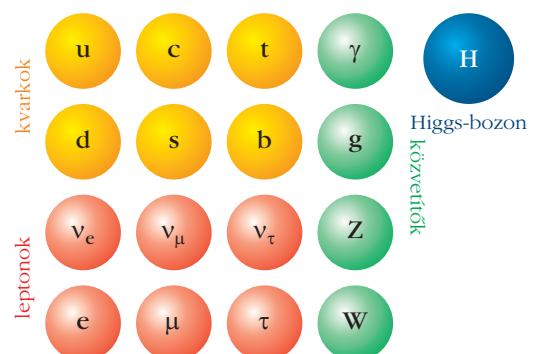
Horváth Dezső Széchenyi-díjas kísérleti részecskefizikus. 1970-ben végzett az ELTE-n, vizsgálatait Dubnában és Leningrádban kezdte, a kanadai TRIUMF-ban, az amerikai BNL-ben, a svájci Paul-Scherrer Intézetben, az olasz INFN-ben, majd a CERN-ben folytatta. Budapest–Debrecen kutatócsoportokat szervezett CERN-kísérletekre. 2006 óta koordinálja a magyar fizikatanárok részecskefizikai oktatását a CERN-ben. Emeritus professzor, magántanárként részecskefizikát oktat a Debreceni Egyetemen.



1. ábra. A svájci–francia határon (keresztekkel jelölve) fekvő CERN és környéke a Szuper-proton-szinkrotron (SPS) és az LHC gyűrűivel, valamint háttérben az Alpokkal. Jelentős magyar csoport a CMS, ALICE, NA61 és TOTEM kísérleteknél dolgozik, de most az LHCb-ről lesz inkább szó.

ből fermionoknak, az utóbbiakat *Satyendra Bose* indiai fizikus neve után bozonoknak hívjuk. A fizika jelenlegi állása szerint a 2. ábra valamennyi alapvető elemi részecskét tartalmaz, mindegyiket meg is figyeltük, utoljára, 2012-ben a Higgs-bozont. A fermionok háromfélék lehetnek: hat kvarkból állnak össze a magerőkben részt vevő összetett részecskék, a *hadronok*, amelyek közül a legismertebbek az atommagot alkotó neutron és proton. Az ugyancsak hat lepton fele töltött részecske, közöttük a legkönnyebb az atomok elektronja, és mindegyikhez tartozik egy-egy elektromosan semleges neutrínó. A bozonok közül a γ -foton közvetíti az elektromágneses kölcsönhatást, a

2. ábra. A standard modell részecskéi: fermionok (kvarkok és leptonok) és bozonok, a kölcsönhatások közvetítői.



8 g-gluon a magerőket és a W- és Z-bozon pedig az atommagok bomlását vezérlő gyenge kölcsönhatást. A Higgs-bozon szerepe sajátos: ő maga nem közvetít kölcsönhatást, de szerepe van az elemi részecskék tömegének létrejöttében.

A standard modellt eddig valamennyi mérési adatunk igazolni látszik, a segítségével végzett számítások eredményét az adatok igazolják. Ugyanakkor jó néhány megfigyelésről, mint például a neutrínók tömege, a Világegyetem sötét anyaga, vagy az antianyag eltűnése az Ősrobbanás után nem ad számot. Van okunk rá, hogy egyre pontosabb részecskefizikai kísérletekkel tapogassuk, keressük a standard modell érvényességi határait. A Higgs-bozon felfedezése óta jelenleg ez az LHC, a CERN Nagy Hadronütköztetőjének egyik fő feladata.

Felfedezés és kizárás

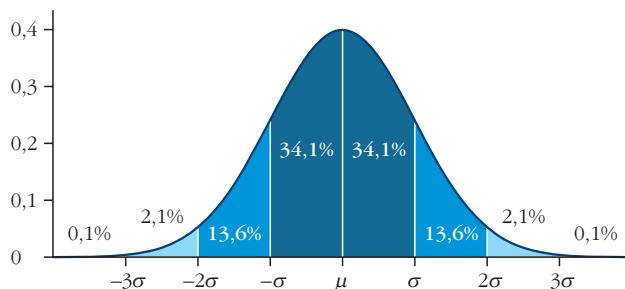
A kísérleti eredményekhez matematikai *bizonytalanságot* és *megbízhatóságot* rendelünk, ezek jellemzik azok minőségét.

Felfedezés

A bizonytalanság sokféle forrásból tevődik össze: az észlelt események számából ered a *statisztikus*, a jel mögötti zaj vagy háttér, valamint a mérőberendezés és az adatalemzéshez felhasznált információ a *szisztematikus* bizonytalanság forrása. Mindezeket némileg félrevezető kifejezéssel *mérési hibának* is hívják, habár egyáltalán nem hiba következménye. A különböző bizonytalansági források járulékát matematikailag összegezve (ez egyébként igencsak bonyolult eljárás) kapjuk mérési eredményünk teljes bizonytalanságát, amelyet hagyományosan a szigma (σ) görög betűvel jelölünk. Megállapodás szerint a részecskefizikában akkor fedezünk fel valami újat, ha (1) az legalább a teljes kísérleti bizonytalanság ötszörösével, 5σ -val emelkedik ki a mögötte található háttérből, az ismert folyamatok tengeréből, azaz megbízhatósága a bizonytalanság legalább ötszöröse; (2) azt másik független kísérlet megerősíti és (3) az eredményt más kísérlet nem cáfolja meg. Az eddigi tapasztalat szerint, amikor az első két feltétel teljesült, azt általában a többi kísérlet is megerősítette.

Kizárás

A megbízhatóság matematikai fogalmára elsősorban akkor van szükségünk, ha nem kapunk a keresett új jelenségre utaló, meggyőző jelet, és azt akarjuk tudni, mit jelent az eredmény a feltételezett modell érvényességére vonatkozóan. A gyorsító részecskefizikában – megállapodás szerint – azt a jelenséget zárjuk ki, amelyre a kizárás megbízhatósága (idegen szóval *konfidenciája*) 95%-os, vagyis annak valószínűsége, hogy a jel mégis létezik, csak nem vettük észre, kevesebb, mint 5% (3. ábra). A statisztika tu-



3. ábra. A σ bizonytalanságú normális valószínűségeloszlás megbízhatósági fokozatai.

dománya azt mondja, hogy ha például egyszerű számlálásnál nem észleltünk semmit, azaz 0 eseményt láttunk, akkor 95%-os megbízhatóság mellett csak azt állíthatjuk, hogy az észlelt események száma 3-nál kevesebb volt.

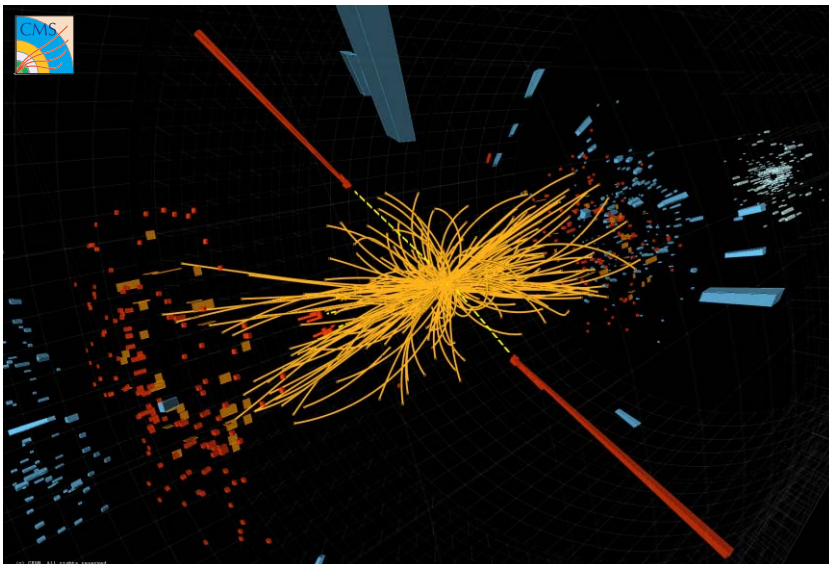
Nagyon bonyolult feladat a szisztematikus bizonytalanság megállapítása, hiszen a különböző eltérések forrásai összefüggenek, az egyik változása a többi is megváltoztathatja, és igyekeznünk kell mindezt a legpontosabban figyelembe venni. Ugyanakkor a fizikus is gyarló emberi lény: vigyáznunk kell, nehogy felfedezési vágyunk befolyásolja adataink elemzését. Ennek elkerülésére két módszert is alkalmazunk:

- Az adatalemzést szimulációk segítségével optimalizáljuk, publikáljuk, és jóvá hagyatjuk az egész együttműködéssel, mielőtt alkalmaznánk. Tekintettel arra, hogy az adatokat sok csoport elemzi és végeredményképpen a legjobb elemzés kerül nyilvánosságra, az elemzési módszerek a versengő csoportok igen alapos kritikájának vannak kitéve.
- Az adatgyűjtés közben, ha már valamilyen új jelenséget sejtünk, az oda várható adatokat kizárjuk az előzetes elemzésből, és egy előre meghatározott pillanatban, rendszerint nagyobb konferencia előtt szabadítjuk fel, valamennyi hasonló elemzésen dolgozó csoportnak egyidejűleg, nehogy egymást befolyásolják. Ezt a módszert vak analízisnek hívjuk és az orvostudományból kölcsönöztük.

Összefoglalva tehát: a megfigyelés nálunk 5σ többlet, a kizárás pedig 95%-os hiány. A (részecske)fizikának azonban vannak területei, ahol a gyorsító méréseknél kevesebb az észlelés. A neutrínófizikában és az asztrofizikában 90%-os kizárást is meg szoktak adni.

Elfogadott felfedezés: a Higgs-bozon

Az 5σ többlettel kapcsolatos pozitív tapasztalat ellenére azonban a részecskefizikában akkor fogadunk el egy felfedezést, amikor azt egy másik kísérlet hasonló megbízhatósággal megerősíti. A Higgs-bozon megfigyelését akkor merte a CERN hivatalosan bejelenteni, amikor mind az ATLAS, mind pedig a CMS kísérlet 5σ eseménytöbblettel látott ugyanolyan tömegű és a Higgs-bozonhoz hasonló tulajdonságú részecskét (4. ábra). Ugyanakkor a néhai LEP elektron-pozitron ütköztető négy kísérlete közül az ALEPH csaknem meggyőzően látott Higgs-bozont 10 GeV-vel kisebb tö-



4. ábra. A sok egyéb részecske mellett keletkező Higgs-bozon bomlása két nagy energiájú fotonra (pirossal jelölve) a CMS-detektorban.

megnél, mint ahol később felfedezték, de a másik három (DELPHI, L3 és OPAL) ugyanott semmi többletet nem észlelt; emiatt komoly viták voltak a közös cikk megfogalmazásáról. A LEP-nél több hasonló eset is volt, amikor az egyik kísérlet észlelt valami újat, de a többi nem látta: ez a statisztika gonosz tréfája a kísérletezőkkel.

Hasonló eset volt az is, ami a frissen észlelt Higgs-bozon tanulmányozása alatt történt 2012-ben. Az adatok negyede már meggyőzően mutatta az új részecskét, de mindkét kísérlet esetén valamivel nagyobb valószínűséggel jelentkezett, mint az elméleti jóslat. Azután az ATLAS adataiban kezdetben nőtt a jel, a CMS adataiban viszont csökkent, állandóan a kísérleti bizonytalanság határán tartva a különbséget. Az év végére minden adat szépen belesimult a standard modellel számított értékekbe. A Higgs-bozonos adatelemzés fejlődése is érdekes volt: kezdetben a kísérletek elemezői a statisztikus bizonytalanságot igyekeztek csökkenteni, emiatt viszont az adatmennyiség növelésével a szisztematikus bizonytalanság nagyobb lett a statisztikusénál. 2013-ban mindkét kísérlet új elemzési módszert készített, amellyel a szisztematikus bizonytalanságot a statisztikus alá sikerült csökkenteni, a különbség az ATLAS esetében volt igazán feltűnő. Vegyük

észre, hogy egy kísérlet adatgyűjtését nem érdemes folytatni, amikor a statisztikus bizonytalanság már a szisztematikus alatt van.

Összetett kvarkállapotok

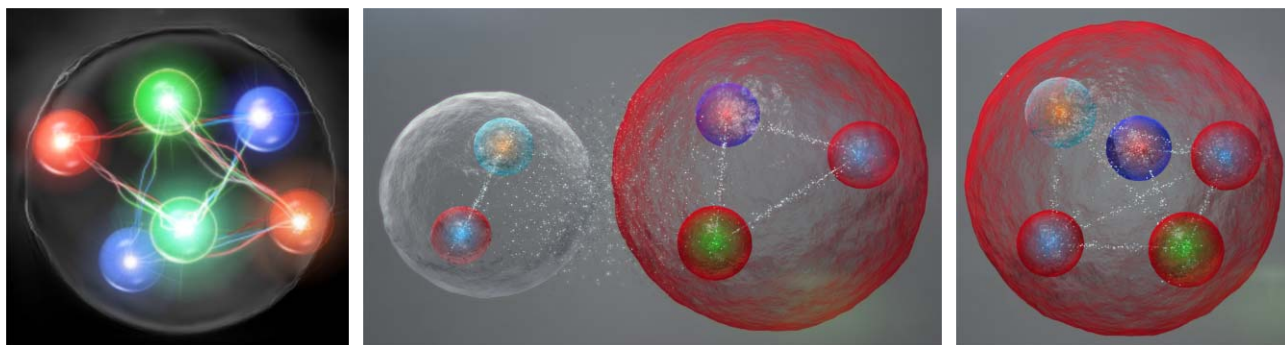
A standard modell feltételezi, hogy a kvarkok közötti erős kölcsönhatás töltése három állapotú, és azt a színlátással való kiváló analógia alapján *színtöltésnek* hívjuk. A természet csak színtelen állapot létezését engedi, ezért csak a kétféle legegyszerűbb színtelen kötött kvarkállapot létezik: a három kvarkból álló *barionok* ($[qqq]$, mint az $[udd]$ neutron és az $[uud]$ proton), illetve a kvark + antikvark kötött állapotok, a *mezonok*. Három antikvark természetesen

antibariont alkot, olyan például az $[\bar{u}\bar{u}\bar{d}]$ *antiproton*. Elvben semmi sem gátolja háromnál több kvarkból álló hadronok kialakulását, amíg a színtelenség követelménye kielégül. Ilyenek lehetnek a *tetrakvark* vagy *dimezon*, $[q\bar{q}q\bar{q}]$, a *pentakvark* $[qqq\bar{q}q]$ és a *hexakvark* vagy *dibarion* $[qqqqqq]$ vagy $[qqq\bar{q}\bar{q}\bar{q}]$, bennük a q akármelyik kvarkot jelölheti, vegyesen. Ezek az állapotok lehetnek két hadron molekulaszerűen kötött állapotai, vagy kvarkanyagszerű erősen kötött állapotok. Még egzotikusabb a sok gluon kötött állapota, a *gluonlabda*. Mindegyik kielégítheti a színtelenség követelményét.

Dibarionok vagy hexakvarkok

Egy hexakvark (5. ábra, balra) biztosan létezik, a deuteron, a proton és neutron kötött állapota, és az valóban molekulaszerű, hiszen a neutron és a proton külön-külön van benne, viszonylag gyenge kötésben. Elméletileg megjósolták a H dibarion létezését, amely $[uds][uds]$ vagy $[udsuds]$ alakú, és azt többen felfedezték, majd létezését még többen megcáfolták. A 80-as évek végén egy konferencián tanúja voltam, hogy a dibarionokkal foglalkozó ülést a konferencia elnöke a következő mondattal jellemezte: „A dibarionok ér-

5. ábra. Balra a hexakvark (dibarion), középen a mezon+barion molekula és jobbra a pentakvark.

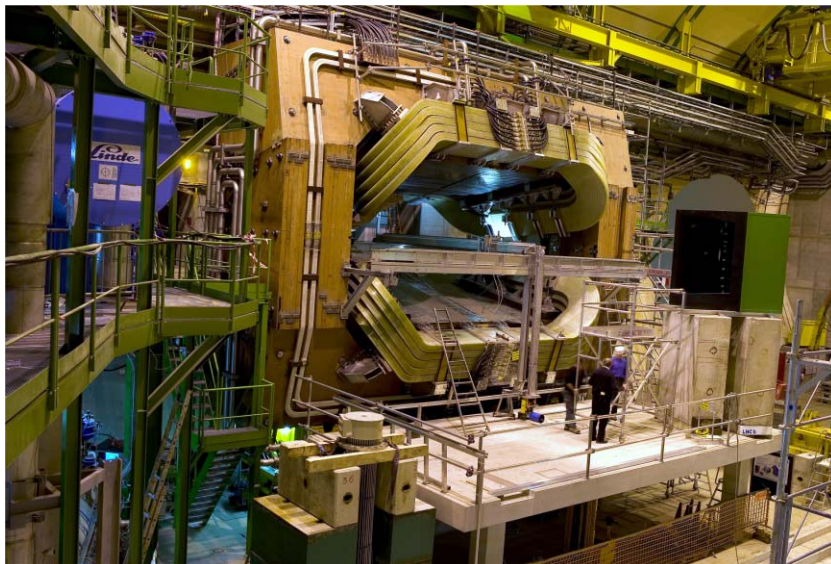


dekes tulajdonsága, hogy a mérések pontosításával hajlamosak eltűnni.” A dibarionokat azóta is érdeklődés övezi: az InSpire publikációs adatbázis 1980 előtt 50, 1980 és 1990 között 350, 1991 és 2000 között 260, 2001 és 2010 között 120, 2011 óta pedig 120 dibarionokkal foglalkozó publikációt tart nyilván.

Pentakvarkok

Az elhíresült $\Theta^+ = [u u d d \bar{s}]$ pentakvark, az első ötkvarkos állapot (5. ábra, középen és 5. ábra, jobbra) létezését szovjet elméleti fizikusok várták (jósolták meg elméleti számítás alapján, ahogy mondani szoktuk) 1540 MeV/c² tömeg környékén. *Einstein* $E = mc^2$ formulája alapján, amely összefüggésbe hozza az energiát és a tömeget, a részecskék tömegét energiaegységekben, általában millió elektronvoltban (1 eV energiát nyer egy elektron 1 V feszültség hatására), MeV-ben mérjük és a részecske jele után írjuk. Ennek megfelelően ez a pentakvark a $\Theta^+(1540)$ nevet kapta. A javaslat nagy publicitást kapott, nyolc kísérlet korábbi adatok elemzése alapján azonnal felfedezni is vélte (a részecskefizika eseményeket tárol, amelyekhez később vissza lehet térni és újabb szempontokból elemezni), majd még többen megcáfolták. Sokan utána számoltak, például *Csikor Ferenc* és társai (Eötvös Egyetem) számításai 2006-ban a $\Theta^+(1540)$ létezését kétségbe vonták. Ez a pentakvark le is került a napirendről.

Annál meglepőbb volt, amikor az antianyag kutatására alakult LHCb együttműködés (6. ábra) 2015-ben közölte, hogy két pentakvarkállapotot (7. ábra, balra) fedeztek fel a b-kvarkot tartalmazó Λ_b^0 barion bomlás-termékeiben (7. ábra, jobbra). Az LHC nagy energiájú proton-proton ütközéseiben keletkező b-kvarkok a protonokból kiszabaduló u és d kvarkokkal $\Lambda_b^0 = [b u d]$ bariont keltenek, amely nagyon sokféleképpen bomlik. A bomlástermékekből azonosították a $J/\Psi = [c \bar{c}]$ mezon (két Nobel-díjas felfedezője, *Ting* és *Rich-ter* különböző betűvel jelölte, ezért maradt rajta a ket-tős szimbólum) igen jellegzetes, hegyes csúcsot adó $J/\Psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ müonpárra bomlását, és ennek segítségével a J/Ψ + proton energiaspektrumában megjelenő ren-



6. ábra. Az LHCb észlelőrendszer szerelése a CERN Nagy Hadronütköztetőjénél. A kísérletet az antianyag hiányának tisztázására és ritka jelenségek észlelésére építették, főleg b-kvarkot tartalmazó hadronállapotok tanulmányozásával. A képen a detektor óriási dipólusmágnese látszik, azt ma már eltakarja az észlelőrendszer.

geteg ismert $\Lambda_b^0 \rightarrow K^- + J/\Psi + p$ bomlás mellett, 4380 és 4450 MeV energiánál két új tömegcsúcsot figyeltek meg. A 8. ábrán látható mért energiaspektrumban a P_c pentakvark 4450 MeV energiánál keskeny, 4380 MeV-nél széles csúcsot ad a standard modell által számított, már ismert bomlások járulékaival mellé. Mindkét megfigyelés megbízhatósága igen nagy, a $P_c(4380)$ konfidenciája 9σ , a $P_c(4450)$ -é 12σ .

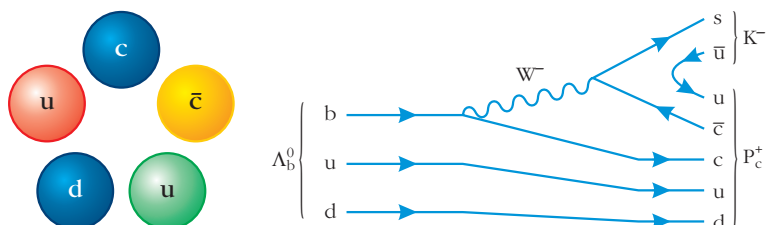
Az LHCb együttműködés a fenti megfigyelést egy olyan cikkben közölte, amelynek – a nagyenergiás kutatásokban szokásos módon – rengeteg szerzője van; az abc-sorrendben felírt 725 szerző listája Aaij névvel kezdődik – mint például a *PRL* 115, 072001 is, amelyből jó pár ábra származik – (az ATLAS-cikkek első szerzője Aad, a CMS-cikkek szerzői az országok szerinti abc-ben szerepelnek, jelenleg az örményekkel [Armenia] kezdve, amíg például Albánia vagy Argentína nem csatlakozik).

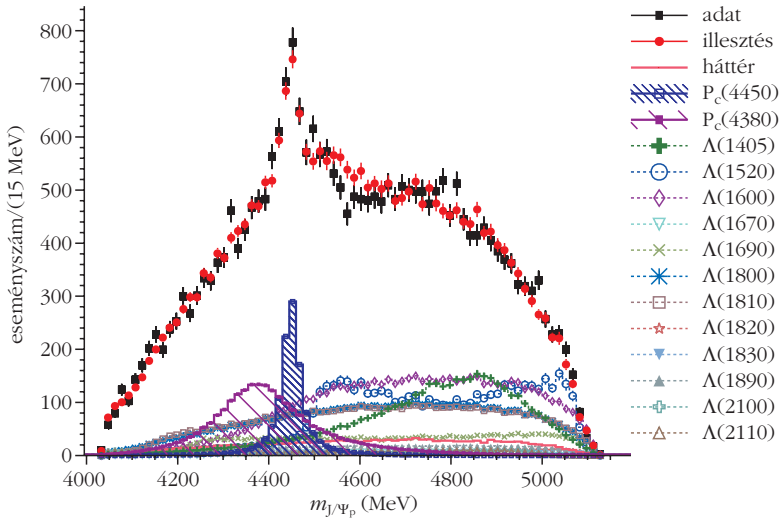
Tetrakvarkok

2016 nyarán közzétették az LHCb kísérlet másik érdekes, tetrakvarkokra vonatkozó megfigyelését. Tetrakvark egyszerűen két mezon enyhén kötött állapota is lehet, tehát a nagy energiájú protonütközések óriási szét-szórt részecskemennyiségében szinte lehetetlen meg-

figyelni, hacsak nem tartalmaz több nehéz kvarkot. Mivel a proton u és d kvarkot tartalmaz, olyan állapotokat célszerű keresnünk, amelyek kizárólag náluk nehezebb kvarkokból állnak. Egy ilyen állapotot már a Chicago melletti Fermilab Tevatron ütköztetőjénél sikerült kimutatni. Ezt is a $J/\Psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ bomlással ismerték fel (továbbiakban azt mondjuk, *címkézték*), de ezúttal a $B^+ = [\bar{b} u]$ mezon bomlásakor $J/\Psi = [c \bar{c}]$, $K^+ = [\bar{s} u]$ és $\Phi = [\bar{s} s]$ mezonokra. A mért

7. ábra. Balra a P_c pentakvark feltételezett szerkezete, jobbra a P_c pentakvark keletkezése Λ_b^0 barion bomlásakor.





8. ábra. Pentakvarkok megjelenése a Λ_b^0 barion bomlásában 4380 és 4450 MeV/ c^2 tömegnél. A két pentakvark satírozott lila és kék csúcsa illesztett, a többi folyamat járuléka szimuláció eredménye. A folyamatok összege jól lefedi a mért energiaspektrumot.

energiaspektrum a $J/\Psi + \Phi$ rendszer tömegére vonatkozott, és a két Tevatron-kísérlet 4140 MeV-nél látott 5σ feletti konfidenciával [ccss] tetrakvarkcsúcsot. Az LHCb kísérlet ezt a megfigyelést igazolta, sőt elképesztő mennyiségű adatukban még három hasonló állapotot találtak.

Az LHCb kísérlet tehát 2016-ban sikeresen megfigyelt több kötött tetrakvark-állapotot. Amint azt a 9. ábra illusztrálja, a mért energiaspektrum nem igazán írható le a standard modell ismert folyamataival, de négy tetrakvark-állapot beillesztése a szimulációba az elméleti görbe és a mért adatok illeszkedését jelentősen megjavítja. A négy tetrakvarkcsúcs 4140, 4274, 4500 és 4700 MeV tömegenergiánál található 5σ feletti megbízhatósággal.

Gluonlabdák

Tudvalevő, a protonok és neutronok tömegének mintegy fele gluonok formájában van jelen, a három alapvető kvark tömege (*vegyértékkvarknak* is hívják) néhány százalékkal járul csak hozzá, a többi tiszta energia. Az erős kölcsönhatás elmélete, a *kvantum-színdinamika* megengedne tisztán gluonokból álló részecskét, azaz kötött állapotot, ezt gluonlabdának (angolul glueball) hívják. A mezonok részletes tanulmányozása lehetőséget nyújt ezek megfigyelésére, mivel a kvarkok egyesülésére vonatkozó szabályok csak bizonyos kvantumszámokat engednek meg a kvark + anti-kvark állapotokra. Anomális kvantumszámok megfigyelése esetén mezonok kötött állapotára vagy gluonlabdára is gyanakodhatunk. Elméleti fizikusok meg

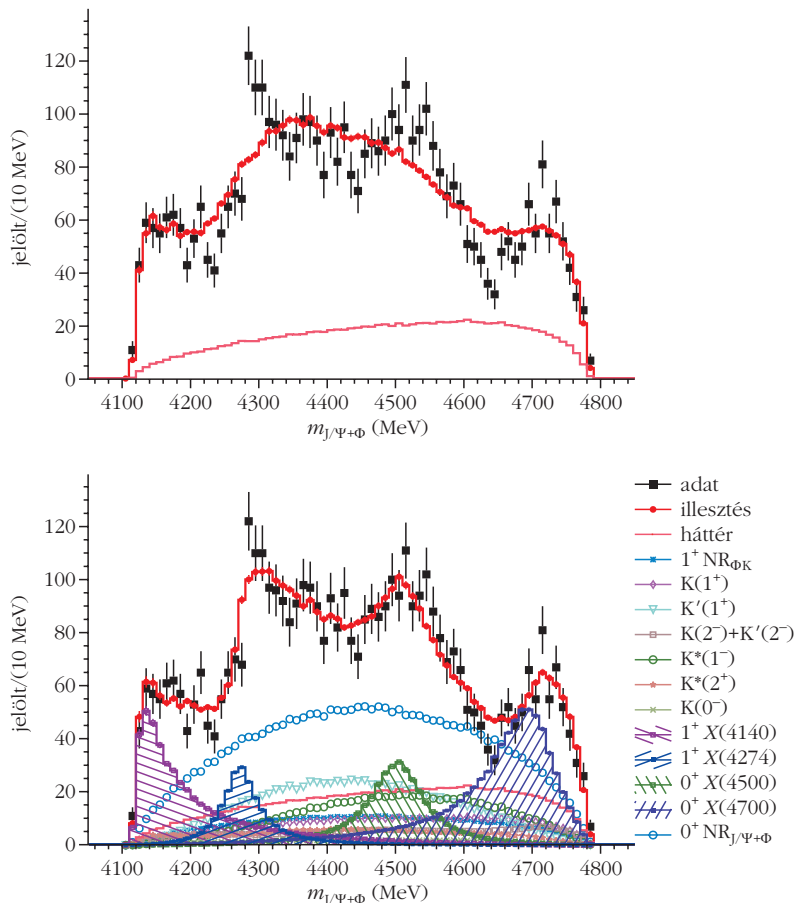
vannak győződve róla, hogy az enyhén rejtélyes és emiatt alaposan tanulmányozott $f(1710)$ részecske valójában tiszta gluonlabda és nem csak egyszerűen mezon gluoncsomóval vagy mezon-mezon kötött állapot.

Megmagyarázatlan és nem igazolt jelenségek

CDF-esemény

A részecskefizikai kísérletek hoztak néhány igazán elképesztő és máig sem nem igazolt, sem nem megmagyarázott jelenséget. Számomra a legérdekesebb az az esemény volt, amelyet a Tevatron CDF kísérlete észlelt 20 évvel ezelőtt: egy 1960 GeV energiával ütköző proton és antiproton teljes tartalma eltűnt és oldalra csak egy elektron, egy pozitron és két foton repült ki viszonylag gömbszimmetrikusan, nagy energiával. Jó kérdés, hova lett a 3-3 kvark és antikvark meg a rengeteg gluon, tehát a sok színes részecske: a fizika jelenlegi tudása szerint ez az esemény egyszer

9. ábra. A $J/\Psi + \Phi$ rendszer tömegére mért energiaspektrum az LHCb kísérlet adataival. Fölül a tetrakvarkállapotok feltételezése nélkül, alul azok szimulációba illesztésével. Jobb oldalt lent az adatelemzéskor figyelembe vett, ismert folyamatok láthatók, a feltételezett tetrakvark-állapotok járuléka satírozva.



rően nem volt lehetséges, illetve tudományosabban fogalmazva, nagyon-nagyon valószínűtlen volt. Elméleti cikkek valóságos özöne próbálta megmagyarázni, és az észlelést soha nem sikerült megismételni. A CDF-kísérletnek volt egy másik furcsa mérése is: 2011-ben nagy izgalmat váltott ki egy új részecske észlelése, amely W bozonra és két hadronzáporra (azaz kvarkpárra) bomlott. Az észlelés ellent mondott a standard modellnek, a megbízhatósága $3,2\sigma$ volt, amely a későbbi adatok felhasználásával $4,8\sigma$ -ra nőtt. Ugyanakkor viszont a Tevatron másik fő kísérlete, a DZero közölte, hogy nincs ott semmi, ami eltemette az egészet.

Negyedik neutrínó

A Los Alamosi LSND kísérlet 2001-ben elektron-anti-neutrínók megjelenését észlelte olyan folyamatban, ahol azok nem keletkezhettek. Közepes energiájú protonokat lőttek réztömbbe, ahol azok pozitív és negatív π -mezonokat, pionokat keltettek. A negatív pionok elnyelődtek az atommagokban, a pozitívak pedig továbbrepülve elbomlottak müonra és müon-neutrínóra $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$. A gyors müon is elbomlott pozitronra, elektron-neutrínóra és müon-antineutrínóra, a végállapotban tehát háromféle neutrínó jelenhetett csak meg, elektron-antineutrínók nem. A megjelenésüket meg lehet magyarázni egy negyedik neutrínó létezésével, de az meg ellentmond az eddigi kísérleti tapasztalatnak. Ráadásul az a negyedik neutrínó *steril* kell hogy legyen, nem lehet párja a töltött leptonok között, hiszen az a standard modell kísérleti ellenőrzésénél régen megjelent volna. Az észlelés megbízhatósága $3,3\sigma$ volt, tehát jóval a bűvös 5σ alatt maradt. Új kísérletet szerveztek MiniBooNE néven a jelenség ellenőrzésére, amelyet hasonló feltételek mellett, de egy nagyságrenddel nagyobb energián és neutrínóröptetési távolságon végeztek a Fermilabban. Az eredmény igen érdekesen alakult: 2007-ben azt jelentették, hogy

nem látják a jelenséget, 2009-ben pedig azt, hogy talán mégis, 2012-ben pedig már észlelték $3,8\sigma$ többlettel, tehát még mindig a kritikus 5σ alatt. Már szervezik a következő kísérletet a dolog ellenőrzésére.

A 750 GeV-es LHC-részecske

Erről korábban cikkeztünk, hiszen óriási izgalmat váltott ki, amikor az ATLAS és a CMS olyan Higgs-bozon jellegű részecskét észlelt az LHC-nál, amely ellentmondani látszott a standard modellnek. 2015-ben mindkét kísérlet észlelte jelét $3,4\sigma$ megbízhatósággal, de a 2016-os adatokban már nem, tehát véletlen statisztikus ingadozás volt.

Tanulság

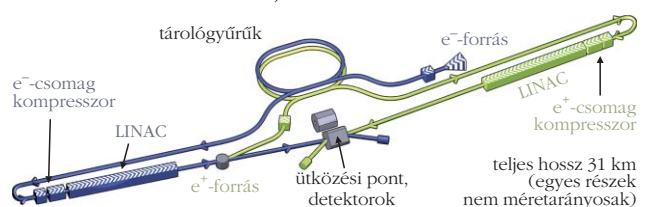
A részecskefizikától felfedezéseket várunk, különösen, mivel van jó pár rejtély, amelyet elmélete, a standard modell nem képes megmagyarázni (például a neutrínóíz-rezgés, vagy a sötét anyag léte és az anti-anyag hiánya a Világegyetemben), ha a kísérletileg mért adatokat remekül le is írja. Azonban nagyon óvatosan kell kezelnünk minden új jelenség észlelését: fontos az eredmény megfelelő matematikai-fizikai megbízhatósága és a másik, független mérés megerősítése. Több példát is hoztunk, amelyből kiderül, milyen fontos, hogy több kísérlet működjék párhuzamosan; legutóbb a gravitációs hullámok felfedezése is megmutatta, mennyire lényeges volt, hogy az amerikai LIGO kísérlet két egyforma berendezést működtetett egymástól 3000 km-re. A tervezés alatt álló következő óriási részecskegyorsító, az ILC lineáris elektron-pozitron ütköztető nyalábjai csak egyetlen pontban fognak találkozni, ezért a malomjáték csiki-csuki módszerének megfelelően – hogy meglegyen az eredmények megfelelő ellenőrzése – két mérőberendezést fognak felváltva ki-be tologatni az ütközési pontba.

ILC, a jövő esetleges tiszta ütköztetője

A nagyenergiás részecskefizika kétféle gyorsítóberendezéssel dolgozik. A protonütköztetés felfedezési potenciálja két okból óriási. Egyrészt a proton (és párja, az antiproton) stabil részecske, nagy mennyiségben tárolható, és nagy tömege miatt kis sugárzási veszteség mellett óriási energiára gyorsítható. Másrészt összetett rendszer, ahol az alkatrészek a legkülönbözőbb energiával ütközhetnek egymással, igen széles energiaeloszlást tapogtatva le. Ugyanakkor, ahogy valamennyi LHC-kísérlet észlelésénél látjuk, az érdekes folyamat más folyamatok óriási hátterén ül, tehát igen nehéz azonosítani. Ezért az új felfedezéseket célszzerű az új jelenség keletkezési energiájára beállított elektron-pozitron ütköztetőnél részleteiben tanulmányozni. A LEP (Nagy elektron-pozitron) ütköztető a maximális elérhető energiájú elektronokat és pozitronokat ütköztetett, és – bár a Higgs-bozon nem szolgáltatva – valóságos kincsbányája lett a standard modell ellenőrzésének. A körkörös gyorsítók elektronenergiáját a szinkrotronsugárzás korlátozza, a $125 \text{ GeV}/c^2$ tömegű Higgs-bozon részletes tanulmányozásához tehát már egymással szemben épített, lineáris gyorsítót kell építeni.

Ilyen terv a Nemzetközi lineáris ütköztető (International Linear Collider, ILC), amelyet már viszonylag régen megterveztek, a helyszínére is több jelentkező van, csak a pénz gyűlik nehezen össze. Az *ábrán* látható a két egymással szembe kapcsolt lineáris részecskegyorsító és az ütközési pontnál a két ki-be tologatható észlelőrendszer. Így az egyik által esetlegesen felfedezett új jelenség később, a másik kísérlettel megerősíthető vagy cáfolható.

Az ILC sematikus terve. A nyalábok találkozási pontjában két detektort terveznek, amelyeket az ütközési pont körül ki-be csúsztatással lehet cserélni. A rendszer teljes hosszát 31 km-re tervezik.



IKARUSZ BOGLÁRKA LEPKÉK SZERKEZETI ÉS PIGMENT EREDETŰ SZÍNEINEK STRESSZÁLLÓSÁGA

Piszter Gábor, Kertész Krisztián, Horváth Zsolt Endre, Biró László Péter
MTA EK Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet

Bálint Zsolt
Magyar Természettudományi Múzeum

A rovarok egyik leglátványosabb csoportja a lepkék rendje, ami évezredek óta folyamatosan az emberi csodálat tárgya. Változatos színeik és mintázatok azonban nem öncélúak, hanem jól azonosítható biológiai szerepük van. A lepkék szárnyának felszíni (felső) oldalán megjelenő élénk színek jellemzően a szexuális kommunikációt szolgálják, elősegítve a vizuális alapon történő párválasztást. Ettől eltérően, a szárnyak fonák (alsó) oldalán található bonyolult mintázatoknak a rejtőzködésben van elengedhetetlen szerepük, így a lepkék összecukott szárnyakkal szinte tökéletesen képesek beolvadni a környezetükbe [1]. A két szárnyoldal eltérő biológiai funkciójához különböző optikai tulajdonságokra van szükség, mi-

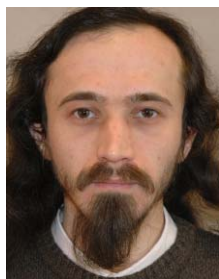
vel a felszínnek a figyelemfelkeltést, a fonáknak pedig az álcázást kell megvalósítania. Ehhez a pikkelyeknek, azaz a szárnymembránt tetőcserépszerűen borító kitinlapocskáknak kell a két oldal szerepének megfelelő színeképzést megvalósítaniuk. A jelenség különösen szépen megfigyelhető a Magyarországon is honos Boglárka-rokonú lepkék esetében, ahol a hímek szárnyfelszíne fémesen csillogó, élénk kék színárnyalatokban pompázik, míg a fonákoldal szürkés-barna alapszínű, bonyolult foltmintázattal kiegészítve [2–4]. Ráadásul, a két oldal színei eltérő színeképzési folyamatoknak köszönhetik a különböző optikai tulajdonságaikat. A Boglárka-rokonúakban, a fonák pikkelyeiben általában egy széles spektrális tartományban elnyelő pigment, a melanin található a kitinben, amely barna árnyalatok előállítására képes. A szárnyfelszín élénk kék, illetve kékes árnyalatú színei ezzel szemben festékanyagok és fotonikus nanoszerkezetek (-architektúrák) összjátékából állnak elő [5–7].

A szárnypikkelyek nanoarchitektúrája egy olyan kompozit anyag, ami kitinből és levegővel töltött üregek periodikus, háromdimenziós rendszeréből épül fel. Az üregek mérete és tipikus távolsága a látható fény hullámhossztartományába esik, azaz alig pár száz nanométerenként követik egymást a kitinbe ágyazva. Ennek következtében a kitin-levegő fotonikus nanoszerkezet úgy lép kölcsönhatásba a ráeső fénnel, hogy a szerkezetben terjedni nem képes

A munka az OTKA K 111741 és K 115724 pályázatok, valamint az Emberi Erőforrások Minisztériuma ÚNKP-17-3-IV kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának támogatásával készült.
www.nanotechnology.hu/magyarul.html



Piszter Gábor okleveles fizikus, 2013-tól az MTA EK Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet tudományos segédmunkatársa. Fő kutatási tevékenysége a biológiai eredetű fotonikus nanoarchitektúrák optikai és szerkezeti vizsgálata, valamint ezek optikai elvű gőzérzékelő szenzorként történő alkalmazása. Jelenleg az Új Nemzeti Kiválóság Program ösztöndíjasa.



Kertész Krisztián fizikus, az MTA EK Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet tudományos munkatársa. 2010-ben szerzett doktori fokozatot a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem TTK Fizikai Tudományok Doktori Iskolájában. Kezdetben főként szén nanoszerkezetek kutatásán dolgozott, majd a biológiai és bioinspirált fotonikus nanoszerkezetek vizsgálata került érdeklődése középpontjába, amelyben felhasznál mikroszkopos módszereket és optikai spektrometriát.



Horváth Zsolt Endre okleveles fizikus, az MTA doktora, az MTA EK MFA tudományos tanácsadója. Fő kutatási területe különféle nanoszerkezetek, nanostrukturált anyagok és vékonyrétegek elektronmikroszkopos vizsgálata, valamint vékonyrétegek és más kristályos anyagok röntgendiffrakciós, röntgen-reflektometriás szerkezetvizsgálata.



Biró László Péter az MTA levelező tagja, Széchenyi-díjas, az MTA EK MFA kutató-professzora Kolozsváron született, egyetemi tanulmányait is ott végezte. PhD fokozatot a BME-n szerzett, a Szegedi Tudományegyetem címzetes egyetemi tanára. Meghatározó szerepet játszott a nanométeres skálájú anyagtudomány hazai meghonosításában, fő kutatási területei a pásztázószondás mikroszkópia, a szén alapú nanoszerkezetek és 2D anyagok, valamint a biológiai eredetű fotonikus nanoarchitektúrák.



Bálint Zsolt a biológiai tudományok kandidátusa (1997), 1983 óta a Magyar Természettudományi Múzeum munkatársa, jelenleg főmuzeológusi beosztásban a Lepkegyűjtemény vezetője. Fő érdeklődési területe a Lángszínérfélék (*Lycenidae*) sokfélése, különös tekintettel taxonómiájukra és életmódjukra. Biró Lászlóval közel két évtizede kutatja a lepkék optikájával kapcsolatos jelenségeket.

bizonyos összetevőit veri csak vissza. Ez a jelenség hasonló ahhoz, ahogyan a félvezető anyagokban egyes elektronenergiákon tiltott sáv képződik. Az ilyen jellegű szerkezeteket fotonikus kristályoknak nevezzük [1]. A továbbhaladó komponensek elnyelődnek a nanoarchitektúrában jelen lévő melanin molekuláiban, így a két folyamat összjátékának eredménye, hogy szemünkhöz csak a fotonikus nanostruktúra által visszavert összetevő jut el, amit színeként érzékelünk. Mivel a szerkezet méretei határozzák meg a terjedni képtelen fény hullámhosszát, az így keletkező színt szerkezeti színeknek nevezik. Ennek legegyszerűbb esete a fizikában jól ismert vékonyréteg-interferencia. A különleges színeképzés eredménye az is, hogy a fotonikus kristályokat tartalmazó szárnypikkelyek gyakran fémesen csilognak és iránytól függően verik vissza a fényt.

A Boglárka-rokonúak pontmintázata fajonként egyedi (fajspecifikus), így az entomológusok, azaz a rovarokkal foglalkozó tudósok a fonákmintázat alapján azonosítják a lepkék fajtát. Korábbi vizsgálataink során megmutattuk, hogy a Magyarországon honos Boglárka-rokonúak hímjei esetében a szárnyfelszín kék árnyalata is fajspecifikus, azaz a hímek faja meghatározható pusztán a kék szín optikai vizsgálatával [3, 4]. Ennek hátterében az állhat, hogy a lepkék színérzékelése képes ezen árnyalatok megkülönböztetésére, így az evolúció évmilliói alatt a szín és a vizuális érzékelés együttes fejlődésével egy olyan szexuális kommunikációs csatorna jött létre, amelyet fajtársaik azonosítására tudnak felhasználni. Ahhoz, hogy a szín alapján történő párválasztás hatékonyan megvalósulhasson, a szerkezeti színek nagyfokú reprodukálhatósága szükséges. Vizsgálataink alapján arra jutottunk [8], hogy a Lángszínérfélék családjának Európában legelterjedtebb tagja, az Ikarusz boglárka (latin nevén *Polyommatus icarus*) lepkefajban csak egy nagyon szűk spektrális tartományba (± 10 nm) eső színek fordulnak elő. Az ettől eltérő színű hímeket a nőstények vélhetően nem ismerik fel fajtárszámként, így nem lesznek sikeresek a párkeresésben, emiatt gényeik sem öröklődnek tovább.

Mivel a szárnyfelszín kékje nagy távolságból is hatékonyan működő kommunikációs csatorna, szemben a szárnyfonák bonyolult mintázatával, azt feltételezzük, hogy fontos biológiai funkciója miatt a szerkezeti eredetű kék színek sokkal stabilabbak a külső hatásokkal szemben, mint a pigment eredetű fonákmintázata. Ennek vizsgálatára külső környezeti stressznek tettük ki a lepkéket a fejlődésük során: bábállapotú példányokat különböző, 10 és 62 nap közti ideig hűtőszekrényben, 5 °C-on tároltunk. A petékből kikelt hernyók növekedés és többszöri vedlés után bebábozódnak. A bábban megtörténik a teljes átalakulás, ennek ideje jellemzően 7-10 nap. Ekkor formálódnak a szárnyak, az azokat borító szárnypikkelyek, valamint a teljes pigmentációs folyamat is ekkor zajlik le. A bábok hűtésével le tudtuk lassítani ezt a fejlődési folyamatot, ezzel beavatkozva a fotonikus nanoarchitektúrák és a pigment eredetű színek kialakulásába.

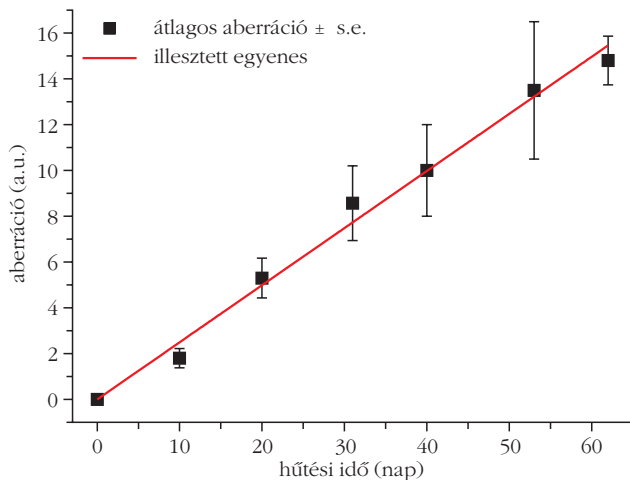
Azt tapasztaltuk, hogy hűtés hatására rajzolatbeli rendellenességek (aberrációk) alakulhatnak ki a természetes körülmények között, hűtés nélkül nevelt példányokkal szemben [9]. Ezen aberrációk mértéke, mint látni fogjuk, függ a hűtési időtől.

Kísérleti módszerek

Hűtési kísérleteinkhez saját nevelésű Ikarusz boglárka egyedeket használtunk. A fajra jellemző az ivari kétalakúság, azaz a hímek élénk kék szárnyfelszínűek, a nőstények viszont az esetek túlnyomó többségében barnák. A kísérletünkben szülő generációként alkalmazott imágókat (kifejlett egyedeket) a csillebércei Energiatudományi Kutatóközponthoz (régi nevén KFKI telephelyhez) közeli tisztások egyikén fogtuk be. A kék hímeket és barna nőstényeket ragadozóktól védve, hálólal fedett tápnövényen petéztettük. A kikelt hernyók is itt nevelkedtek, amíg a tápnövény elegendő volt. Ezt követően begyűjtöttük a hernyókat, és egyesével Petricsészékbe helyezve egészen a bábozódásukig folytattuk táplálásukat. Az egyedek, a tipikusan hajnali órákban lejátszódó bábozódásuk után, a hűtőszekrénybe kerültek, ahol 10 és 62 nap közötti meghatározott ideig +5 °C-on tartottuk őket. A hűtési idő leteltével a bábok a keltető edénybe kerültek, ahonnan a kikelés után az imágókat egyesével begyűjtöttük. Az imágók szárnyainak színét integrálogómbös optikai spektrometriával vizsgáltuk. E módszerrel a szárnyról visszavert összes fényt detektálni tudjuk, így a szerkezeti színek közti kicsiny eltérések is hatékonyan feltárhatók és összehasonlíthatók. Az egyedeken nemcsak a szerkezeti színt, hanem a fonákoldal mintázatát és annak elváltozásait is megvizsgáltuk. A rajzolat egyes elemeinek megváltozásához (aberrációjához) pontértékeket rendeltünk, amelyeket összevetettünk a hűtési idővel. Továbbá, néhány kiválasztott példány szárnypikkelyeiről optikai mikroszkópos, valamint pásztázó és transzmissziós elektronmikroszkópos felvételeket is készítettünk. Ezek segítségével tártuk fel a fotonikus nanoszerkezet tulajdonságait.

A fonákoldal pigment alapú mintázata

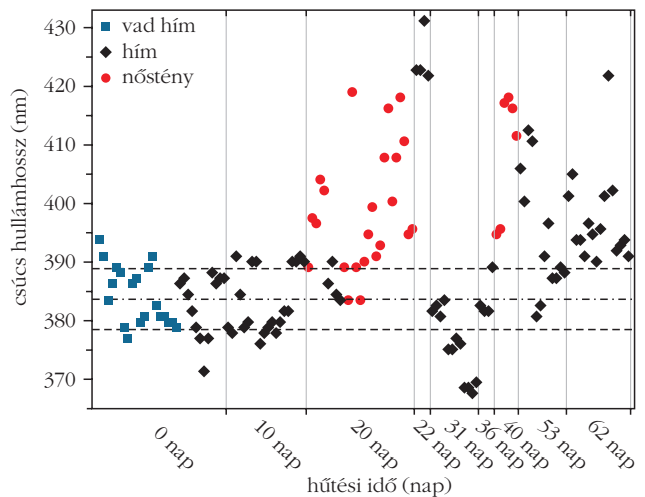
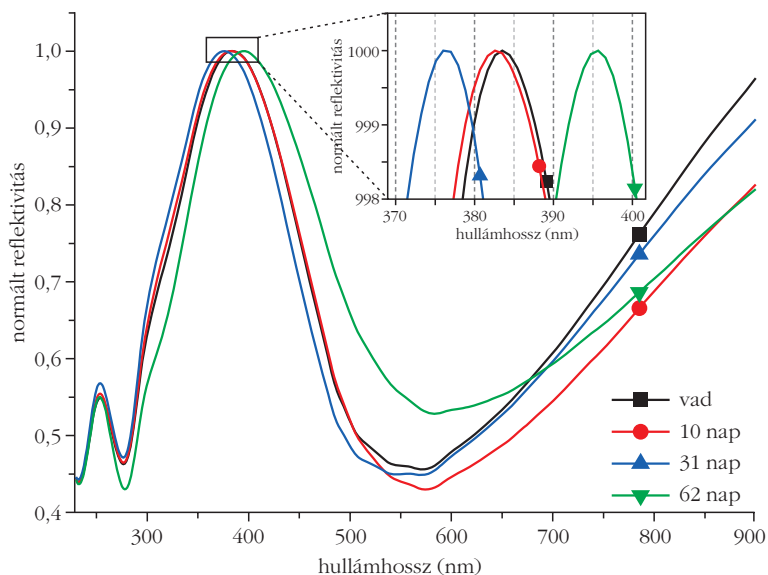
Az Ikarusz boglárka szárnyainak fonákoldali mintázata a hímek és a nőstények esetében megegyezik. Ez az összetett, pigmentszínekből álló mintázat a Boglárka-rokonúak nemzetségében tipikusan fehér gyűrűvel határolt fekete pöttyöket és narancsszínű foltokat tartalmaz. Az 1. ábrán (lásd az első, belső borítón) néhány, a kísérlet során kikelt lepké szárnya látható. A hűtetlen egyedeken megfigyelhető (1.e, g, m, o. ábrák), hogy a fekete pöttyök a szárnyak teljes felületén megtalálhatók; ezeket a példányokat tekintettük összehasonlítási alapnak. A fonákoldali mintázat elemei a hűtési idő növelésével megváltozhatnak: előfordul a foltok méretének csökkenése, valamint azok elhalványulása és eltűnése is. Ezeket a változásokat a tovább-



2. ábra. Ikarusz boglárka lepkék fonákoldali szárnyrajzolatának átlagos rendellenességei (aberrációi) a hűtési idő függvényében. Látható, hogy a két mennyiség között egyenes arányosság van, azaz a hűtési idő növelésével egyre több elváltozást tapasztaltunk a fonákoldali mintázatban. s.e.: standard hiba, a.u.: tetszőleges egység.

biakban fonákoldali rendellenességeknek (aberrációknak) nevezzük. A leghosszabb ideig, 62 napig hűtött hím és a 40 napig hűtött nőstény aberrációi az 1f, b, illetve az 1.n, p ábrákon láthatók. Megfigyelhető, hogy a hímnél szinte teljesen eltűnt a fajra jellemző mintázat, valamint a nőstényben is jelentősen lecsökkent a pöttyök mérete és száma is. Mind a 49 vizsgált példány esetében elvégeztük a hűtésekor létrejövő aberrációk számszerűsítését úgy, hogy a mintázat elemeinek változásához számértékeket rendeltünk: a vizsgált folt kismértékű aberrációjához egy pontot, míg jelentős változásához, illetve eltűnéséhez két pontot rendeltünk. E pontokat egyenként összegeztük, majd az azonos ideig hűtött lepkékre átlagoltuk. Az így kapott átlagos aberrációkat a hűtési idő függvényében ábrázoltuk (2. ábra). Látható, hogy a szárnyak

3. ábra. Különböző ideig hűtött Ikarusz boglárka hímek szárnyfelszínén mért visszaverési spektrumok a kék maximumra normálva. A kinagyított részen a csúcsok maximumai láthatók.



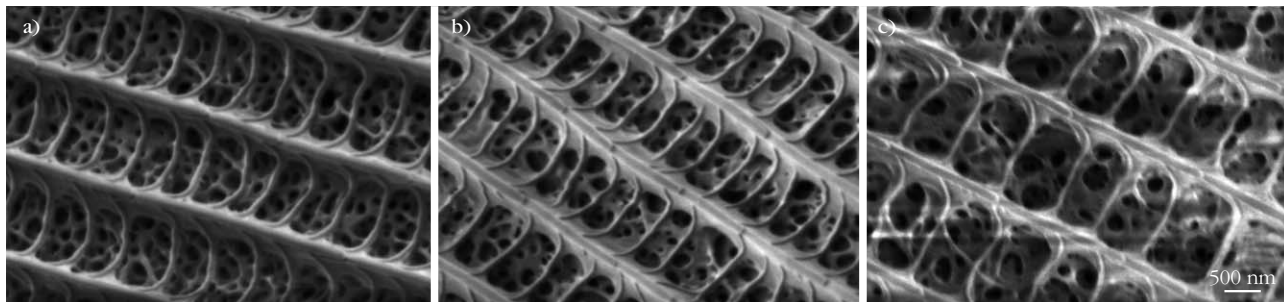
4. ábra. Ikarusz boglárka lepkeszárnyak felszíni visszaverési maximumának hullámhossza a hűtési idő függvényében. Látható, hogy a 10 napos hűtés nem okozott változást a szerkezeti színben, azonban a hosszabb hűtési idők esetén jelentősen megnőtt a szórás, és a kékpikkelyes nőstények is megjelentek.

fonákoldalán előforduló rendellenességek átlaga egyenes arányosságban van a hűtési idővel, azaz minél hosszabb ideig hűtöttük a bábokat, annál nagyobb változás jelent meg a kikelt lepkék fonákmintázatában.

A szerkezeti szín változásai

A szárnyak felszínének szerkezeti színét integrálgömbös spektrometriával vizsgáltuk. A hűtetlen, valamint a 10, 31 és 62 napig hűtött hímek átlagolt visszaverési spektrumait hasonlítottuk össze egymással (3. ábra). A 10 napos hűtés nem volt hatással a szerkezeti színre, a visszaverési spektrum egybevág a hűtetlen egyedeken mérttel. Viszont a 31 és 62 napig hűtött hímekben

különböző irányú eltérés tapasztalható a csúcs maximumának pozíciójában: a 31 napos hűtés az ultrabolya-irányba tolta a visszaverési maximumot, míg a 62 napig hűtött lepkékben nagyobb hullámhosszak felé tolódott a csúcs. A jelenség elemzéséhez minden vizsgált egyed esetében ábrázoltuk a csúcsok maximumának hullámhosszát a hűtési idő függvényében (4. ábra). Az első nyolc minta mindegyike általunk felnevelt hűtetlen egyed volt, amelyek természetes változatossága megfelel a korábban vizsgált, természetben nevelkedett példányoknak [8]. Így a hűtés hatására létrejövő spektrális változásokat ezzel a csoporttal hasonlítottuk össze. A 10 napos hűtés nem okozott jelentős hullámhosszbeli eltolódást a szerkezeti színben, ahogy ez a 3. ábrán is látható. Ez összhangban van a fonákoldali mintázat megváltozásával is, mivel ilyen idejű hűtésnél csak kismértékű rendellenességeket tapasztaltunk. Azonban hosszabb ideig tartó hű-



6. ábra. A szárnypikkelyek fotonikus nanoszerkezeteinek pásztázó elektronmikroszkópos felvételei: Ikarusz boglárka (a) hűtetlen hím, (b) 22 napig hűtött hím, (c) 20 napig hűtött nőstény.

téskor a szerkezeti szín változása nem a fonákoldalon látott lineáris módon változó aberráció–hűtési idő függvényhez hasonló kapcsolatot mutatott. A mért értékek szórása a többszörösére emelkedett, függetlenül a hűtési időtől, valamint az eredetileg barna nőstényeken kisebb-nagyobb mértékű kék pikkelyes tartományok alakultak ki (1.j és 1.1 ábra). Vagyis a hűtés hatására a nőstények szárnypikkelyeiben is megjelent a fotonikus nanoarchitektúra. Ez a megnövekedett színbeli változottság, valamint a kékes nőstények megjelenése azt mutathatja, hogy a bábok tartós hűtése formájában keltett külső stressz hatására a példányok egyedi genetikai változatossága jelenhetett meg.

Pikkelyek optikai és elektronmikroszkópiája

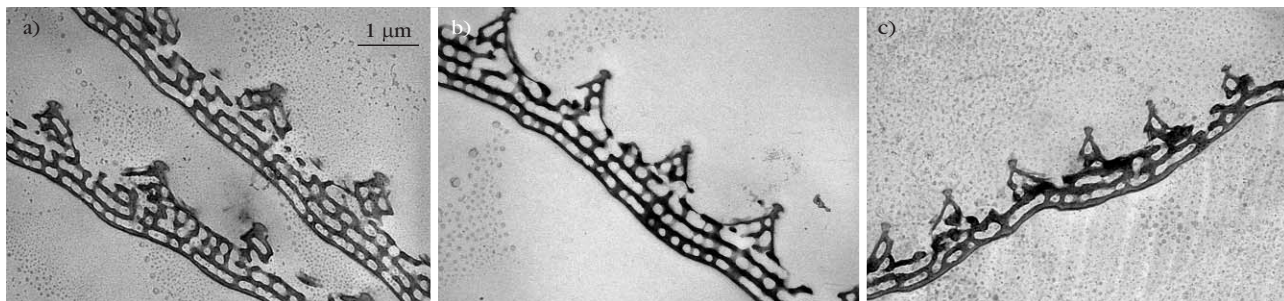
Az Ikarusz boglárkák szárnyainak megváltozásait optikai mikroszkóppal is megvizsgáltuk. A Boglárkarokonúak nemzetségében jellemzően két-két pikkelyréteg fedi a szárnymembrán mindkét oldalát, amelyek közül a felszín fedőpikkelyei rendelkeznek szerkezeti színekkel, az alappikkelyeket melanin színezi sötétbarnára. A természetes körülmények között nevelt hímeknél megfigyelhető a rendezett kék fedőpikkelyek rendszere, amelyek tetőcserépszerűen fekszenek egymáson (5.a ábra az első, belső borítón). A barna alappikkelyek alig néhány helyen lógnak ki a fedőpikkelyek közül, jellemzően ott, ahol ez utóbbiakból hiányzik egy-két darab. Ha összehasonlítjuk a 22 napig hűtött hím (5.b ábra) pikkelyeinek rendszerét a hűtetlenével, akkor határozott különbségeket tapasztalunk: a hűtés hatására szinte teljesen eltűntek a

rendezett pikkelysorok és -rétegek, helyüket pedig kék és barna pikkelyek rendezetlen halmaza vette át. A nőstényeknél ilyen jellegű, a rendezetlenség irányába mutató folyamatot nem figyeltünk meg, viszont valamennyi hűtött példányon feltűnő a kék pikkelyek megjelenése (5.d ábra), ami nem jellemző a vadon befogott barna nőstényekre (5.c ábra).

Pásztázó elektronmikroszkópba helyezve a hűtetlen és a hűtött egyedek szárnyait, feltárhatók a fotonikus nanoszerkezetek részletei. A hűtetlen hím esetében (6.a ábra) megfigyelhető a kék színt keltő, szivacszerű fotonikus nanoszerkezet [2], ami a pikkely teljes térfogatát kitölti. A felülnézeti képeken a 22 napig hűtött hím (6.b ábra) és a 20 napig hűtött nőstény (6.c ábra) fedőpikkelyeiben is hasonló szerkezet fedezhető fel. Tehát a kék nőstényekben is a fotonikus nanoszerkezet megjelenése az, ami a szárny kékségét okozza.

Transzmissziós elektronmikroszkóppal bepillantást nyertünk a pikkelyek belső szerkezetébe. Ehhez 70 nanométer vastag metszeteket készítettünk a fenti három egyed szárnyaiból, és az így nyert szeleteket elektronsugárral átvilágítva képet alkottunk a fedőpikkelyek keresztmetszetéről. A metszeteket a 6. ábrán látható, a pikkelyek teljes hosszán végigfutó gerincekre merőlegesen készítettük. A hűtetlen (7.a ábra) és a hűtött (7.b ábra) hímek fotonikus nanoszerkezetei között nem látható számottevő különbség. A nőstényen (7.c ábra) megjelenő kék pikkelyek szerkezete viszont eltér a hímekétől: kevesebb rétegű és rendezetlenebb fotonikus nanoszerkezet tölti ki a pikkely térfogatát, ennek megfelelően a visszavert szerkezeti színük is eltérő (4. ábra).

7. ábra. A szárnypikkelyek fotonikus nanoszerkezeteinek keresztmetszeti transzmissziós elektronmikroszkópos felvételei: Ikarusz boglárka (a) hűtetlen hím, (b) 22 napig hűtött hím, (c) 20 napig hűtött nőstény. A metszetek a pikkelyek hosszanti gerinceire (6. ábra) merőlegesen készültek.



Következtetések

Az Ikarusz boglárka bábok hosszú idejű hűtésének hatására az imágók szárnyainak felszínén mind a szerkezeti szín, mind a pigment alapú fonákmintázat megváltozott, azonban a különböző színeképzési folyamatok eltérő mértékű és irányú változásokat mutattak. A fonákdal festékanyagokon alapuló mintázatában a hűtési idővel egyenesen arányos rendellenességek jöttek létre: a hűtési idő növelésével a szárnyak egyre nagyobb részén tapasztaltunk megváltozó vagy eltűnő jellegzetességeket. Ezzel szemben a felszín szerkezeti színbeli változásainak karaktere, azaz a hűtési idő hatására megnövekedett színbeli változatossága azt mutatta, hogy a kék szexuális jelzőszín esetében kismértékű és egyedi spektrális változások jelennek meg a bábok tartós hűtésével. Ez kapcsolatban lehet a lepkék rejtett genetikai variációival, amelyeket a környezeti stressz (tartós hűtés) aktivált a vizsgált egyedekben. Az irodalomban beszámolnak hasonló, hőszok okozta megváltozásról, továbbá a 20, illetve 40 napig hűtött nőtények kék színének megjelenése (1.jés 1.1 ábra) is ezt a feltételezést támasztja alá.

A Kárpát-medencében, illetve az elterjedési területük középső részén az Ikarusz boglárka nőtényeinek szárnyfelszínén a barna szín dominál. Viszont a faj elterjedési területének szélein a nőtényekre is a kék szín jellemző, amit a fedőpikkelyeikben kialakuló, a hímekéhez hasonló, szívacszerű fotonikus nanoszerkezet állít elő. Ennek egy lehetséges magyarázata, hogy az elterjedési terület szélén a populáció sűrűsége alacsony, így a megszokott párkeresési stratégia nehezebben valósítható meg. Viszont, ha a nőtények is „felveszik” a fajra jellemző, fajspecifikus szerkezeti szint, akkor a feltűnő, messziről is követhető szexuális jelzőszín használatával genetikai állományuk továbbörökítésének esélyét jelentősen megnövelik.

Összegezve, az Ikarusz boglárka bábállapotban történő, ellenőrzött hűtésével kétféle elváltozást hoztunk létre: (i) A pigmentek által színezett fonákdal mintázat rendellenessége, ami egyenesen arányos a hűtési időtartammal, és kisebb egyedi eltérésektől eltekintve minden példánynál nagyon hasonló jellegű megváltozásokat tapasztaltunk. (ii) A szárnyak felszínén lévő szerkezeti színek megváltozása, amely ugyan kismértékben függött a hűtési időtől, de az egyedi variációk megjelenése sokkal hangsúlyosabb volt. Valószínűsíthető, hogy a bábok tartós hűtésével a faj rejtett genetikai variációit aktiváltuk, amelyek a természetben csak szélsőséges körülmények között, például az elterjedési területük szélein jelennek meg. Érdemes kiemelni, hogy a szexuális jelzőszín stabilitásának – a párválasztásban játszott szerepe miatt – nagyobb a jelentősége a leszármazottak genetikai állományának meghatározásában, mint a rejtőzködésben szerepet játszó pigment alapú mintázatnak.

Irodalom

1. Márk G. I., Bálint Zs., Kertész K., Vértessy Z., Biró L. P.: A biológiai eredetű fotonikus kristályok csodái. *Fizikai Szemle* 57/4 (2007) 116–121.
2. Bálint Zs., Biró L. P.: A lepkék színeváltozása. *Természet Világa* 135/7 (2004) 310–313.
3. Kertész K., Piszter G., Vértessy Z., Biró L. P., Bálint Zs.: Színek harmóniája: a boglárkalepkék szerkezeti kék színének fajfelismerési szerepe – I. rész. *Fizikai Szemle* 63/7–8 (2013) 231–234.
4. Kertész K., Piszter G., Vértessy Z., Biró L. P., Bálint Zs.: Színek harmóniája: a boglárkalepkék szerkezeti kék színének fajfelismerési szerepe – II. rész. *Fizikai Szemle* 63/9 (2013) 293–298.
5. Rajkovits Zs., Illy J.: Az élő természet színei. *Fizikai Szemle* 51/3 (2001) 76–79.
6. Rajkovits Zs.: Szerkezeti színek az élővilágban. *Fizikai Szemle* 57/4 (2007) 121–126.
7. Bálint Zs., Biró L. P.: A lepkésárny kémiai és fizikai színei. *Természet Világa* 140/11 (2009) 486–489.
8. Piszter G., Kertész K., Bálint Zs., Biró L. P.: Variability of the structural coloration in two butterfly species with different prezygotic mating strategies. *PLoS ONE* 11 (2016) e0165857.
9. Kertész K., Piszter G., Horváth Z. E., Bálint Zs., Biró L. P.: Changes in structural and pigmentary colours in response to cold stress in *Polyommatus icarus* butterflies. *Scientific Reports* 7 (2017) 1118.

Jobb egy mentőötlet mint öt mentő egylet

– írta Karinthy Frigyes az egyletistápolás margójára.

**Most Társulatunknak lenne szüksége
egyletmentő ötletekre!**



**Ezek az ötletek nem vesznek el,
ha a <http://forum.elft.hu>
linken, az ELFT stratégiai vitafórumán adjuk elő.**



ALACSONY HÁTTÉRŰ MAGFIZIKAI MÉRÉSEK, AVAGY A NUKLEÁRIS ASZTROFIZIKA KIHÍVÁSAI

Szücs Tamás

MTA Atommagkutató Intézet és

Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Németország

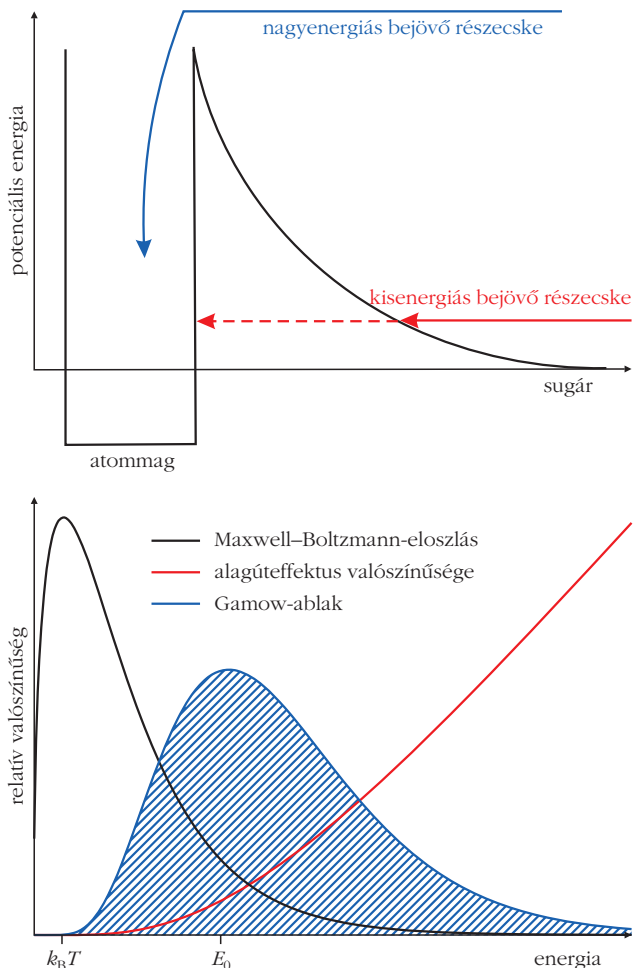
Világegyetemünk anyagának legnagyobb (98,5%-nyi) része még mindig az ősrobbanás kori nukleosintézis során keletkezett hidrogén és hélium. A legtöbb egyéb elem magreakciók útján, a csillagok különböző fejlődési szakaszaiban jött létre [1]. A könnyebb elemek fúziója egészen a vas csoportig képes felépíteni a kémiai elemeket, miközben a reakciókban energia szabadul fel [2]. Ezen energia kisugárzása tartja egyensúlyban a csillagokat a gravitációval szemben. A vasnál nehezebb elemek létrehozásához már energia-befektetés szükséges. A csillagok statikus fázisában is előfordulhatnak ilyen endoterm reakciók, például az s-folyamat, de a csillagélet végi robbanásban is számottevő nehezebb elem keletkezik az r- és p-folyamatokban [3–5]. A periódusos rendszer egészen a Földön megtalálható legnehezebb természetes elemig, az uránig népesül be. A nehéz elemek hasításával kinyerhetjük az azokat létrehozó robbanás energiájának egy részét.

A nukleáris asztrofizika egyik fő feladata az elemeket felépítő magreakciók pontos megismerése. Ezek fontosak mind a csillagok életének és a Világegyetem fejlődésének megértéséhez, mind a világunkat alkotó elemek létrejöttének feltérképezéséhez.

Magreakciók a csillagokban

A csillagokban lejátszódó magreakciók magfizikai értelemben meglepően alacsony hőmérsékleten zajlanak. A hőmozgást végző részecskék átlagos energiája a néhány tízmilliótól néhány milliárd kelvin hőmérsékleteken 1–100 keV.¹ A magfizikai energiaskálát a részecskék tipikus kötési energiája jelöli ki, ami a hőmozgásnál nagyságrendekkel magasabb 1–10 MeV-es energiatartomány.

Töltött részecskék közötti reakció esetén az elektrosztatikus tasztítás is nagy szerephez jut, mivel a fuzionáló atommagok mindegyike pozitív töltéssel bír. A Coulomb-tasztításnál erősebb magerők csak rövid



1. ábra. A magpotenciál és a Coulomb-potenciál összegeként az atommag határán egy potenciálgát képződik. Ez nehezíti a fúzió létrejöttét (fölül). A csillagokban található részecskék sebességeloszlásából és a hatáskeresztmetszet szorzatából kialakuló Gamow-ablak, ami az asztrofizikailag jelentős energiatartomány (alul).

hatótávolságúak, a fúzió létrejöttéhez az atommagoknak kellő közelségbe kell kerülniük. Az úgynevezett magpotenciálon kívül csak a tasztítás érvényesül. A fúzió létrejöttéhez a magoknak át kell jutniuk a vonzó és tasztító potenciálból kialakuló Coulomb-gáton (1. ábra, fölül).

A gát magassága egyenesen arányos a résztvevő magok töltésével, két proton esetén értéke körülbelül 600 keV. Visszatérve a csillagokban uralkodó hőmérsékletekre, látható, hogy az asztrofizikailag jelentős magreakciók mélyen a Coulomb-gát alatt zajla-



Szücs Tamás 2008-ban szerzett fizikus és fizikatanári diplomát az ELTE-n. 2012-ben a Debreceni Egyetemen védte meg PhD disszertációját alacsony hatáskeresztmetszetek mérési módszereiből. Két évet töltött kutatóként a drezdai HZDR kutatóintézetben, ott egy új föld alatti gyorsítólaboratórium kialakításában vállalt meghatározó szerepet, és ahol idén vezetésével megkezdődnek az első kísérletek az új föld alatti gyorsítólaboratóriumban. 2016–2018-ig MTA posztdoktori ösztöndíjas az MTA Atomkiban.

¹ 1 eV az az energia, amire egy elemi töltés szert tesz 1 V gyorsító feszültség hatására ($1,6 \cdot 10^{-19}$ J).

nak, a kvantummechanikai alagúteffektus nélkül létre sem jönnének, tehát a Nap sugárzása az alagúteffektus egyik közvetett bizonyítéka. A reakciók hatáskeresztmetszete² az alagúteffektus valószínűségével arányos, így a csökkenő energiával exponenciálisan csökken.

Az asztrofizikában fontos mennyiség a reakciósebesség vagy reakcióráta, ami az egységnyi idő alatt lejátszódó magreakciók száma. Ez a mennyiség arányos a sebességre átlagolt hatáskeresztmetszettel. A csillagokban a részecskék sebességeloszlása Maxwell-Boltzmann-eloszlást követ, amit az exponenciálisan csökkenő hatáskeresztmetszettel kell átlagolni. A ketto szorzata egy jól meghatározott energiatartományt jelöl ki, az úgynevezett Gamow-ablakot (1. ábra, alul). Ez az az energiatartomány, ahol a hatáskeresztmetszet ismerete szükséges a csillagbeli reakcióráta számolásához. A Napunkban például a két proton fúziója esetében a Gamow-ablak középpontja körülbelül 5,9 keV, ami két nagyságrenddel van a Coulomb-gát alatt.

A csillagok statikus fázisaiban ez az arány hasonlóan alakul. A Gamow-ablak energiája hiába növekszik a magasabb hőmérséklettel és tömegszámmal, a Coulomb-gát a reakciópartnerek rendszámának növekedésével szintén nő. Mindez nagyon alacsony hatáskeresztmetszeteket jelent nano- és pikobarn nagyságrendben, míg a tipikus magfizikai hatáskeresztmetszetek millibarn és barn között vannak. A nukleáris asztrofizika nagy kihívása éppen ezen nagyon kis hatáskeresztmetszetek meghatározása, a nagyon apró jelintenzitások mérése.

Magreakciók a laboratóriumban

E cikkben elsősorban a kisebb tömegű magok fúziós reakcióinak vizsgálatával foglalkozom, proton-, illetve alfa-befogási reakciókról lesz szó. A magreakciók létrehozásához részecskegyorsítókat használunk. A laboratóriumbeli reakcióráta a céltárgy atommagjainak száma szorozva a bombázó részecskék áramával és a hatáskeresztmetszettel. Tipikus kísérleti körülmények között ez maximum pár reakció óránként, de sok esetben ennél is jóval kevesebb. Nukleáris asztrofizikai kutatásokban – az alacsony hatáskeresztmetszetek miatt – nem a gyorsító maximális energiája szab határt a kísérleteknek, hiszen már sokszor a néhány MeV reakcióenergia is a Gamow-ablak felett van. Sokkal fontosabb a stabil, nagy áramú nyaláb és a stabil céltárgy. A gyorsítótechnika fejlődésével manapság akár néhány milliampères proton- vagy alfa-nyaláb is előállítható, a következő kihívás olyan céltárgyak előállítása, amelyek ezt a nyalábintenzitást károsodás nélkül bírják ki. Napjainkban – a céltárgy tönkretétele

nélkül – maximálisan néhány 100 μA -es nyalábokat tudunk használni. A másik maximalizálandó paraméter a céltárgymagok száma. Az ionnyaláb fékeződik a céltárgyban, annak mélyén már más energiával lép reakcióba, mint a felszínen. Mivel a hatáskeresztmetszet az általunk használt energiákon exponenciálisan csökken, a mélyebb rétegekben már nem történik számottevő mennyiségű reakció. Így az úgynevezett effektív céltárgymagszám vastagabb céltárgy esetén sem változik.

Miután a nyalábamot és az effektív céltárgymagok számát maximalizáltuk, megbecsülhetjük, mi az a legkisebb hatáskeresztmetszet, amit mérhetünk. Ha a reakció hatáskeresztmetszete a Gamow-ablakban mérhetetlen, akkor extrapolációt kell alkalmaznunk. Az extrapoláció annál pontosabb, minél inkább megközelítjük a releváns energiatartományt, tehát a legkisebb, még mérhető jelintenzitásokat kell elérnünk.

A hatáskeresztmetszet mérése

A magreakciók létrejöttét legtöbbször a keletkezett reakciótermék által kibocsátott részecske vagy gamma-sugárzás detektálásával határozzuk meg. Írásomban csak gamma-detektálással foglalkozom nagytisztaságú germánium (HPGe) detektorokkal. Ezen belül is az úgynevezett promptgamma-módszerrel, ahol a reakcióban keletkezett, többnyire magasan gerjesztett végmag legerjesztődése közben kibocsátott gamma-sugárzást detektáljuk.

Egy adott átmenetből származó gamma-sugárzás jól meghatározott energiájú, így az egy csúcsot alkot a spektrumban. E csúcs területe arányos a kibocsátott gamma-sugarak számával, így a reakció-hatáskeresztmetszettel is.

A gamma-sugárzás kibocsátása statisztikus folyamat, így a csúcsterület beütésszáma Poisson-eloszlást követ, bizonytalansága az értékének négyzetgyöke. Ebből következik, hogy alacsony beütésszámból csak nagy bizonytalansággal következtethetünk a hatáskeresztmetszetre. A mai precíziós asztrofizikai mérések mellett, egy-egy csillagfejlődési fázis pontos ismeretéhez a magfizikai reakcióráta nagy pontosságú ismerete szükséges, amihez egy-egy hatáskeresztmetszetet legfeljebb 10%-os teljes bizonytalansággal kell ismerni. Minden kísérlet szisztematikus hibákkal is terhelt, így többnyire néhány százalékos statisztikus bizonytalanságot kell elérnünk. A példa kedvéért, ha 3%-os bizonytalansággal szeretnénk mérni 1 nanobarn hatáskeresztmetszetet, tipikus kísérleti körülmények között óránként várhatunk egy beütést.³ A szükséges 1111 beütéshez 1,5 hónap nyalábidőre van szükség. Ez alatt az idő alatt mind a detektoroknak, mind a gyorsítónak stabilan kell működni, és a céltárgyunknak is ki kell bírnia az ionbombázást. A helyzet még rosszabb, ha a detekto-

² A hatáskeresztmetszetet szokásosan σ -val jelöljük. A reakció lezajlási valószínűségével arányos, felület dimenziójú mennyiség, általánosan használt mértékegysége a barn, ami 10^{-24} cm^2 -rel egyenlő.

³ $\sigma = 1^{-33}$ cm^2 ; effektív céltárgymagszám: 10^{18} $1/\text{cm}^2$; bombázórészecske-fluxus: $10^{17}/\text{h}$; 1% detektálási határfok.

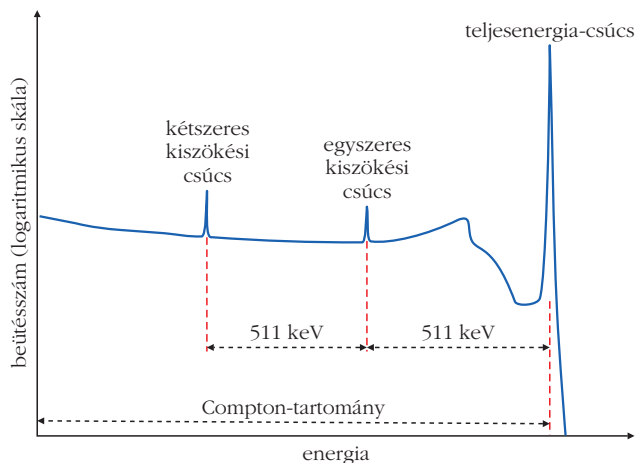
runkban nem csak a kívánt reakcióból származnak beütések, hanem a spektrumcsúcs alatt háttérbeütések is találhatóak. Ilyenkor a csúcsterület bizonytalansága a háttér beütésszámától is függ, megnövelve ezzel a kívánt statisztikus bizonytalanság eléréséhez szükséges időt. Ha a jel mellett feleannyi háttérbeütés is van, akkor a mérési idő körülbelül duplájára növekszik.

A csúcs alatti háttér általában elkerülhetetlen, ez részben egyszerűen a detektorok fizikájának következménye. Ha csak egyféle energiájú gamma-sugárzás érkezik, akkor sem csak egy csúcsot látunk a spektrumban, hanem kisebb energiájú beütéseket is (2. ábra). Ez a Compton-tartomány, amelynek beütései akkor keletkeznek, ha a sugárzás kiszóródik a detektor aktív térfogatából, és nem adja le a teljes energiáját. Ha már két gamma-sugarunk van, akkor tipikusan az egyik a másik által keltett Compton-tartományon ül, így alatta háttérbeütések vannak. Ezen kívül az úgynevezett kiszökési csúcsok is gondot okozhatnak, ha energiájuk pont megegyezik a vizsgálni kívánt gamma-sugárzás energiájával.

A HPGe detektorok előnye a nagyon jó energiafeloldás. A gamma-átmenetek energiája pontosan meghatározható, illetve a különböző gamma-sugárzások jól elkülöníthetők. Ez sokszor fontos, mert a reakciótermék általában több egymást követő gamma-átmenettel gerjesztődik le, így számos, különböző energiájú gamma-sugárzást kell detektálnunk. Hátránya a viszonylag alacsony detektálási hatásfok, ami tipikus kísérleti elrendezésben 0,1–1%.

A detektorokban észlelt háttér

A detektor nemcsak az általunk keltett magreakcióban keletkezett gamma-sugárzást észleli, hanem a természetben, a környezetünkben előforduló radioaktív bomlások gamma-sugarait is. Ezek a mindenhol jelen lévő sugárzások nehezítik méréseinket, mert háttérrel okoznak a detektorban. A problémát általán-



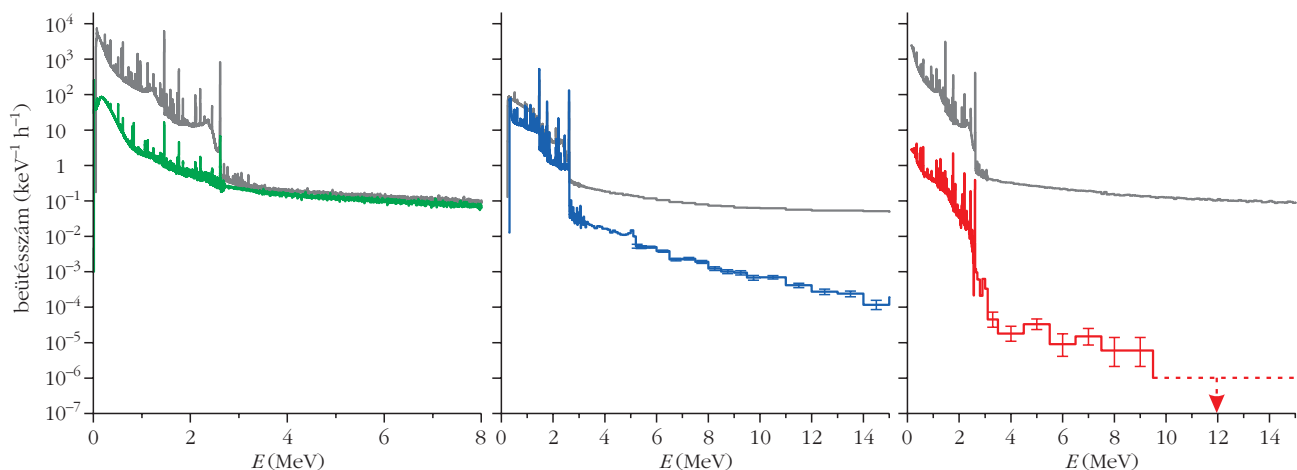
2. ábra. Egy nagy tisztaságú germániumdetektorban látható tipikus jel, adott energiájú gamma-sugárzás esetén.

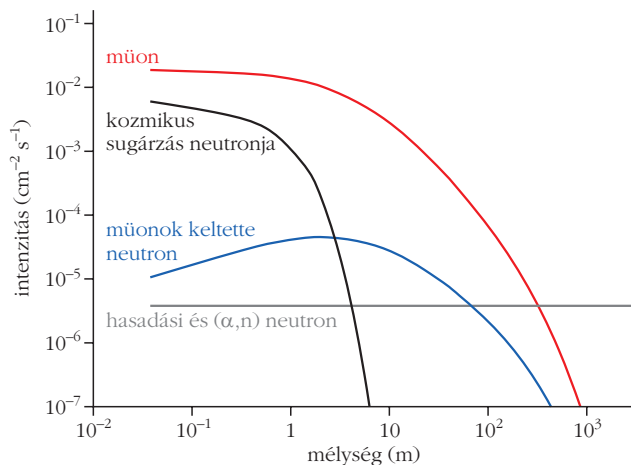
ban nem a laboratóriumi háttér csúcsai adják – hiszen azok tipikusan elválaszthatók a reakció gamma-csúcsaitól –, hanem a sok összeadódó Compton-tartomány, amin a mérendő jelek ülnek. Ha túl nagy a háttér, a jel mérhetetlen. A környezeti radioaktivitás maximum 3 MeV-ig ad jeleket a detektorban, de ennél magasabb energiákon is észlel háttérrel a detektor (3. ábra). Magasabb energiákon már nincsenek csúcsok, csak az energiával alig változó, közel állandó beütésszám, amit a kozmikus háttér sugárzás okoz. A felső légkörbe belépő kozmikus töltött részecskék többek között müonokat keltenek, amelyek elérik a földfelszínt. Ezek a töltött részecskék a detektoron keresztülhaladva keltik a nagyenergiás jeleket egészen akár 40–50 MeV-ig.

A kísérletek szempontjából lényeges háttértartomány 15 MeV-ig tart. A releváns reakciókban általában maximum ekkora energiájú gamma-sugárzást keltünk és detektálunk.

Különböző eredetük miatt különbözőképpen kell kezelniük a két jól elválasztható háttértartományt. E cikkben kisenergiás háttérrel 3 MeV alatt, nagyenergiás háttérrel 3 MeV feletti jelek esetén beszélek.

3. ábra. Különböző árnyékolások hatása különböző HPGe detektorokban észlelt laboratóriumi háttérre. A szürke spektrum mindig az árnyékolás nélküli háttérrel mutatja. Balra 10 cm ólomárnyékolás, középen aktív árnyékolás, jobbra mély föld alatti elhelyezés és 25 cm ólomárnyékolás hatása a laboratóriumi háttérre.





4. ábra. A kozmikus sugárzás különböző komponenseinek mélységfüggése szikla esetén. A vízszintes vonallal jelzett neutronkomponens a laboratórium falait alkotó anyagokból származik, emiatt szintje különböző helyszíneken más és más. Itt egy tipikus értéket ábrázolok, annak jelzésére, milyen mélységtől nem csökken tovább a neutronhátér.

A detektor feloldása, azaz a gamma-csúcsok félértékszélessége az energia négyzetgyökével arányosan nő. Ha meg akarjuk becsülni a csúcs alatti háttérbeütések számát, akkor a 3. ábra számait a csúcsok talpszélességével kell megszoroznunk. Így árnyékolás nélkül a nagyenergiás háttér 1-2 beütés óránként, míg a kisenergiás háttérben 10-1000 beütést várhatunk ugyanennyi idő alatt.

Ezeket a háttéreket mindenképpen csökkentenünk kell, ha a nukleáris asztrofizika nagyon kis jelintenzitásokat akarjuk mérni.

A laboratóriumi háttér csökkentésének módszerei

A háttér csökkentésének legegyszerűbb és széles körben alkalmazott módszere, a passzív árnyékolás (3. ábrán balra). Ilyenkor a detektort tipikusan ólomárnyékolással vesszük körbe. A detektorba jutó 3 MeV alatti gamma-sugarak mennyiségét 10 cm vastag ólomfal körülbelül századára csökkenti. A nagyenergiás müonok viszont gond nélkül keresztülhaladnak ezen árnyékoláson, így a 3 MeV feletti háttér az alig csökken. Ráadásul a müonok fékezési sugárzást és másodlagos részecskéket keltenek a passzív árnyékolásban, ami a detektorba jutva a laboratóriumi háttér növeli. Ezen másodlagos sugárzás miatt a földfelszínen nincs értelme 10-15 cm-nél vastagabb ólomárnyékolásnak, a vastagabb árnyékolás nem csökkenti tovább a háttér.

A müonok ellen hatékonyabb védekezés az úgynevezett aktív árnyékolás (3. ábrán középen). Ekkor a kísérletet végző detektort egy másik is kíséri. A másodlagos detektor körbeveheti az elsőt, esetleg egyszerűen alatta vagy felette helyezkedik el. Ilyenkor a keresztülhaladó müon mindkét detektorban jelet kelt. A másodlagos detektor jeleit vétóként felhasználva, az elsődleges detektor müonjelei kiszűrhetők. Egy gyű-

rűs elrendezés tipikusan egy-két nagyságrenddel csökkenti a nagyenergiás háttér, és másodlagos effektusként a Compton-tartományt is.

A kettő kombinálása nehézkes, ezért tipikusan vagy az egyiket vagy a másikat alkalmazzuk, attól függően, hogy milyen gamma-energia-tartományban várjuk jeleinket.

A nagyenergiás müonok nagy áthatoló képességek, emiatt az általunk felépített passzív árnyékolás alig csökkenti intenzitásukat. Viszont nem feltétlenül nekünk kell árnyékolást építenünk, hanem megvizsgálhatjuk, mi történik, ha a kísérleteinket a föld alatt végezzük így nyerve árnyékolást.

A 4. ábrán a detektorok nagyenergiás háttéréhez hozzájáruló események intenzitásának mélységfüggése látható. Ami szembetűnő, hogy még 300 méter mélyen is a müonok alkotják a legfőbb háttérkomponenst, igaz intenzitásuk már ötezred részre csökkent. Fontos észben tartanunk, hogy a kísérletekhez gyorsító szükséges, így nem elég csak a detektort föld alá vinnünk, hanem a gyorsítót is oda kell telepítenünk. Természetesen létezik gyorsító által keltett, úgynevezett nyalábindukált háttér is, de annak kezelési technikáira helyhiány miatt ez az írás nem tér ki.

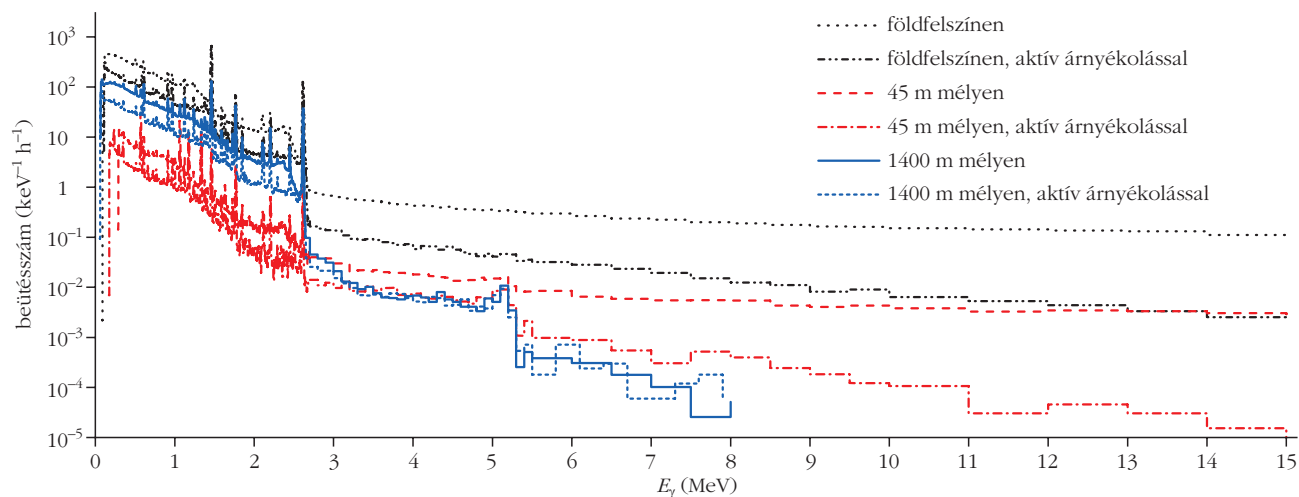
Ha még mélyebbre megyünk, a csökkenés nem áll meg, és 1400 m mélyre már csak a felszíni müonfluxus milliomod része jut le. Ez az a mélység, ahova a világon először nukleáris asztrofizikai célra gyorsítót telepítettek (Gran Sasso Nemzeti Laboratórium, Olaszország). Itt a LUNA (Laboratory for Underground Nuclear Astrophysics) kollaboráció immár 25 éve az élen jár a nagyon apró jelintenzitások mérésében.

Az elhanyagolhatóvá váló kozmikus sugárzás direkt hatásának kiküszöbölése mellett a másodlagos sugárzás keltése is lecsökken, ezáltal a detektort vastagabb passzív árnyékolással lehet körülvenni, így a 3 MeV alatti háttértartomány is jobban csökkenthető.

A 3. ábrán jobbra nagyon jól látszik, hogy a 3 MeV alatti háttértartományban három nagyságrend a csökkenés, míg a nagyenergiás háttér akár tízezred részére is csökken, sőt 10 MeV feletti háttérmentes tartomány látható. Ezen ultra alacsony háttérnek köszönhetően a LUNA kollaboráció számos magreakció hatáskeresztmetszetét mérte meg a reakciók Gamow-ablakában.

Többek között a ${}^3\text{He}(\alpha,\gamma){}^7\text{Be}$ reakció vált mérhetővé az ősrobbanás kori nukleosintézis energiáin, amivel kizárhatóvá vált a primordiális lítiumprobléma magfizikai megoldása. A 93 keV-os reakcióenergián a 0,2 nb hatáskeresztmetszetet körülbelül egy hónap nyalábidő alatt mérték meg.

Később, a ${}^{14}\text{N}(p,\gamma){}^{15}\text{O}$ magreakció hatáskeresztmetszetének minden eddiginél alacsonyabb energiákon való mérésével, a korábbi extrapolációk pontosodtak, és a csillagokbeli becsült reakcióráta a korábbiak felének adódott. A CNO ciklus ezen leglassabb reakciója határozza meg a ciklus hosszát, így a nehezebb csillagok hidrogénégető fázisának életidejét. A ráta csökkenéséből egyenesen következik a gömbhalmazok életkorának növekedése.



5. ábra. Földfelszínen, kis mélységben és mélyen a föld alatt ugyanazon detektor a laboratóriumi háttérre aktív árnyékolással és anélkül. 45 m mélyen aktív árnyékolással elért nagyenergiás háttér csak kevéssel több, mint mélyen a föld alatt.

A LUNA kollaboráció ezeken kívül a hidrogénfúzió számos magreakciójának paraméterét mérte meg korábban elképzelhetetlenül alacsony energiákon, sokat pontosítva a különböző csillagfázisok megértésén. Legutóbbi összefoglaló közleménynek lásd [6].

Újabb lehetőségek

A LUNA együttműködés nagy sikerének köszönhetően számos újabb helyszín merült fel föld alatti gyorsítók telepítéséhez. Ennek létrejöttét a tudományos közösség több okból is sürgeti. Egyrészt a LUNA jelenlegi 400 kV terminálfeszültségű gyorsítója nem tud elegendő energiájú nyalábot szolgáltatni a héliumfúzió reakcióinak megfelelő energiatartományban való vizsgálatához, amelyekhez pár MV-os gyorsítás szükséges. Másrészt – az egy-egy kísérletre fordítandó 2-3 éves mérési időszak miatt –, ha párhuzamosan több vizsgálatot tudnánk végezni, lecsökkenthetnénk az egy-egy fontos reakció pontosításához szükséges időt.

A világban számos mély föld alatti helyszín van, viszont ezek nagy többsége nehezen megközelíthető, emiatt egy gyorsítólaboratórium kialakítása nehézkes. Ezért merült fel, hogy ha mélyen a föld alá nem mehetünk, akkor aktívan árnyékolt detektorral próbáljunk megfelelő háttérrel elérni, hiszen – mint azt korábban láthattuk – aktív árnyékolással a földfelszínen már egy-két nagyságrendet csökkenteni tudtunk a nagyenergiás háttérből.

Először az Atomki aktív árnyékolással rendelkező detektorát vittük a mélyen föld alatti LUNA laboratóriumba. A mérések a várt eredményt hozták. Ahol már elhanyagolható a müonok mennyisége, az aktív árnyékolás nem csökkent tovább a nagyenergiás háttérrel [7].

Következő állomásunk egy kis mélységű pince-rendszer, a drezdai Felsenkeller volt. A kilenc alagútból az egyikben már elhelyezkedik egy föld alatti alacsony háttérű laboratórium, ahol kis aktivitású mintákat mérnek. Ide vittük el ugyanazt az aktívan árnyé-

kolt detektort, amivel korábban a LUNA-ban mértünk. A 45 m mély szikla önmagában 40-ed részére csökkenti a müonháttérrel, és közben elhanyagolhatóvá válik a kozmikus sugárzás neutronkomponense (4. ábra). Így árnyékolatlan detektorban, 3 MeV feletti energiatartományban a háttér kicsivel alacsonyabb, mint aktívan árnyékolva a földfelszínen. Az aktív árnyékolás a mérések alapján hasonló mértékben csökkenti a háttérrel, mint a földfelszínen. Végeredményben az aktív árnyékolásnak köszönhetően a háttérviszonyok már alig különböztek a mélyen föld alatt tapasztalhatóktól [8, 9] és 5. ábra.

Ez a felismerés megnyitotta az utat, hogy kis mélységű föld alatti helyszínek is bekerülhessenek a nukleáris asztrofizikai célra használható gyorsítók telepítési helyeinek sorába.

Az elmúlt évek folyamán a Felsenkeller pince-rendszerében kialakításra került egy gyorsítólaboratórium, amelybe 2017 nyarán egy 5 MV-os Pelletron gyorsítót telepítettünk [10]. A laboratórium kialakítása végső szakaszába ért és 2018-tól üzemelni fog. A nagyobb gyorsítópotenciálnak köszönhetően a héliumfúzió reakciói is vizsgálhatóvá válnak. Elsőként a ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$ reakció hatáskeresztmetszetét tervezük mérni széles energiatartományban, ezt követően a nukleáris asztrofizika „szent Gráljának” nevezett ${}^{12}\text{C}(\alpha, \gamma){}^{16}\text{O}$ reakció hatáskeresztmetszetének mérése kerülhet sorra.

Irodalom

1. Fülöp Zs., Gyürky Gy.: *Az elemek születése. Szemelvények a nukleáris tudomány történetéből*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 2009.
2. Gyürky Gy., *Fizikai Szemle* 61 (2011) 37.
3. Kiss G. Gy., *Fizikai Szemle* 67 (2017) 7.
4. Gyürky Gy., *Fizikai Szemle* 60 (2010) 37.
5. Kiss G. Gy., *Fizikai Szemle* 67 (2017) 163.
6. Brogini C. és mtsai, *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* 60 (2010) 53.
7. Szűcs T. és mtsai, *Eur. Phys. Jour. A* 44 (2010) 513.
8. Szűcs T. és mtsai, *Eur. Phys. Jour. A* 48 (2012) 8. <http://dx.doi.org/10.1140/epja/i2012-12008-7> (open-access)
9. Szűcs T., *PhD Disszertáció* (2012), <http://hdl.handle.net/2437/129191>
10. <https://www.hzdr.de/felsenkeller>

A CSILLAGKELETKEZÉS VIZSGÁLATA ÚJ INTERFEROMETRIKUS MŰSZEREKKEL

Kóspál Ágnes, Ábrahám Péter, Varga József
MTA CSFK KTM CSI

A Nap típusú csillagok keletkezése

Galaxisunkban a csillagok közötti teret porból és gázból álló diffúz anyag tölti ki. Ennek egy része sűrű csillagközi felhőket alkot, amelyekben a hideg gáz molekuláris állapotú. A molekulafelhőkben a gáznyomás és a tömegvonzás egyensúlya könnyen felborulhat, akár a felhők összeütközése, akár egy szupernóva-robbanás által keltett lökeshullám következtében. Ilyenkor a gáz termikus nyomása, a mágneses mező és a turbulens mozgások nem tudnak ellenállni a gravitációnak, és a felhő egyes részei összeomolhatnak.

Egy ilyen összehúzódó, de csillagot még nem tartalmazó felhőmag kezdetben lassan forog, és mivel a felszabaduló gravitációs energiát teljes mértékben kisugározza, hőmérséklete 10 K körüli értéken marad.

A Magyar Tudományos Akadémia 189. közgyűlése kapcsán megrendezett *A fizika fejlődési irányai* című tudományos ülésen elhangzott előadás szerkesztett és kibővített változata.



Kóspál Ágnes asztrofizikus, hat évet töltött a Leideni Observatóriumban és az Európai Űrügynökségnél, jelenleg az MTA CSFK Csillagászati Intézetében – az Európai Kutatási Tanács 1,3 millió eurós támogatásával – vezeti kutatócsoportját. A legnagyobb földi és űrtávcsövekkel vizsgálja a Naphoz hasonló csillagok és bolygórendszerek keletkezését. Több, mint félszáz cikkben publikált eredményei elismeréseként nyerte a L'Oréal–UNESCO Nemzetközileg Kiemelkedő Tehetségek díját Párizsban.



Ábrahám Péter fizikus és csillagász, az MTA CSFK Csillagászati Intézet tudományos tanácsadója, 2010–15 között igazgatója. Kutatási területe a csillagok keletkezése, a fiatal csillagok körüli korongok szerkezete, a csillagok fényváltozásai. Megfigyeléseihez rendszeresen használ nagy térbeli felbontású, gyakran infravörös hullámhosszakon működő földi vagy űrműszereket. Magyarországi vezetője annak az EU technológiai programnak, amely a MATISSE fejlesztésében is részt vállalt.



Varga József az ELTE-n szerezte doktori fokozatát 2015-ben, galaxisok nagyskálás szerkezetének elemzésével. Azóta az MTA CSFK Csillagászati Intézetében dolgozik posztdoktori kutatóként, ahol fiatal csillagközi korongok szerkezetét vizsgálja a VLTI infravörös interferometrikus műszereivel. Egy nemzetközi csapat tagjaként részt vesz a VLTI új műszere, a MATISSE beüzemelésében és tesztelésében.

Amikor a felhőmag közepe elég sűrűvé válik, a megnövekedett nyomás megállítja az összeomlást, és a középpontban kialakul a protocsillag. A protocsillagok már ionizált hidrogént tartalmaznak, tömegük néhány tized naptömeg, méretük néhány napsugár. A gravitációs összeomlás kezdete után körülbelül tízezer évvel alakulnak ki.

A kezdeti felhőmag nullától különböző perdülete miatt az anyag nem eshet közvetlenül a protocsillag felszínére, hanem egy lapult, korongszerű struktúrát alkot. Ezen csillagközi korongok mérete hasonló a mi bolygórendszerünkéhez, tipikusan néhány száz csillagászati egység (CSE, az átlagos Nap–Föld-távolság, vagyis 150 millió km) alatti, és bennük az anyag lassan befelé spirálozik, majd végül a csillagra hullik. Ekkor a protocsillag és a korong még mélyen beágyazódik a környező anyagburokba, amelynek a kiterjedése akár több ezer CSE is lehet. A korongból a csillagra hulló anyag egy része bipoláris kifújás formájában távozik a rendszerből. Ennek során az anyag a protocsillag pólusaitól áramlik kifelé, és elkezd elfújni a burkot. Ez a gravitációs összeomlás kezdete után körülbelül százezer évvel történik meg.

Ha az elfogyó burok már nem képes pótolni a korong anyagát, a csillag tömegbefogási rátája egyre csökken. A korongot ekkor már főleg a csillag megvilágítása fűti, és megindulhat benne a porszemcsék összetapadása, növekedése. Végül, néhány millió év alatt a korong gáz- és portartalmának nagy része teljesen szétoszlik, vagy nagyobb testekké, planetezimálokká és bolygókká áll össze. Mindezen fázisok konkrét csillagászati felvételeken is láthatók (*1. ábra*).

Az itt felvázolt folyamattal kapcsolatban még számos nyitott kérdés van. Amíg az apró porszemcsékből bolygók lesznek, méretük 13, tömegük 40 nagyságrenddel nő. Közben – a mérettől függően – különböző fizikai folyamatok lesznek a meghatározók a növekedésben. Úgy gondoljuk, hogy a Földhöz hasonló kőzetbolygók a korong legbelső részén, míg az óriás gázbolygók valamivel távolabb, a víz fagyáspontjának megfelelő sugáron túl keletkeznek. Ennek ellenére a megfigyelt exobolygórendszerekben gyakran látunk gázóriásokat a csillag közvetlen közelében, ami a korongon belüli vándorlásra, bolygómigrációra utal.

A nagybolygók hatással vannak a korong szerkezetére és sűrűségeloszlására is, meghatározva, hogy a maradék porból hol alakulhatnak ki kisebb égitestek, aszteroidák, üstökösök. Kiemelten fontos kérdés a korong ásványi és kémiai összetétele is: mennyi víz, mennyi szerves molekula van jelen már a legkorábbi fázisokban, és ezek hogyan kerülhetnek

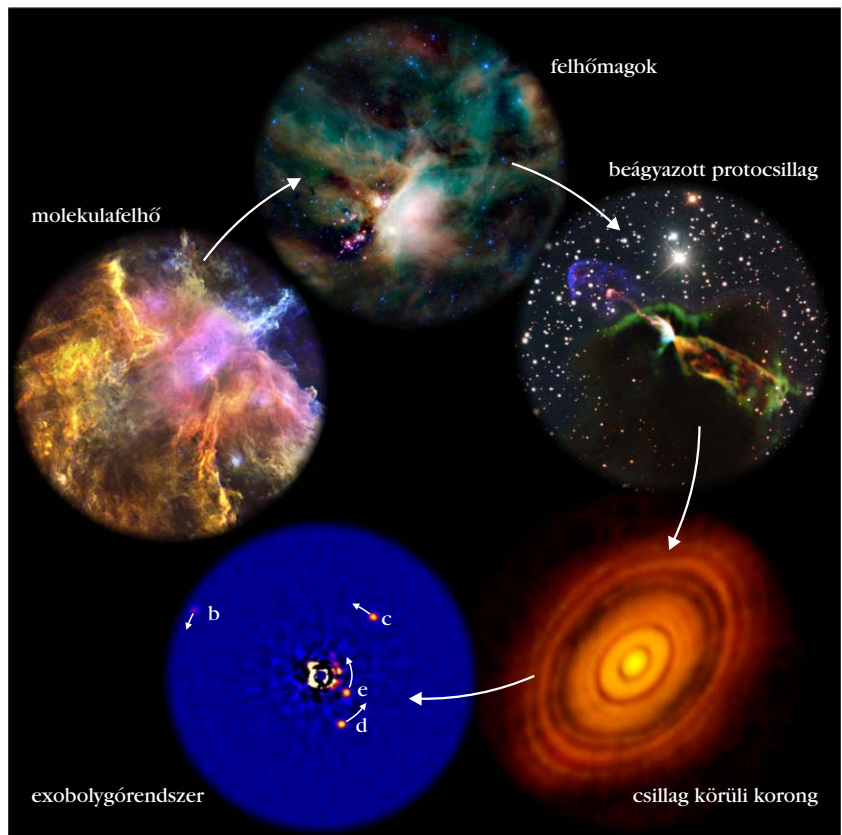
a bolygók építőanyagába? Az élet kialakulásához legkedvezőbb feltételek a korong mely részein jöhetnek létre? A nagy számú megfigyelt exobolygórendszer meglepően változatos. Lehet, hogy e sokszínűség eredete a korongok változatosságában rejlik? Ezek a kérdések a 21. századi asztrofizika legfontosabb kérdései közé tartoznak, megválaszolásuk pedig a legmodernebb, legnagyobb teljesítményű műszerek használatát igényli.

Nagy szögfelbontású észleléstechnika

A Naphoz hasonló csillagok keletkezéséről itt felvázolt forгатókönyv nagy része olyan, a Naprendszer szomszédságában található csillagkeletkezési területek tanulmányozásából származik, mint az Orion, Taurus, Perseus, Cepheus, Aquila, Serpens, Ophiuchus, Scorpius, Lupus és a Chamaeleon. Ezek a területek egy körülbelül 3000 fényév átmérőjű, fiatal csillagokból és óriás molekulafelhőkből álló gyűrű, a Gould-öv részei. A hozzánk legközelebbi csillagkeletkezési területek 500 fényévre találhatók. Ilyen távolságban egy tipikus csillag körüli korong látszó mérete 1 ívmásodperc ($1''$, ekkorának látszana egy golflabda 9 km-ről, vagy ekkora a telihold átmérőjének 1800-ad része).

Ha tehát a korongokban bármiféle szerkezeti részletet szeretnénk megfigyelni, olyan képeket kell készítenünk, amelyek felbontása tized ívmásodperc, vagy még annál is jobb. Ráadásul a korong hőmérséklet-eloszlása sem egyenletes: belső része forróbb, így a Wien-féle eltolódási törvénynek megfelelően inkább a közeli és középínfravörös tartományban sugároz, míg a külső, hidegebb részt elsősorban távoli infravörös és milliméteres hullámhosszakon lehet megfigyelni. A különböző hullámhosszon történő megfigyelések elengedhetetlenek ahhoz, hogy egy fiatal csillagról és környezetéről teljes képet kapjunk.

A csillagászati műszerek által még éppen felbontható részletek mérete ideális esetben (ha a légköri turbulencia zavaró hatását elhanyagoljuk) fordítottan arányos a távcsőtükör vagy antenna D átmérőjével és egyenesen arányos az észlelt fény λ hullámhosszával, tehát a szögfelbontás $\theta = k\lambda/D$, ahol $k = 70$, ha θ -t fokban mérjük. Látható tartományban 1,3 méteres távcsőtükör kell a $0,1''$ felbontáshoz, az infravörös tartományban – például 10 μm -en – már 25 méteres tükörátmérő szükséges. A milliméteres tartományban több km-es, a rádiótartományban pedig több száz km átmérőjű rádióantennákra lenne

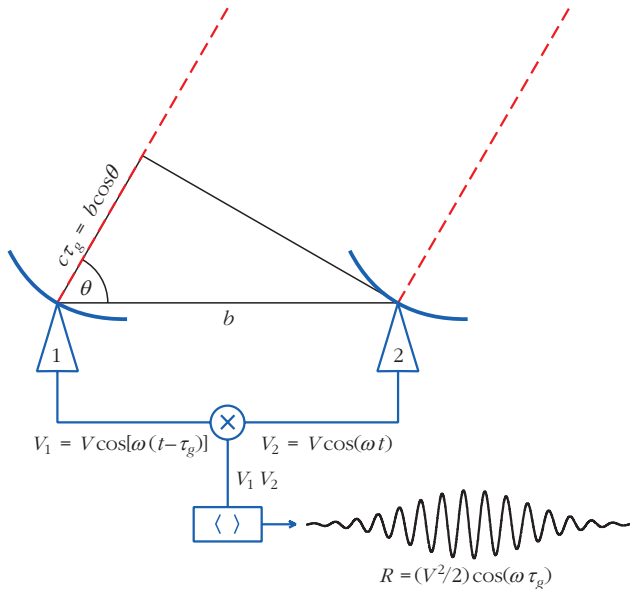


1. ábra. A csillag- és bolygókeletkezés főbb fázisai. Forrás: ESA/Herschel/PACS, SPIRE/N. Schneider, Ph. André, V. Könyves (CEA Saclay, France), Gould Belt survey Key Programme, NASA/JPL-Caltech/WISE Team, ESO/ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)/H. Arce, B. Reipurth, ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), NRC-HIA, C. Marois, Keck Observatory.

szükség. Ilyen óriástávcsöveket és óriásantennákat technikailag lehetetlen megépíteni, a költségekről nem is beszélve.

Gazdaságos és megvalósítható óriástávcsövet tehát úgy lehet készíteni, ha nem a teljes távcsövet, hanem csak egyes kisebb részeit építjük meg, és azokat összehangoltan használjuk. Ezen az ötleten alapul az interferometrikus technika, amelynek keretében távoli teleszkópokat irányítanak ugyanarra az égi objektumra, és a távcsövek jeleit interferáltatják. Egy ilyen rendszer esetében a felbontást már nem az egyes távcsövek átmérője szabja meg, hanem a köztük lévő távolság, azaz a bázisvonal (2. ábra).

Nem igaz azonban, hogy két távcsövet akármekkora távolságba helyezve tetszőlegesen jó szögfelbontású képeket készíthetünk. A technikából adódóan ugyanis egy interferométer nem közvetlenül az égen látható fényességeloszlást szolgáltatja, hanem annak Fourier-transzformáltját (az úgynevezett komplex vizibilitást), és azt is csak az adott bázisvonal hosszának (illetve az abból számolt térfrekvenciának) és pozíciószögének megfelelő pontban. Ahhoz tehát, hogy egy interferometrikus mérésből meghatározhasuk a csillagászati objektum képét, a Fourier-teret a lehető legtöbb pontban kell mintavételezni, amihez viszont sok különböző hosszúságú és pozíciószögű bázisvonalra, azaz minél több összekapcsoltan működő teleszkópra van szükség.



2. ábra. Kétantennás interferométer, a műszer térbeli felbontását a b bázisvonal hossza szabja meg. Forrás: Condon & Ransom (2016), <https://www.cv.nrao.edu/course/ast534/Interferometers1.html>

Bár a rádiócsillagászok már az 1940-es évektől kísérleteztek az interferometrikus technikával, az első nagyon hosszú bázisvonalú sikeres interferometrikus csillagászati mérést (Very Long Baseline Interferometry, VLBI) 1967-ben sikerült elvégezni egymástól több mint 3000 km távolságban lévő két észak-amerikai rádióteleszkóppal. Az adatokat korábban atomórák pontos időjeleivel együtt mágneses adathordozókra rögzítették, és utólag állították elő az interferenciát, ezt hívjuk korreláltatásnak. Napjainkban már számos rádióantennát széles sávú optikai adatkábelek kötnek össze, lehetővé téve a valós idejű korrelálást. Ilyen például az európai VLBI hálózat, amelyet magyar kutatók, például az MTA CSFK Csillagászati Intézetében *Frey Sándor* és munkatársai is rendszeresen használnak.

3. ábra. ALMA antennák a chilei Atacama-sivatagban. Forrás: Carlos Padilla (UI/NRAO).



Az ALMA és a NOEMA

A fiatal csillagok körüli korongok termikus sugárzásának megfigyelésére különösen alkalmas a 2011-ben üzembe állított új rádióteleszkóp-rendszer, az Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA, 3. ábra), mely a 0,3–3 mm-es sugárzás észlelésére alkalmas. E tartományban a földi légkör áteresztése sávok: bizonyos sávokban jó az áteresztés, más sávokban a légkör teljesen átlátszatlan. Az elnyelést a levegőben található vízpára okozza. Szerencsére a vízgőz skálamagassága csak 2 km (ilyen magasan esik felére a vízgőz parciális nyomása). Az ALMA-t emiatt kellően száraz és magas helyre építették, a chilei Atacama-sivatagban az 5050 m-es tengerszint feletti magasságú Chajnantor-fennsíkra.

Az ALMA ötvennégy 12 m és tizenkét 7 m átmérőjű, tökéletesen paraboloid felületű (az attól való eltérés kisebb mint $20 \mu\text{m}$) antennából áll. Teljes fénygyűjtő felülete 6600 m^2 . A 66 antennához 192 alap tartozik, így azokat – az éppen adott mérési projekthez szükséges térbeli felbontásnak megfelelően – különböző konfigurációkba lehet rendezni. A legnagyobb elérhető bázisvonal 16 km, amellyel így akár $0''.006$ (6 milliívmásodperc) felbontás is elérhető (ekkorának látszана egy golf labda 1400 km-ről). Ilyen felbontással már a korongok apró részletei is tanulmányozhatók.

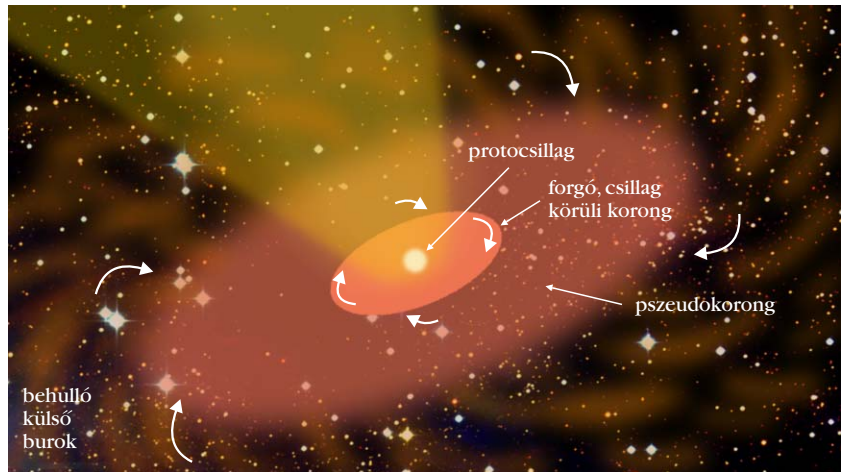
Az ALMA 1 milliárd eurós építési költségét és a folyamatos működtetéshez-fejlesztéshez szükséges költségvetést globális összefogásban európai, észak-amerikai és kelet-ázsiai országok, valamint Chile fedezi. Az antennák jelének korrelálását (interferáltatását) a világ egyik legnagyobb speciális szuperszámítógépe, az ALMA-korrelátor végzi. A korrelátorban több mint 134 millió processzor van, amelyek együttesen 17 peta-FLOP számítási sebességre képesek, azaz másodpercenként 17 000 billió számítási műveletet végeznek. Erre szükség is van, hiszen az antennákról másodpercenként 1 GB feldolgozandó adat érkezik.

Az ALMA eddigi egyik legrészletesebb és legélesebb képét a 450 fényév távolságban, a Bika csillagképben található fiatal (1 millió éves) Nap-típusú csillag, a HL Tau korongjáról készítette. Az ALMA-képen korábban soha nem látott részletek tárultak fel a csillagkörüli korongban: koncentrikus fényes gyűrűk, amelyeket sötét rések választanak el egymástól. Elképzelhető, hogy ezt a szerkezetet a korongban keletkezett, a fiatal csillag körül keringő bolygók okozzák. Ilyen esetben ugyanis ezen testek – gravitációs hatásuknál fogva – ki tudják tisztítani a pályájuk menti környezetet. A HL Tau gyűrűs szerkezetű korongja tehát közvetett bizonyíték lehet arra, hogy már egy ilyen fiatal rendszerben is létrejöhetnek bolygók (1. ábra, jobbra lent).

Földrajzi helyzeténél fogva az ALMA csak a déli égbolton és az égi egyenlítő mintegy 30 fokos környezetében elhelyezkedő objektumokat tudja mérni. Az északi objektumok mérésére egy francia–spanyol–német együttműködésben a Francia-Alpokban fenntartott milliméteres interferométer, a NOEMA (Northern Extended Millimeter Array) ad lehetőséget. A NOEMA 2550 m tengerszint feletti magasságban a Plateau de Bure fennsíkon található és jelenleg kilenc 15 m átmérőjű antenna alkotja. A tervek szerint a következő években további három antennával bővíti majd a rendszert, amely így 2100 m² fénygyűjtő felületű lesz. A NOEMA antenáit is különböző konfigurációkba lehet rendezni, a legnagyobb bázisvonal jelenleg 760 m, az elérhető legjobb térbeli felbontás pedig 0,2. A NOEMA a 0,8–4,3 mm közötti hullámhosszú sugárzást tudja detektálni.

E nemzetközi milliméteres interferometrikus projektekben több magyar kutató is részt vett: Kóspál Ágnes és Juhász Attila a Leideni Observatórium ALMA-központjában dolgozott, Fehér Orsolya pedig 2018 őszétől az Institute de Radioastronomie Millimétrique (IRAM) grenoble-i központjában fog – egyebek közt a NOEMA projektben – dolgozni. Az ezirányú kutatásokat a Magyar Tudományos Akadémia (MTA) és az Európai Kutatási Tanács (ERC) is támogatja. Kóspál Ágnes 2014-ben nyerte el az MTA Lendület-ösztöndíját a *Csillagkörüli korongok – csillag- és bolygókeletkezés az ALMA-korszakban* témájú projektjével, majd 2017-től az ERC kutatási ösztöndíját a *Strukturált anyagbefogási korongok mint a bolygókeletkezés időfüggő kezdőfeltételei* című pályázatára.

Az egyik magyar vezetésű, ALMA-adatokon alapuló érdekes eredmény a közelmúltból a déli féltéken, a Norma csillagképben található V346 Nor jelű fiatal csillaggal kapcsolatos. A V346 Nor egy 0,1 naptömegű, néhány százezer éves, jelenleg is növekvő protocsillag. Kóspál Ágnes és munkatársai az ALMA-val a szén-monoxid-molekula egyik milliméteres színképvonalát vették célba, amelynek Doppler-eltolódását kihasználva feltérképezték a rendszerbeli gáz mozgását. Az adatok elemzéséből kapott kép szerint a protocsillagot körülbelül 350 CSE sugáron belül Kepler törvényeinek megfelelően keringő korong veszi körül (a gáz v sebessége a csillagtól mért r távolság függvényében: $v \sim r^{0,5}$), míg a csillagtól távolabb az anyag sebessége ennél kisebb, a $v \sim r$ relációt követi. Ez utóbbi sebességeloszlás jellemző a pszeudokorongokra,



4. ábra. Vázlat a V346 Nor rendszer felépítéséről az ALMA-adatok alapján. Forrás: MTA CSFK CSI/Kereszturi Ákos.

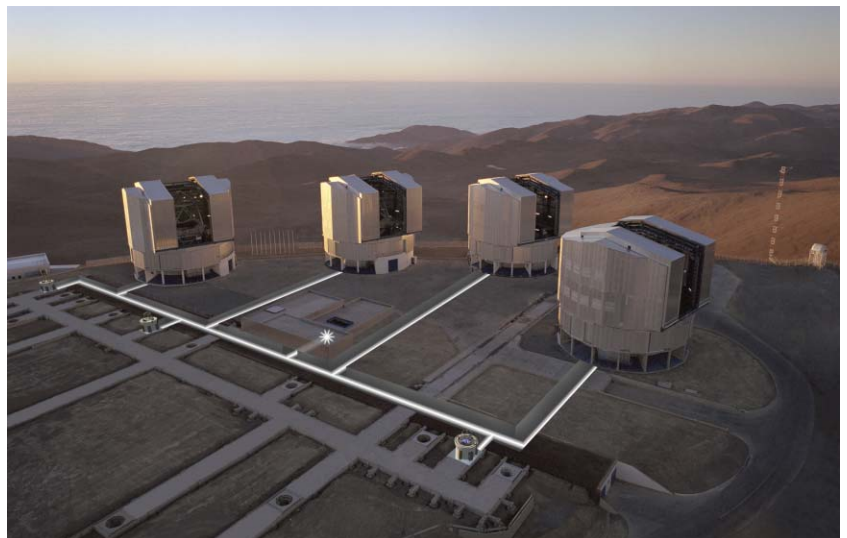
olyan struktúrákra, amelyekben az anyag a keringés és behullás kombinációjával mozog (4. ábra).

A mérésekből az is kiderült, hogy az anyagáramlás üteme a V346 Nor korongjára lényegesen nagyobb, mint amennyi anyagot a korong továbbít a protocsillagra. Ennek következményeként az anyag a korong belső peremén felhalmozódik, egy idő után instabillá válik, majd hirtelen a központi csillagra zúdul. Ilyenkor a nagy mennyiségű, rendkívül gyorsan felszabaduló energia hatására a korong felforrósodik, és benne olyan lényeges kémiai és ásványtani változások mehetnek végbe, amelyek később befolyásolhatják, hogy a korongban hol és milyen összetételű bolygók alakulnak ki.

A VLT Interferométer

Ha a fiatal csillagok körüli korongok legbelső, legforróbb, a földpályának megfelelő sugarú vagy még annál is közelebbi részeire vagyunk kíváncsiak, akkor a

5. ábra. A VLT Interferométer által használt távcsövek és az azokat összekötő fényutak. Forrás: ESO.





6. ábra. A MATISSE műszer a VLT interferometrikus laboratóriumában. Forrás: MATISSE Project/Y. Bresson.

milliméteres tartomány helyett infravörösben kell nagyon jó felbontású méréseket végeznünk. Erre szolgál az Európai Déli Observatórium (European Southern Observatory, ESO) Paranal Observatóriumában található Nagyon Nagy Távcső Interferométer (VLTi). A VLTi-t négy 8,2 m és négy 1,8 m tükrátmérőjű távcső alkotja (5. ábra). A nagyobb távcövek fix pozíciójú kupolákban találhatók, a kisebbek 30 különböző pozícióba helyezhetők. Az interferenciához a távcövek jelét egy bonyolult tükrrendszerrel föld alatti alagútrendszerben egy optikai laborba vezetik, ahol különböző műszerekkel kiválasztják a mérni kívánt hullámhossztartományt, majd létrehozzák és detektorokkal rögzítik az interferenciajelet. A távcövek kettesével, hármasával vagy négyesével használhatók az interferometriára, így a rendszer egy 200 méter átmérőjű óriástávcsőként üzemel, és vele akár $0,004''$ szögfelbontás is elérhető.

A MIDI (MID-infrared Interferometric instrument) a közép-infravörösben (a $8\text{--}13\text{ }\mu\text{m}$ közötti tartományban) vett fel interferometrikus színeképeket. Ezek a hullámhosszak azért különösen érdekesek, mert itt látható a csillagkörüli korongok szilárd anyagának nagy részét alkotó szilikátszemcsék egy széles színeképi alakzata. Az alakzat profiljából lehet a szemcsék méretére és pontos anyagi szerkezetére is következtetni. A MIDI-nek köszönhetően tudjuk, hogy sok korongban a néhány CSE-en belüli részen a szilikátszemcsék nagyok és kristályosak, ezen kívül viszont –

a csillagközi porra is jellemző – szubmikronos ($1\text{ }\mu\text{m}$ alatti méretű) amorf szilikátszemcsék találhatók.

A MIDI-t 2015-ben leszerelték, és rá egy évre minden adata nyilvánossá vált az ESO adatarchívumában. Ekkor az MTA CSFK CSI-ben dolgozó Varga József és munkatársai letöltötték és egységesen feldolgoztak minden Nap-típusú fiatal csillagról készült MIDI-mérést. A több mint 80 csillag mindegyikéhez korongmodellt illesztettek. Így kiderült, hogy mekkora a korong $10\text{ }\mu\text{m}$ -en sugárzó régiója, és ez hogyan korrelál különböző paraméterekkel, például a központi csillag luminozitásával. A létrehozott adatbázis a MIDI értékes öröksége, és nagymértékben segítheti majd a későbbi mérések megtervezését is.

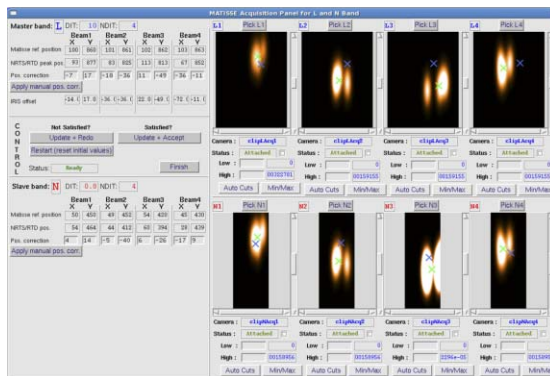
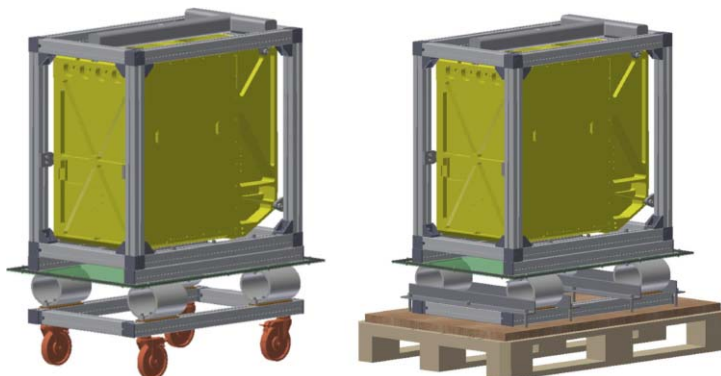
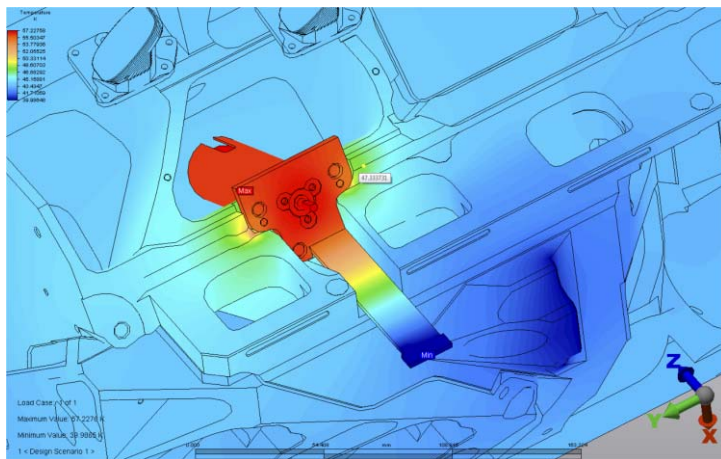
Az MTA CSFK CSI másik kutatója, Lei Chen és kollégái a közepes tömegű, vagyis a Napnál kissé több anyagot tartalmazó csillagokat kutatják. A VLTi egy másik műszerével, a PIONIER-rel készítettek közeli infravörös interferometrikus méréseket a HD 169142 jelű csillagról. Az adatokból – szintén modellillesztés segítségével – kimutatták, hogy a csil-

lagtól $0,07\text{ CSE}$ távolságra (ez a Merkúr pályasugarának mindössze ötöde) mérhető mennyiségű por található, amelynek hőmérséklete 1500 K .

Az előbb ismertetett két projektben a kutatók viszonylag kevés különböző bázison mért vizibilitáspontot illesztettek, és ebből határozták meg a modell paramétereit. Ezekkel a műszerekkel azonban nem lehet valódi képet készíteni. Ezért nagy újítás a MIDI utódjának tekinthető MATISSE (Multi AperTure mid-Infrared SpectroScopic Experiment) műszer, a közép-infravörösben működő első olyan interferométer, amelyik négy távcső jelét kombinálja, és képalkotásra is alkalmas. $3,2\text{--}3,9$, $4,5\text{--}5,0$ és $8\text{--}13\text{ }\mu\text{m}$ -en fog működni, továbbá színeképeket is felvesz majd (6. ábra).

A MATISSE tervezése, majd építése nagyjából egy évtizede kezdődött, és magyar kutatók és mérnökök is részt vettek benne. Nevükhöz például az abszolút nulla fok közelében működő motorok által okozott hőterhelésre vonatkozó hőtani szimulációk fűződnek, de magyarok tervezték és készítették az egyik műszeregység kalibrációs kameráját is. Továbbá modellezést végeztek a műszer biztonságos mozgatásához szükséges szállítóelemekre és a szállítási műveletek során várható mechanikai igénybevételre, valamint hozzájárultak a műszer felhasználói szoftverének megalkotásához és fejlesztéséhez is (7. ábra).

2017 novemberében a MATISSE épségben megérkezett a Paranal Observatóriumba. Az interferenciát 2018 januárjában először egy belső kalibrációs forrá-



7. ábra. Magyar hozzájárulás a MATISSE-hoz: hőtani modell (balra fent), az elkészült kalibrációs kamera (jobbra fent), szállítóelemek modelljei (balra lent) és felhasználói szoftver részlete (jobbra lent). Forrás: MTA CSFK CSI.

son, majd februárban egy égi objektumon, a Sziriuszon is tesztelték. A műszer tesztelésében és beüzemelésében szintén részt vesznek magyar kollégák. A tervek szerint a MATISSE-t majd 2019-től pályázati rendszerben kínálják használatra a csillagász közösségnek.

A magyar kutatók a projekthez való hozzájárulásukért cserébe garantált távcsőidőt kapnak, azaz egy ideig ők használhatják a négy 8,2 méteres távcsövet a MATISSE-szal. A célpont az FU Ori lesz, egy olyan rendkívül érdekes fiatal csillag, amely 1936-ban váratlanul százszorosára fényesedett, és az azóta eltelt több mint 80 évben fényereje alig csökkent. Úgy gondoljuk, hogy ennek a V346 Nor kapcsán már említett korongbeli instabilitás, és így a megnövekedett – a korongról a csillagra történő – tömegátadás az oka. Reméljük, hogy az új interferometrikus mérésekkel közelebb juthatunk majd a korong titkainak megértéséhez, és ahhoz is, hogy általában miként épülnek fel a Naphoz hasonló csillagok.

Az interferometria a modern csillagászat egyik legígéretesebb technológiája, amely a földpálya méretskáláján képes képet alkotni a születő bolygórendszekekről. A magyar csillagászat az elmúlt 15 évben mind

technikailag, mind tudományosan részt vett és vesz az ilyen irányú európai projektekben. Mindezt úgy sikerült elérni, hogy Magyarország még nem tagja az Európai Déli Observatóriumnak. A remélt ESO-csatlakozásunk az ehhez hasonló műszertechnikai és tudományos projekteket sokkal gördülékenyebbé teheti, és folyamatosan biztosítja hozzáférésünket az élvonalbeli eszközökhöz, közöttük a most épülő 39 m-es tükörátmérőjű ELT távcsőhöz.

Magyar nyelvű ajánlott irodalom

- Frey Sándor, Gabányi Krisztina Éva: Nagy szögfelbontású rádió-interferometria – űreszközökkel. In: Konkoly Monográfiák 6, Kelemen János, Szabados László (szerk.): *Űrcsillagászat Magyarországon, 2010*, 62–68; <http://www.konkoly.hu/Mitteilungen/m6.pdf>
- Kóspál Ágnes, Moór Attila: Hogyan látja az ALMA a fiatal csillagok korongjait? In: *Meteor Csillagászati Évkönyv 2016*. Magyar Csillagászati Egyesület, Budapest, 2015.
- Mosoni László: Amíg a 100 méteres távcsövek elkészülnek. In: *Meteor Csillagászati Évkönyv 2013*. Magyar Csillagászati Egyesület, Budapest, 2012.
- http://mta.hu/tudomany_hirei/ujabb-lepes-a-bolygok-keletkezese-nek-megerteseben-magyar-kutatoknak-elsokent-sikerult-meg-merniuk-egy-fiatal-csillag-koruli-anyagaramlas-merteket-107855
- http://mta.hu/tudomany_hirei/uj-muszer-kesziti-az-eddigi-legreszletebb-felveteleket-az-egitestekrol-108509

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-postacím: elft@elft.hu

Kiadja az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, felelős kiadó Groma István főtítka, felelős szerkesztő Lendvai János főszerkesztő.

Kéziratokat nem őrzünk 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.

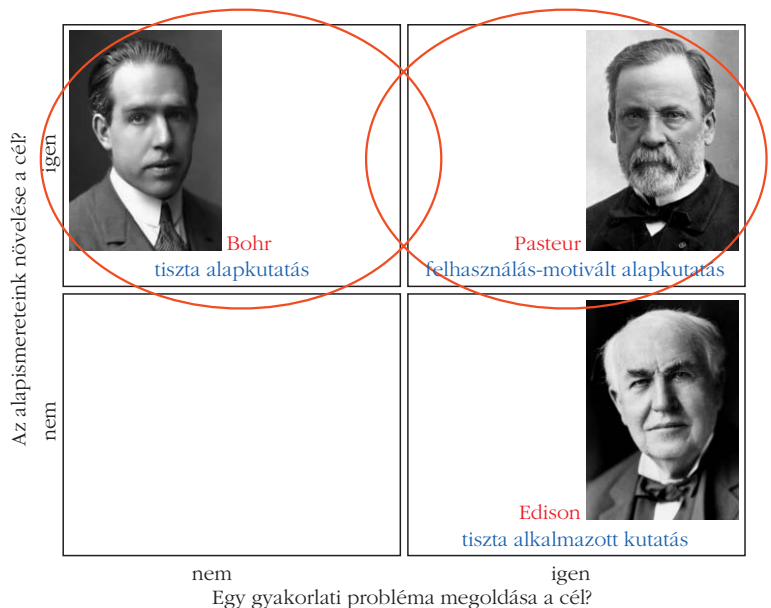
Megjelenik havonta (nyáron duplaszámmal), egyes szám ára: 900.- Ft (duplaszáma 1800.- Ft) + postaköltség.

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

ANYAGTUDOMÁNY SZÁMÍTÓGÉPPEL – 2. rész

Pusztai Tamás, Rátkai László, Gránásy László
Wigner Fizikai Kutatóközpont, SZFI Kísérleti Szilárdtestfizikai Osztály

Az folyóirat előző és a mostani számában megjelent kétrészes cikk témája a számítógépes anyagtudomány. Az első részben általános áttekintést adtam az anyagtudomány helyzetéről, különösen az új anyagok minél gyorsabb kifejlesztésének igénye kapcsán felmerülő kihívásokról és kezdeményezésekről, amelyben a számítógépes anyagtudománynak fontos szerepe van. A mostani részben pedig néhány olyan, csoportunk által végzett munkát ismertetünk (mivel csoportmunkáról van szó, immár többes szám első személyben), amelyek bemutatják, hogy a számítógépekkel végzett szimulációk miként segíthetik az anyagtudományi folyamatok megértését és miként kapcsolódhatnak valós, gyakorlati problémák megoldásához.



A kutatómunka Stokes-féle felosztása

A kutatási feladatokat hagyományosan az alapkutatás és alkalmazott kutatás kategóriákba szoktuk sorolni, ez azonban nem mindig ad elég árnyalt képet az adott munka jellegéről. Ezeket a kategóriákat finomította tovább *Donald E. Stokes* [15], aki két különböző kritérium által meghatározott felosztást javasolt. Az egyik kritérium, hogy az adott kutatási feladat során fontos cél-e a folyamatok meg-

3. ábra. A kutatási feladatok felosztása *Donald Stokes* szerint. Csoportunkban alapkutatást végzünk, amelynek néha van, néha pedig nincs közvetlen gyakorlati motivációja (pirossal bekarikázott negyedek).

értése, a természet működését leíró alapvető ismereteink bővítése, a másik pedig, hogy a kutatási feladatnak célja-e egy konkrét gyakorlati probléma megoldása. A két kérdésre adott válasz alapján egy 2×2 -es mátrixsal jól reprezentálható felosztást nyerünk, amelynek mezőit az adott terület jellemző kutatójáról *Bohr* (tisztá alapkutatás), *Pasteur* (felhasználás-motivált alapkutatás) és *Edison* (tisztá alkalmazott kutatás) negyedeknek nevezte (3. ábra). A negyedik negyed üresen marad, hiszen ha sem a megértés, sem pedig a felhasználás nem cél, nem beszélhetünk kutatásról.

A Wigner FK Szilárdtestfizikai és Optikai Intézetében működő csoportunk fő célja mindig a megértés és az alapvető ismereteinket gazdagító alapkutatás. A fenti csoportosítást azért mutattuk be, mert jól illusztrálja, hogy ezen kategórián belül is léteznek különböző jellegű feladatok. Az alábbiakban nagyon röviden bemutatott néhány munkánkat is ebben a felosztásban tárgyaljuk.

Az MTA Fizikai Osztálya 2018. május 10-i tudományos ülésén azonos címmel elhangzott előadás bővített, írott változata.



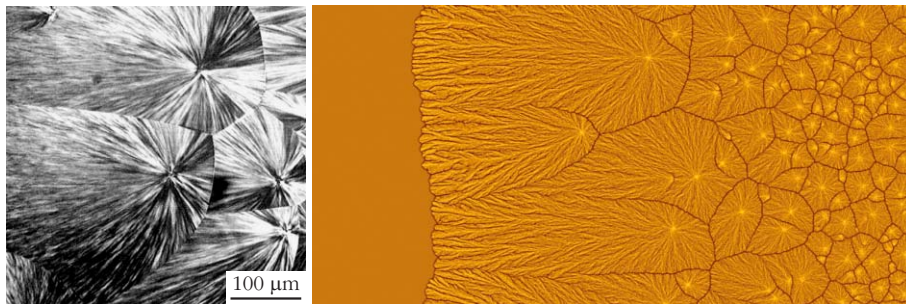
Pusztai Tamás (45) az MTA doktora, az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont tudományos tanácsadója. Kutatásait a számítógépes anyagtudomány területén végzi, azon belül is elsősorban a megszilárdulás során kialakuló növekedési formák fázismezőmodellel történő leírásával foglalkozik.



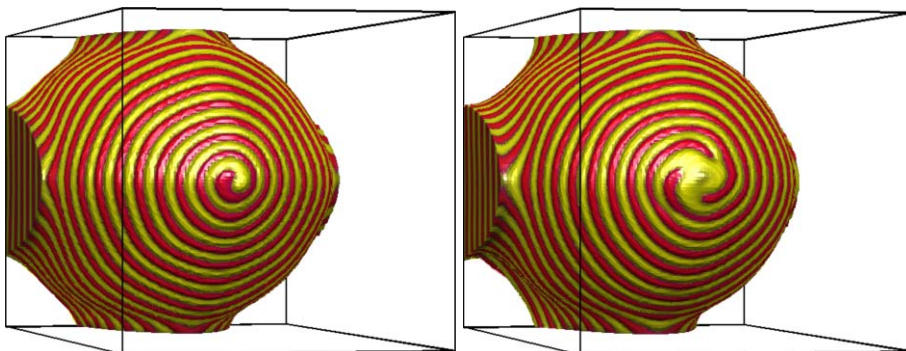
Rátkai László PhD hallgató a Wigner Fizikai Kutatóközpontban komplex megszilárdulási jelenségek fázismező elméleti modellezésével foglalkozik. Eddigi munkáiban a helikális belső szerkezetű eutektikus dendritok kialakulását vizsgálta, valamint a fázismező és Lattice-Boltzmann-egyenletek csatolásával kidolgozta az olvadákáramlás jelenlétében történő megszilárdulás olyan modelljét, amely megengedi a kialakuló szilárd szemcsék mozgását is.



Gránásy László fizikus az MTA doktora, az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont tudományos tanácsadója, az Academia Europaea tagja. Diplomát és PhD-fokozatot az ELTE-n szerzett. Több európai, amerikai és japán egyetem, kutatóintézet ösztöndíjasa, vendégkutatója, professzora. Fő érdeklődési területe a komplex megszilárdulási folyamatok térelméleti modellezése atomi skálán működő és lokálisan átlagolt (coarse grained) módszerekkel.



4. ábra. Hőmérséklet-gradiensben növekvő aszimmetrikus szferolitok mikroszkópos felvétele [22] (balra) és számítógépes szimulációja (jobbra). A szimulációs ábrán a színek a kémiai összetételt mutatják.



5. ábra. Helikális belső szerkezetű eutektikus dendritok egy egyszerű ternér rendszerben. A bal oldali ábrán a piros és sárga színnel jelölt szilárd fázisok egyszeres, míg a jobb oldali ábrán háromszoros spirális szerkezetet mutatnak.

Tiszta alapkutatási feladatok

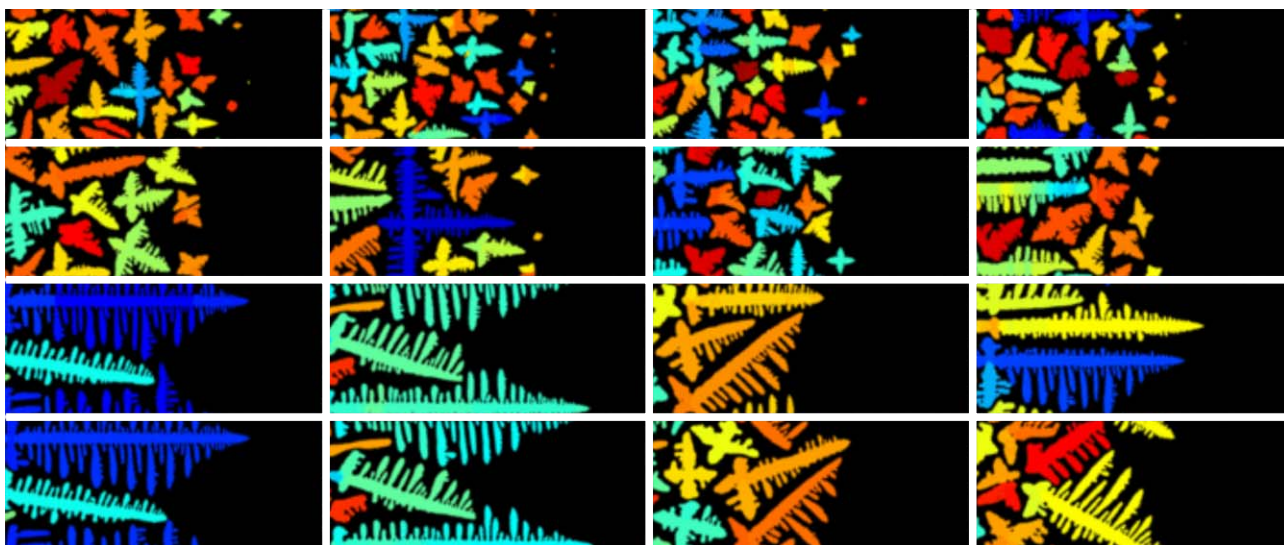
(Bohr-negyed)

Polikristályos növekedési formák modellezése

Ezt a témakört mindenképpen szeretnénk megemlíteni, hiszen legnagyobb sikereinket ebben értük el [16–18]. Említésnél többre azonban nem vállalkozunk, mert egyrészt a témakör óriási, másrészt e té-

szferolitok népes családja hozható példaként, amelyek – rendezetlen kristályszerkezetük ellenére vagy éppen azért – nagyobb méreteket elérve szabályos, kör-, illetve gömbszerű formát vesznek fel. A kísérletek és nekik megfelelő szimulációk – amire a 4. ábra mutat egy példát – kiváló kvalitatív egyezése azt mutatja, hogy az orientációs mezőn alapuló modellünk jó általános alapot ad a szferolitok kialakulásának leírására.

6. ábra. A növekedési morfológia változása irányított megzilárdulás során. A 4×4 ábra a 4 különböző hőmérséklet-gradiens (balról jobbra nő) és 4 különböző húzási sebesség (lentől felfelé nő) mellett kialakuló mikroszerkezetet mutatja [27]. A színezés az orientáció szerint történt. A vizsgált tartományban kis sebességek esetén az oszlopos, míg nagy sebességek esetén az ekvixiális növekedési forma jellemző.



máról korábban a *Fizikai Szemlében* is részletesen írtunk [19–21]. Munkánk alapja az az orientációs mezővel kibővített fázismezőmodell volt, amelyet csoportunkban fejlesztettünk tovább úgy, hogy az orientációs mező folyadékfázisra kiterjesztésével alkalmassá vált olyan megzilárdulási folyamatok leírására is, amelyek során az orientációs rendeződés nem, vagy csak részlegesen valósul meg. Így a szokásos, orientációsan rendezett, azaz egykristályszerkezetű szilárd szemcsék mellett olyan szemcsék modellezése is lehetővé vált, amelyek már növekedésük során polikristályos szerkezetet alakítanak ki. Az előbbire példa a dendrites megzilárdulás, amelynek során hópolyhekhez hasonló, azok szerkezeti sajátosságait mutató szabályos formák fejlődnek, az utóbbira pedig a

Helikális belső szerkezetű eutektikus dendriték

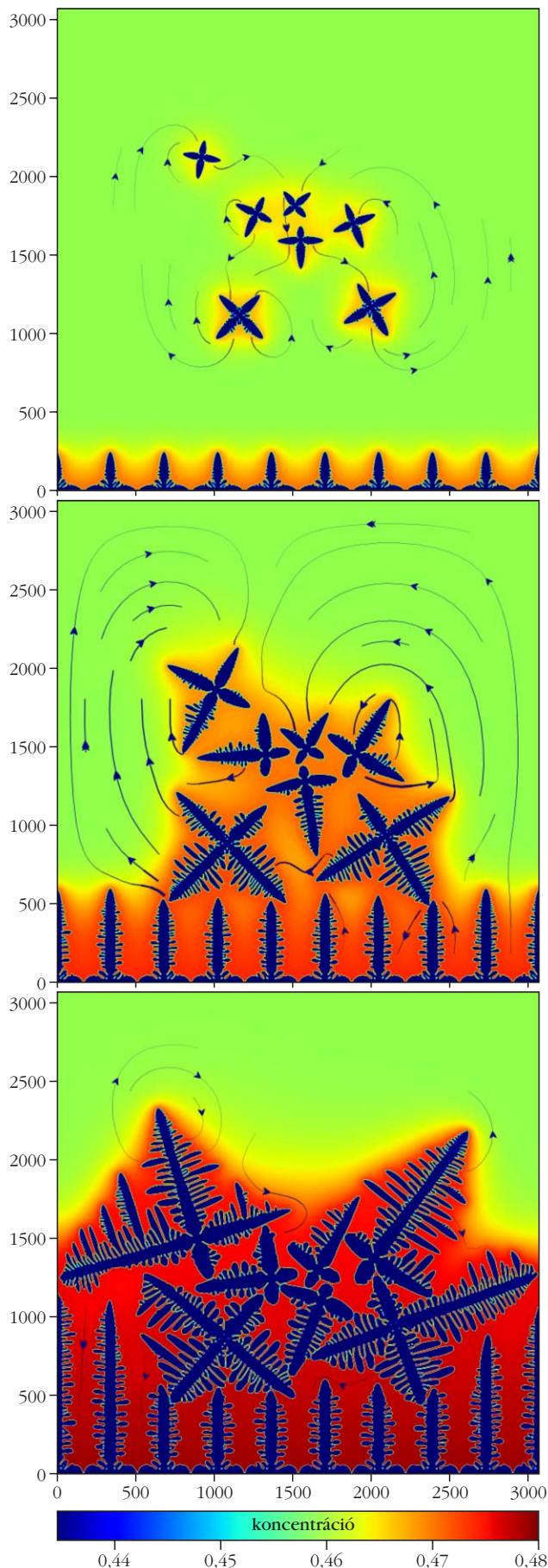
Ezt a munkát francia kollégáink lenyűgöző kísérleti felvételei motiválták [23]. Egy átlátszó háromkomponensű ötvözet megszilárdulásának mikroszkópos vizsgálata során helikális belső szerkezetű dendrites növekedési formákat figyeltek meg. Bár ez a növekedési forma elég összetett, de kialakulásában szerepet játszó folyamatok egyszerűek. Megmutattuk, hogy egy szimpla ternér, a folyadék és szilárd fázisokra ideális, illetve regulárisoldat-modelleket feltételező fázismezőmodellel ez a növekedési forma is jól reprodukálható [24, 25]. A szimulációkban nem csak egyszeres, hanem többszörös spirálokat is megfigyelhettünk (5. ábra). A különböző számú spirálkarból álló megoldások akár ugyanolyan anyagi és egyéb fizikai paraméterek mellett is létrejöhetnek. Azt, hogy a több lehetőség közül az adott rendszerben melyik megoldás és melyik csavarodási irány valósul meg, a rendszerben jelen levő fluktuációk határozzák meg. A spirálkarok számának várható értéke a dendrit csúcsának görbületét meghatározó paraméterek (dendrit-csúcs-sebesség, felületi szabadenergia, kinetikus anizotropia) függvénye [26].

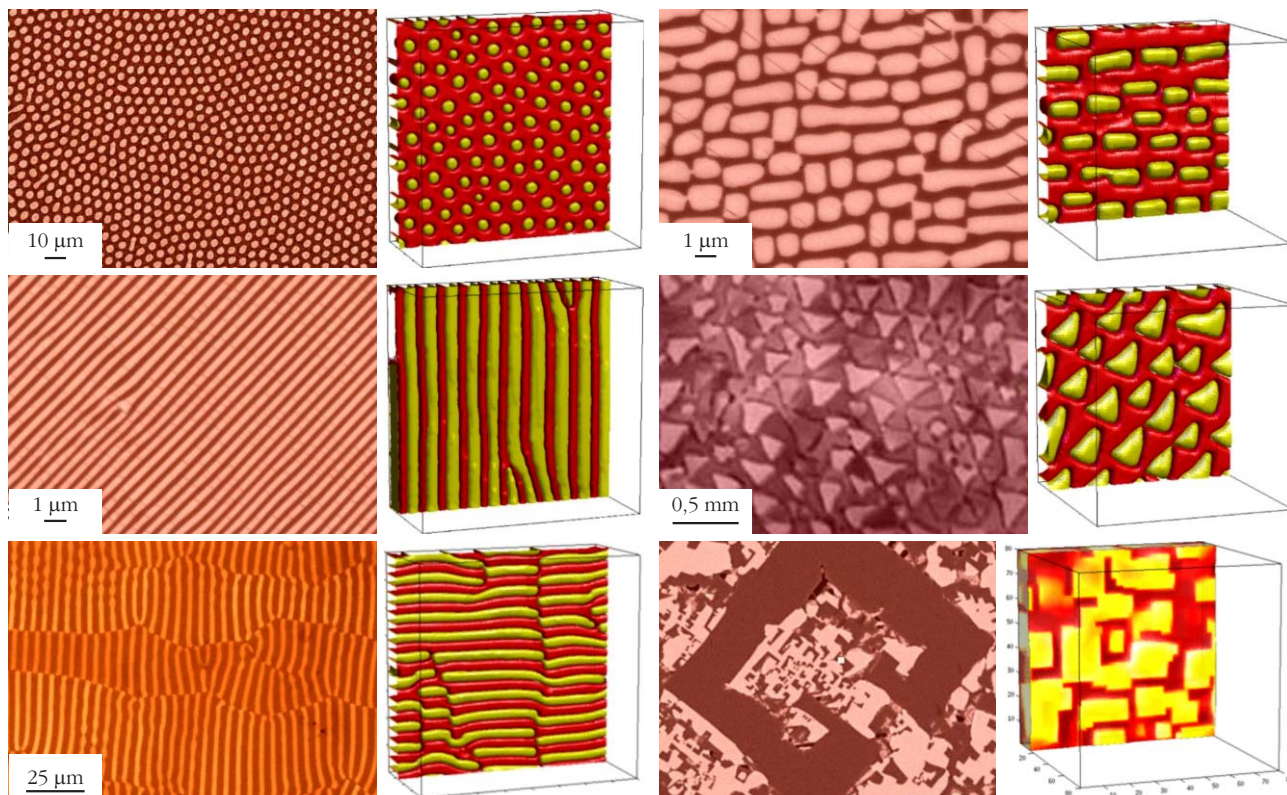
Felhasználásmotivált alapkutatói feladatok (Pasteur-negyed)

IMPRESS projekt

A technikai ötvözetek mechanikai tulajdonságait alapvető módon határozza meg a megszilárdulás során kialakuló mikroszerkezetük. Egy öntéssel előállított eszköz esetén az olvadék megszilárdulása a leghidegebb helyen, azaz az öntőforma falán indul meg. A szilárd fázis növekedési formáját elsősorban a ∇T hőmérséklet-gradiens és a megszilárdulási front hűtési sebességtől függő v haladási sebessége határozza meg. A kialakuló mikroszerkezet eleinte az edény falán képződött szilárd magokból kiinduló, karácsonyfaszerű oszlopos dendritekből áll, amely később (∇T és v lokális értékeinek változása miatt) a megszilárdulási front előtt képződő kristálycsírákból kiinduló ekvixiális dendritekből álló szerkezetbe vált át (6. ábra). Ezen – angolul Columnar to Equiaxed Transition (CET) nevezett – folyamat megértése és kontrollálása tehát óriási gyakorlati jelentőséggel is bír. Egy korábbi, mintegy 40 európai kutatóintézet részvételével létrejött IMPRESS nevű EU FP6-os projektben ezen átalakulás modellezése volt a feladatunk. A programcélja egy olyan Al-Ti alapú repü-

7. ábra. Az oszloposról ekvixiális növekedésre váltás (Columnar to Equiaxed Transition, CET) számítógépes szimulációja az ekvixiális részecskék mozgásának figyelembevételével. Az egymást követő képek a szimuláció időben egymást követő pillanatképei, a színezés az Al-Ti rendszer Al-tartalmát (mol%) mutatja. A titánban gazdag dendriték a gravitációs tér hatására lefelé mozdulnak. Ez a mozgás áramlást kelt az olvadékban, ami visszahat a részecskék mozgására és növekedésére is.





8. ábra. Néhány olyan eutektikus szerkezet, amelyek kialakulását jól és egy olyan, amelyet nem annyira jól (jobbra lent) sikerült modellezni. A képek a kísérleti felvételeket és a nekik megfelelő szimulációkat mutatják.

lőgép-hajtómű turbinalapát előállítására volt, amely a szokásosan használt Ni-alapú szuperötvözetekhez képest jelentősen kisebb sűrűségű, de legalább olyan jó mechanikai tulajdonságokkal bír, még a meglehetősen magas, 1000 K körüli üzemi hőmérsékleten is.

GRADE CET projekt

A CET tanulmányozására eddig felírt elméleti modellek és numerikus szimulációk nem, vagy csak részlegesen vették figyelembe az olvadákfázis áramlásának hatását, amelyet a szilárd és a folyadék fázisok közti, valamint az olvadék kémiai összetételétől függő sűrűségkülönbsége hajt a gravitációs tér jelenlétében. Az olvadákáramlás hatásának vizsgálata célszerűen az áramlást hajtó hatás, azaz a nehézségi erő hangolásával lehetséges. A gravitáció CET-re gyakorolt hatásának tanulmányozása az Európai Űrügynökség (European Space Agency, ESA) által finanszírozott GRADECET projekt feladata, amelyben a folyamat kísérleti és elméleti vizsgálata történt hipergravitációs (1–20g nehézségi gyorsulás az ESA nagy átmérőjű centrifugájában) és mikrogravitációs (10^{-5} g nehézségi gyorsulás az ESA MAXUS rakétájában) környezetben. E projektben is a modellezés volt a feladatunk (7. ábra). Az áramlási tér egyrészt a megszilárdulási front előtt kialakuló kémiai összetételeloszlás módosításán keresztül befolyásolhatja jelentősen a növekedési formát, másrészt az oszloposan növekvő dendritok előtt képződő ekvixiális

dendritok „szállítással” átrendezheti azok eloszlását, amitől az oszlopos növekedés blokkolása más feltételek mellett következhet be. Az előbbi folyamat figyelembe vételére már korábban is történtek próbálkozások, de az utóbbi folyamat modellezése csak az elmúlt években történt meg. A stabilnak és hatékonynak bizonyult megközelítésünk lényege, hogy minden ekvixiális részecskét egy külön mobil alrácsra helyezünk. A részecskék növekedési egyenleteit ezen alrácsokon oldjuk meg, a részecskéket viszont az alrácsokon keresztül, a rögzített globális rácson megoldott Lattice–Boltzmann-egyenletek szerint meghatározott áramlási térnek megfelelően mozgatjuk.

ENSEMBLE projekt

Az ENSEMBLE nevű projekt célkitűzése metaanyagok előállítása volt eutektikus önszerveződés felhasználásával. Metaanyagoknak azokat a természetben általában nem előforduló anyagokat nevezzük, amelyek különleges tulajdonságaikat valamilyen ismétlődő szerkezetüknek köszönhetik. Ilyen különleges tulajdonság például a negatív törésmutató. Ahhoz, hogy ezek a különleges tulajdonságok az optikai tartományban lépjenek fel, az ismétlődő szerkezet periódusának összemérhetőnek kell lennie a fény hullámhosszával. A 100–1000 nm tartományban periodikus szerkezetet kialakítható anyagok előállításának egyik ígéretes módja az eutektikus önszerveződés felhasználása. Az eutektikus megszilárdulás során az olvadákfázisból egyszerre két szilárd fázis alakul ki. A

megszilárdulást kontrolláló két alapvető folyamat – a kisebb hosszakat preferáló diffúzió és a kisebb görbületeket, azaz nagyobb távolságokat kedvelő kapillaritás – versengéseként a szerkezetben egy jellemző méretskála alakul ki, az anyagi és külső kontrollparaméterektől függő, úgynevezett Jackson–Hunt-hullámhossz. A projekt keretében egy elméleti csoport által meghatározott, adott optikai tulajdonságokat biztosító eutektikus szerkezeteket valósítottunk meg, olyan anyagokban, ahol a két szilárd fázis optikai tulajdonságai jelentősen eltérők. Mi számítógépes szimulációkkal próbáltuk feltérképezni az adott szerkezet kialakításához szükséges paramétereket, míg egy kísérleti csoport ténylegesen előállította az adott szerkezetű anyagokat (8. ábra) [28].

Irodalom

15. Donald E. Stokes: *Pasteur's Quadrant – Basic Science and Technological Innovation*. Brookings Institution Press, 1997.
16. László Gránásy, Tamás Pusztai, James A. Warren, Jack F. Douglas, Tamás Börzsönyi, Vincent Ferreiro: Growth of 'dizzy dendrites' in a random field of foreign particles. *Nature Materials* 2/2 (2003) 92–96.
17. László Gránásy, Tamás Pusztai, Tamás Börzsönyi, James A. Warren, Jack F. Douglas: A general mechanism of polycrystalline growth. *Nature Materials* 3/9 (2004) 645–650.
18. László Gránásy, Tamás Pusztai, György Tegze, James A. Warren, Jack F. Douglas: Growth and form of spherulites. *Physical Review E* 72/1 (2005) 011605.
19. Gránásy László, Pusztai Tamás, Börzsönyi Tamás: A polikristályos megszilárdulás térelméleti modellezése. *Fizikai Szemle* 55 (2005) 203–211.
20. Pusztai Tamás, Bortel Gábor, Tóth Gyula, Gránásy, László: Komplex kristálmorfológiák modellezése három dimenzióban. *Fizikai Szemle* 56 (2006) 412–415.
21. Gránásy László: Számítógépes anyagtudomány: Tűkristályoktól a komplex polikristályos alakzatokig. *Fizikai Szemle* 67 (2017) 403–406.
22. Andrzej Pawlak, Ewa Piorkowska: Crystallization of isotactic polypropylene in a temperature gradient. *Colloid and Polymer Science* 279/10 (2001) 939–946.
23. Silvere Akamatsu, Mikaël Perrut, Sabine Bottin-Rousseau, Gabriel Faivre: Spiral Two-Phase Dendrites. *Physical Review Letters* 104/5 (2010) 056101.
24. Tamás Pusztai, László Rátkai, Attila Szállás, László Gránásy: Spiraling eutectic dendrites. *Physical Review E* 87/3 (2013) 032401.
25. Szállás Attila, Rátkai László, Pusztai Tamás, Gránásy, László: Helikális mintázat eutektikus ötvözetekben. *Fizikai Szemle* 63 (2013) 333–337.
26. László Rátkai, Attila Szállás, Tamás Pusztai, Tetsuo Mohri, László Gránásy: Ternary eutectic dendrites: Pattern formation and scaling properties. *The Journal of Chemical Physics* 142/15 (2015) 154501.
27. László Gránásy, László Rátkai, Attila Szállás, Bálint Korbuly, Gyula I. Tóth, László Környei, Tamás Pusztai: Phase-Field Modeling of Polycrystalline Solidification: From Needle Crystals to Spherulites – A Review. *Metallurgical and Materials Transactions A* 45 (2014) 1694–1719.
28. László Rátkai, Gyula I. Tóth, László Környei, Tamás Pusztai, László Gránásy: Phase-field modeling of eutectic structures on the nanoscale: the effect of anisotropy. *Journal of Materials Science* 52 (2017) 5544–5558.

KÉTSZÁLAS NAPÓRA – egy ritkaság Siófokon

Molnár János Albert
Siófok

A Siófokra tervezett napóra jellegét eleve meghatározta a hely sugallta alapötlet: az egyik árnyékvető szál a vízszintes eresz és egy függőn a másik. A skála óravonalai az időegyenleg nyolcasával úgy vannak egybeszerkesztve, hogy azok látványos skálarájzot is alkotnak. Így a helyi idő szerint működő kétszál as napóra alkalmas a zónaközép szerinti időeltolódás és a valódi középidő pontos mutatasára. Azaz a napóra kétszál as rendszere és egyedi kialakítása miatt is „napórás szakmai” érdekesség, európai ritkaság. A most bemutatásra kerülő számítási módszer némi kiegészítéssel láncgörbe- vagy V alakú árnyékvető szálhoz is használható.



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

Bevezető

Alighanem akkor kezdődhetett az ember „homo sapiens”-szé válása, amikor rájött arra, hogy van az idő és ennek mibenlétét kezdte firtatni. Hiszen az ősi, afrikai vagy európai barlangrajzok mozgásábrázolásaiban, az egyiptomi piramisok, meg a stonehenge-i és egyéb csillagvizsgáló építmények háttérében az idő létének megismerését, hatásainak firtatását fedezhetjük fel, akárcsak a bibliai, babilóniai vagy a görög bölcsek filozófiai feljegyzéseiben. Az időmérés ókori módszerei és lehetőségei, meg a mindennapi élet érdekei az ősi napórákban találkozáva öltöttek testet. A napórák évezredek átívelő fejlődése mindenkor a technika, a tudomány és filozófia éppen elért csúcsait mutatja, rögzíti. Így alakultak ki a különféle fajtájú és stílusú árnyékvetők és skálafelületek; a működésmódokat megalapozó csillagászati és matematikai ismeretek. A szoros filozófiai kapcsolat ma is jól látható maradványa a napórák gyakran népi bölcsességeket is közlő feliratai és jelképes festményei.

Mára a napórák – a hagyományok ápolásán, esztétikai elemeik vagy szakmai érdekességeik bemutatásán túli – eredeti feladata, az idő pontos mérése (és

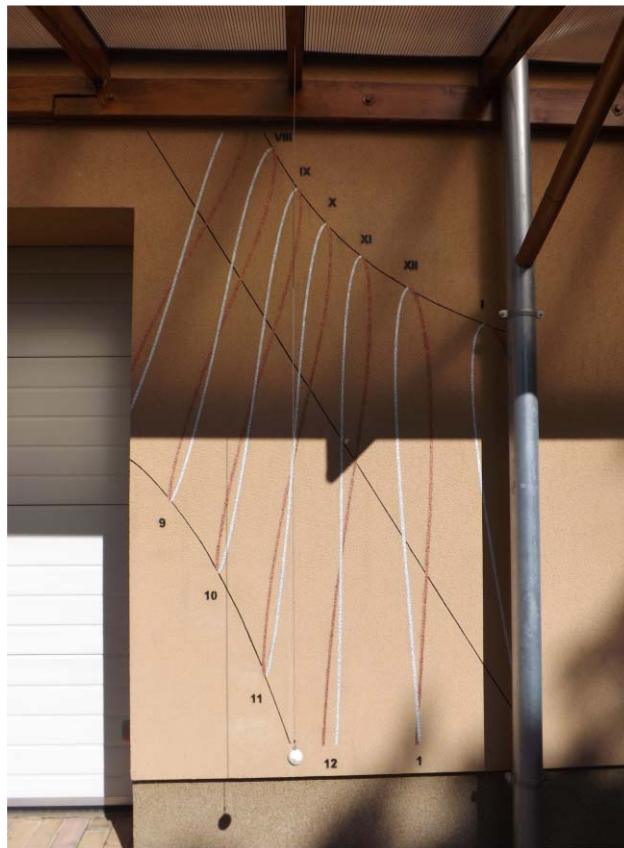
nem a *pontos idő* mérése!) gyakorlatilag elenyészett. Ám az újdonságokat kereső kutatói vágy maradandó. Ennek egyik nem régmúltbeli eredménye volt *Hugo Michnik* elzászi tanár dolgozata [7] 1923-ban az újfajta, kétszálás asztali napóráról. Ezzel szinte egyidős *Drágffy Sándor* érsekivadkerti földbirtokos 1925. évi bejelentésére kiadott Magyar Királyi Szabadalmi leírás egy gyűrűs napóráról. 1923 óta számtalan tanulmány [l. irodalomjegyzéket] látott napvilágot eleinte a kétszálás fali napóráról, majd 1980-tól az általános helyzetű kitérő egyenesek vagy térgörbék, meg egy tetzőleges helyzetű felületből álló „napóra” skálaszerkesztésének matematikai csemegéiről [1, 3]. Idővel – ingyenes amatőr, valamint profi igények kielégítésére alkalmas fizetős – számítógépes napóratervező csomagok is megjelentek a piacon (Sonne, Shadows, Orologi Solari stb.). Ennek ellenére Európában meglehetősen ritkán lehet kétszálás napórát látni. Magyarországon nyilvántartott, mintegy 800 napóra között egyelőre egy kétszálás sincs. Ismereteim szerint hozzánk legközelebbi az olaszországi Udine város szomszédságában lévő 2500 lakosú *Aiello del Friuli* falu ($\varphi = 45,87216^\circ$; $\lambda = -13,36474^\circ$) több, mint 120 darabos napóramúzeumában működik.

Egy nemrég épített siófoki társasház szerencsés módon olyanná lett, hogy falára nagyon kevés kiegészítéssel érdekes, kétszálás napórát lehetett készíteni. A ház építészeti adottságai és a napóra kivitelezési lehetőségei miatt csak függőleges és vízszintes árnyékvető szálak jöhettek számításba, mint szabadon választható alapparaméterek. Ugyanis adott az épület méternyi széles esővédő tetejének vízgyűjtő csatornája, ami egyúttal egy kétszálás napóra vízszintes keresztzsalaként is kiválóan működik. A tető tartószerkezetének megfelelő pontjához rögzített és nehezzel terhelte zsinag meg pompás délköri árnyékvetője lett az így kialakított, 1. ábrán látható napórának. Már csak a skála hiányzott, csak ezt kellett megtervezni és elkészíteni.

Alapadatok

A napórák skálájának tervezésére számtalan elv és módszer ismeretes. Ezek ugyanazokat az alapvető földrajzi, valamint technikai-fizikai adatokat igénylik és körülbelül azonos jellegű és tartalmú skálaadatokat eredményeznek, de kényelmi és többlétszolgáltatásaikban jelentősen eltérnek egymástól. Valamennyi napórás számítás alapvetően a *belyi idő*, a *belyi középidej* és a *zónaidő* közti kapcsolatok, no meg az *időpont* és az *időtartam* közti különbség szabatos ismeretét, az ezekhez tartozó *óraszög* – *időszög* megfelelő használatát igényli. Időszakonként még a *nyári időszámítás* okozta egy órányi eltolódást is figyelembe kell venni.

A napóra helyének földrajzi szélességi és hosszúsági (φ , λ) koordinátáját legegyszerűbben az internetes térképekről vagy kézi térképgépekről lehet leolvasni. Ennek eredménye a siófoki helyszínre: $\varphi = 46,9046^\circ$; $\lambda = -18,0514^\circ$.



1. ábra. A napóra fényképe, a kép készítésének ideje – mint leolvasható – nyári időszámítás szerint május 1. 9 óra 40 perc.

A skála tervezéséhez még szükséges geometriai alapadat a fal elfordulása. Ezt is sokféle módon lehet megmérni. Az adott esetben az volt a legegyszerűbb, hogy meghatároztam azt az időpontot, amikor a Nap a falat éppen merőleges irányból világítja. Ehhez a méréshez jól lehetett használni a nyitott garázkapu függőleges ajtótokjának az ellenőrzött vízszintes aljzatbetonra vetett árnyékát és ellenőrzésképpen az ideiglenes helyre rögzített függőzónát is. A mérés zónaidejéből lehetett a Nap súrolási irányszögét, majd ebből a fal elfordulását kiszámítani. Ehhez egy csillagászati adatokat számító és kellően pontos számítógépes programot volt kényelmes használni. Több alkalommal végzett megfigyelések átlaga kellő pontossággal adja a fal irányát, azaz a kelet-nyugati iránytól való elfordulás α szögét. Ez az adott helyen $\alpha = -39,5^\circ$.

Az idő

Tudott, hogy a tengelye körül forgó Föld ellipszis alakú pályán kering a Nap körül. *Kepler* óta számszerűsíteni is tudjuk, hogy mennyivel lassabban halad naptávolban, és napközben mennyivel gyorsabban, mint az éves átlag. A Föld egyes helyein lévő napórák a forgó Földről látszó Nap napi 24 órás periodikus pályájából adódó árnyékhelyzet alapján a mindenkori, *valódi belyi idő* szerint működnek. Egy-egy adott helyen a Nap valamely delelése és a rákövetkező de-

lelése közti időtartam a Nap napi teljes körbefordulásához igazodóan szögmértékben számolva mindig napi 360° . Eszerint lehet szögfokokkal mérni, illetve időszögben, óraszögben megadni a napi *időpontot*. Viszont a napi delelések közti *időtartamok* attól is függenek, hogy a Föld éves keringése során pályája melyik részén van és éppen milyen a forgástengely helyzete a Naphoz képest. Hiszen az adott hely deleléskor mindig a Nap felé fordul, miközben a Föld pályamenti naponkénti elmozdulásainak követkesei beleszámítanak a Naphoz viszonyított tengely körüli forgásának idejébe. A tengely ferdesége is befolyásolja a napok deleléstől delelésig tartó idejének hosszát. Így a Földről megfigyelt napi delelések közti időtartam éves periódusidővel folyamatosan változik, ráadásul a tengelyferdeség miatt ehhez a változáshoz még egy további, de fél éves periódusú járulék is társul. Így a valódi Nap szerinti nap hossza hol hosszabb, hol rövidebb a névleges napi 24 óránál.

Ezt az egyenletlenséget kiküszöbölendő, a gyakorlati élet igényei miatt meghatároztak egy kitalált (képzelt, közepes, kiegyenlített, fiktív) Napot a valódi helyett. Ez a képzelt Nap olyan, hogy a földi egyenlítő síkjában és egyenletesen jár körbe az év során, mert az egyenletesen folyó időt a Föld forgása szerint akarjuk mérni, azaz az egyenlítőn. Ez a kitalált Nap úgy mozog, hogy a Tavaszponton való átmenetének időpontja és helye mindig egybeesik a valódi Napéval. Azaz a valódi Nap és a kitalált Nap szerinti év hossza másodpercre egyenlő, miközben a valódi Nap hol a kitalált előtt jár, hol mögötte. E kitalált Nap szerinti, egyenletesen múló idő az egyes földrajzi helyekhez tartozó *kiegyenlített helyi idő*, rövidebben t_K helyi középideő. A t_K középideő és a t_H valódi helyi idő különbségét, a $t_K - t_H = IE$ [időperc] különbséget *időegyenlegnek*, időegyenlítésnek (de helytelenül időegyenletnek!), raja nyomán nyolcas görbének (netán analemmának) is nevezik. Ugyanis az időegyenleg napi értékeit mutató függvény görbéje több helyi szélsőértékkel bír, más koordináta-rendszerbeli képe meg elnyúlt 8-as alakú. Nyelvektől és nemzeti szokásoktól független találkozhatsz még az $EoT = -IE = t_H - t_K = [\text{szögfok}]$ vagy [időperc] értelmezésekkel, meg az időfajta esetén a *polgári idő*, *civil idő*, *óraidő*, *időszög* stb., illetve ezek latin, német, angol stb. változatlan (fordítás nélküli) átvételével is.

Az országos időjelzések (rádió, mobiltelefon) a *zónaközépnek* kinevezett földrajzi helyek egyenletesen folyónak tekintett *középideje* szerinti t_Z *zónaidő* [óó:pp:ss] értékét közlik. Eszerint járnak a gépi órák, az ennek megfelelő időpontokat bármikor meg tudjuk határozni. De mi a helyi idő értéke?

A napóra helyének földrajzi hosszúsága és a hely zónaközepe (nálunk Görlitz, $\lambda_Z = -15^\circ$) közti különbségből számítható a

$$d\lambda = \lambda - \lambda_Z = 18,0514 - 15,00 = 3,051 \text{ [szögfok]} \approx$$

$$\approx 4 \cdot 3,051 = 12,206 \text{ [időperc]}$$

földrajzi hosszúságkülönbség. Itt a $d\lambda$ szögtávolság, a napóra λ és a zónaközép λ_Z helye ugyancsak fokok-

ban mérve. Ebből a szögtávolságból az az időkülönbség adódik, amennyivel több a napóra helyén a τ_H *valódi helyi idő* a zónaközép valódi helyi idejénél (ha a napóra a zónaközéptől keletre van). Ez a különbség egyébként megegyezik a napóra helyének és a zónaközépnek megfelelő középideők különbségével is. Emiatt szokás olyan napóraskálát is alkalmazni, amelyről ezzel a hosszúságkülönbséggel javított zónaközép szerinti középideőt lehet leolvasni. Ilyenkor ennyivel kisebb számok kerülnek a skálavonalra. Másként fogalmazva, ha a keleti $\lambda \geq 15^\circ$, akkor a skálavonalak az óramutató járásával ellentétes irányba kissé elfordulnak és picit az óravonalak szögtkülönbségei is módosulnak. Ha a zónaközép középidejéhez hozzászámítjuk az időszerű naptári napnak megfelelő IE [perc] *időegyenleg* értékét, megkapjuk a zónaközép t_H *helyi idejét*. Ha ehhez még hozzávesszük a földrajzi hosszúságkülönbségnek megfelelő $d\lambda$ időkülönbséget, a napóra helyén érvényes, az adott t_Z zónaidőnek megfelelő valódi helyi időt kapjuk. A Nap helyzet adatainak (m magassági szög, Az irányyszög) meghatározásához ezt a t_H helyi középideőt kell még átszámítani a 4 perc/fok váltószámmal időszöggévé. A valódi helyi időnek megfelelő τ_H *óraszög* esetén azt is figyelembe kell venni, hogy számítástechnikai kényelem miatt előírt feltétel a déli 12,00 órának megfelelő $\tau(12)$ *óraszög* = $0,00^\circ$. Így

$$\tau_H = 15 \cdot (t_Z - 12,00) + IE - d\lambda \text{ [fok,ff]}.$$

Az IE korrekciót is tartalmazó napórák skálavonalai már nem egyenesek, mint a helyi időt mutatóké, hanem elnyújtott 8-asra hajazó, vagy „S” alakú görbék adódnak óravonalaként.

A tervezés

A valódi Nap látszólagos napi pályáivének meghatározásához – és így a skálaszámításokhoz – ismerni kell a Nap δ *deklinációértékét* is. Az IE [°] és δ [rad] pontos számítására hosszú – meg még hosszabb képletek ismeretesek [8]. A napóra tervezéséhez használt kellő pontosságú változatok:

$$IE = 0,0000075 + 0,001868 \cdot \cos P - 0,032077 \cdot \sin P - 0,014615 \cdot \cos(2 P) - 0,040849 \cdot \sin(2 P) \text{ [°]},$$

valamint

$$\delta = 0,006918 - 0,399912 \cdot \cos P + 0,070257 \cdot \sin P - 0,006758 \cdot \cos(2 P) + 0,000907 \cdot \sin(2 P) - 0,002697 \cdot \cos(3 P) + 0,00148 \cdot \sin(3 P) \text{ [rad]},$$

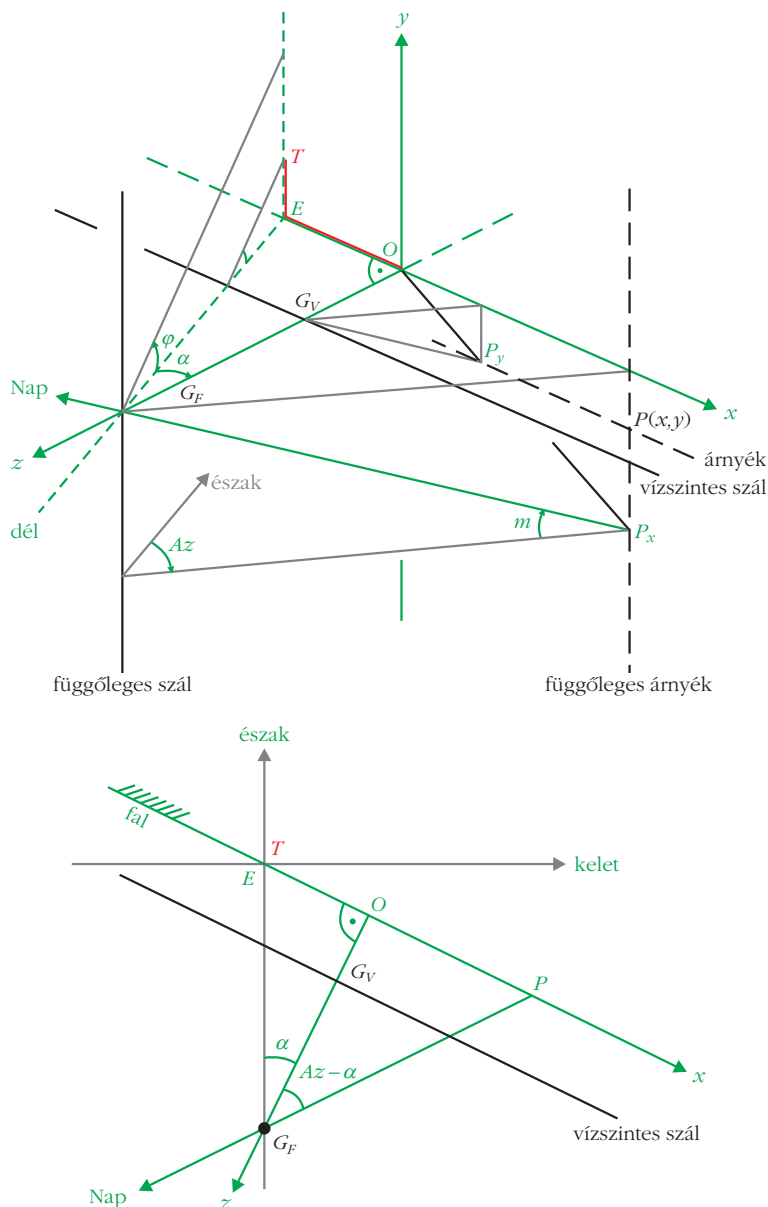
ahol

$$P = 2\pi \frac{D_i - 1}{365} \text{ [rad]}, \quad D_i = 1, 2, \dots, 365,$$

itt D_i a nap évbéli sorszáma jelöli, D_i (január 1.) = 1.

A napi, illetve órai adatokat ezeknél pontosabban megadó képletekre csak a fal tájolásának méréséhez lehet szükség. A deklináció és az időegyenleg éves lefutását – tájékoztatóként – az interneten mellékelt (<http://fizikaiszemle.hu/extra/1807molnar.xlsx>) Excel munkalap ábrája mutatja.

A kétszálás napóra működésének vázlatos megismeréséhez és a skála tervezéséhez kiindulásul egy olyan derékszögű koordináta-rendszert vegyünk fel, amelynek függőleges, felfelé pozitív y és a vízszintes, jobbra pozitív x tengelye (és így az origója is) a fal síkjában van. Az x tengely magassági helyzetét úgy kell megválasztani, hogy az a fallal párhuzamos és a vízszintes árnyékvető szállal azonos magasságban legyen. A függőleges szál helyzete kijelöli a skálafelület azon szélességét, ami a szál árnyékelfogó síktól (a faltól) való távolságából és a Nap vízszintes irányú pályáivéből határozható meg. A gyakorlatban a feladat éppen fordított volt: a fal skálafelületként működő szélességéhez kellett választani a szál faltól való távolságát. A Nap emelkedési mozgásából és az eresz helyzetéből adódó árnyékvándorlás mértéke szerencsére kellő összhangban volt a falrész felhasználható méreteivel. A felvett koordináta-rendszer falra merőleges z tengelye illeszkedik a függőleges szálhoz, amelynek faltól való távolsága az adott esetben $z = G_F = 44,7$ cm. Az eresz csatorna árnyékvető éle a faltól $z = G_V = 119,0$ cm távolságra és a talajszint felett $\sim 266,0$ cm magasságban van. A rendszer geometriai elrendezésének térbeli vázlatát és vízszintes vetületi nézetét a 2. ábra mutatja.



2. ábra. A térbeli elrendezés vázlatrajzai.

A számítások

A skála számítási munkájához célszerű Excel táblával dolgozni. Nemcsak a könnyen használható, beépített trigonometriai és egyéb függvényei, hanem a jól kezelhető rajzolási lehetőségei miatt is. A használt csillagászati és ábrázoló geometriai összefüggések részletezéseit, meg egyebeket is az irodalomjegyzék szerinti művek tartalmazzák.

Ismeretes, hogy a Nap vízszintes síkban értelmezett Az irányszögét a

$$\operatorname{tg} Az = \frac{\sin \tau}{\sin \varphi \cos \tau - \cos \varphi \operatorname{tg} \delta}$$

képlettel határozhatjuk meg. A skálapontok sorozatos számításaihoz érdemes a

$$\operatorname{tg} \left(\frac{Az}{2} \right) = \frac{\cos m + \cos \varphi \sin \delta - \sin \varphi \cos \delta \cos \tau}{\cos \delta \sin \tau}$$

képlettel számolni, mert az inverz tangens függvény többértelműsége miatt a végeredményt tekintve ezzel lesz kevesebb gondunk.

A Nap magassági szögét a

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

képlettel számoljuk [9].

Az előkészítés után lássuk a szálarányékok $P(x, y, t)$ metszéspontjának koordinátáit, azaz a skálapontokat. Az elvben végtelen hosszú, függőleges árnyékvető szál falon képződő árnyéka egész nap függőleges (és önmagával párhuzamos) marad, de a Nap vízszintes mozgásából adódóan balról-jobbra vándorol. Az árnyékvonallal mindenkor vízszintes x koordinátáját az

$$x = G_F \operatorname{tg} [Az(\tau) - \alpha]$$

összefüggés adja.

A vízszintes szál árnyékára az

$$y' = \frac{-G_V \operatorname{tg} m}{\cos(Az - \alpha)} < 0$$

és a $-\infty < x < \infty$ összefüggések igazak, amelyek a 2. ábrából származtathatók.

Az óravonalak Z skálásögeire ugyan közvetlenül nincs szükség, de többféle módon is meghatározhatjuk az időegyenleges korrekciók alapját képező skála-egyeneseink szöghelyzetét. Az Excel miatti numerikus módszer szerint a skálavonal két ismert pontjához tartozó koordinátákból a $\operatorname{tg} Z = \Delta x / \Delta y$ képlettel számolhatunk. Analitikusan a

$$\operatorname{tg} Z = \frac{G_F \cos \varphi}{G_V \cos \alpha} \frac{\operatorname{tg} \tau}{1 + \sin \varphi \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \tau},$$

$$x_T = G_F \operatorname{tg} \alpha,$$

$$y_T = G_V \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\cos \alpha}$$

képleteket használhatjuk, ahol τ a skálavonalhoz tartozó időszög, T a fiktív dőféspont. A március vége – október vége közti nyári időszakban a napóra egy órával kevesebbet mutat, mint például a mobiltelefon órája. Ezt egyszerűen, kettős feliratozással lehet ki-egyenlíteni.

A munkalap

Ha csak az órás-félórás skálavonalak *egyeneseit* akarjuk felrajzolni, elég lenne például a deklinációs szög két szélsőértékéhez tartozó pontokkal foglalkozni. Mivel az időegyenleges korrekció az egyenes óravonalakat elnyújtott „S” alakú (vagy 8-asra hajazó) görbéké formálja, ezekhez a skálavonalak pontjait már sűrűbben kell kijelölni.

A skála óravonalainak koordinátáihoz a legegyszerűbb út, ha először az év egyes D_i napjaihoz ($1 \leq D_i \leq 365$, $\Delta D \sim 5\text{--}10$ nap) tartozó δ_i Nap-deklináció és IE_i időegyenleg napi átlagos értékét határozzuk meg. Ezt követően az egyes napok t_j időpillanatbeli skálavonalaihoz (célszerűen $4 \leq j \leq 20$, $\Delta t \sim 15\text{--}60$ perc) a megfelelő $\tau_{ij}(D_i, IE_i, \lambda \text{ stb.})$ óraszögeket, valamint a Nap ezekhez tartozó m_{ij} magassági és Az_{ij} irányszögeit számoljuk ki. Majd ezeket felhasználva a szálak árnyékának metszéspontjait számoltatjuk. Végezetül egy-egy t óravonal köré a zónaidő szerint rajzolando nyolcas görbe $P(t, x, y)_{ij}$ pontjainak koordinátáit kell meghatározni a (τ, m, A) értékcsoportha való hivatkozásokkal, majd ugyancsak egységenként kezelve másol-
gatni. A feltöltött kéthasábos (x, y) és a háromhasábos (τ, m, Az) értékcsoporthat célszerű együtt kezelni.

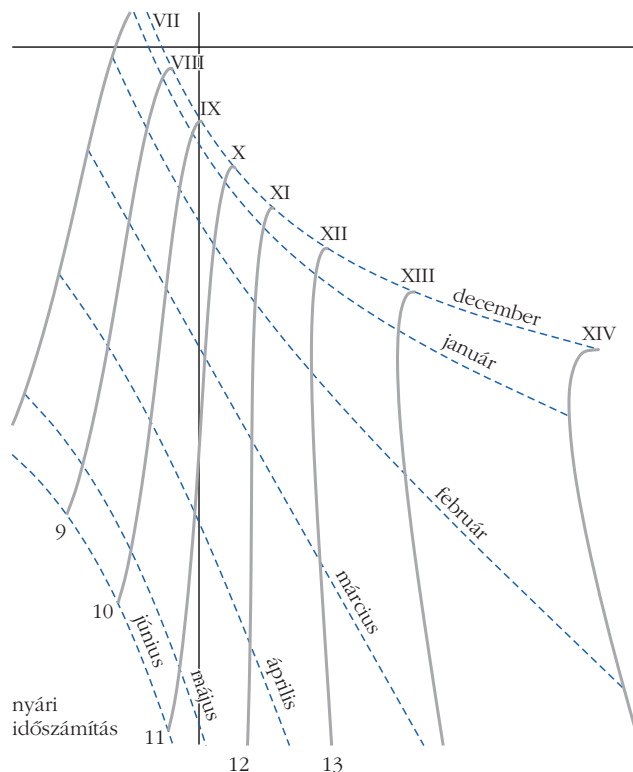
Ha elkészült az óravonalak $P(x, y)$ táblázata, jöhet a válogatás a Zodiákus hiperboláinak pontjaihoz. A meglévő részből kell összeválogatni a kívánt deklinációkhoz tartozó értékpárokat és a hivatkozásaikat olyan elrendezésű táblázatba kell összerendezni, ami

az Excel rajzolási igényét figyelembe veszi. Eme napi vonalak Nap deklinációjától függő sűrűsége erősen változó, ezért általában csak havi-kétheti gyakoriságú időközökkel érdemes felrajzolni. Még a nem túl sűrű és feliratozott íves óravonalak is nehezen értelmezhető kusza látványt eredményezhetnek. Ezért én csak a két állatövi jegyhez igazodó skálavonalat, azaz a téli és nyári napforduló szélső íveit és a tavaszi/őszi napéj-egyenlőség egyenesét tettem a falra. További lehetőségként az Állatöv nevezetes osztáspontjaihoz tartozó $\pm(23,45; 20,31; 11,73)$ és a $0,0$ fokos deklinációk hét folytonos görbét, vagy a hónapok kezdőnapjához tartozó 12 görbének csak az óravonalakhoz tartozó pontjait érdemes rajzoltatni. Némiképp kiegészítő adatok miatt így a rajzfelületen körülbelül 25–30 görbe lesz.

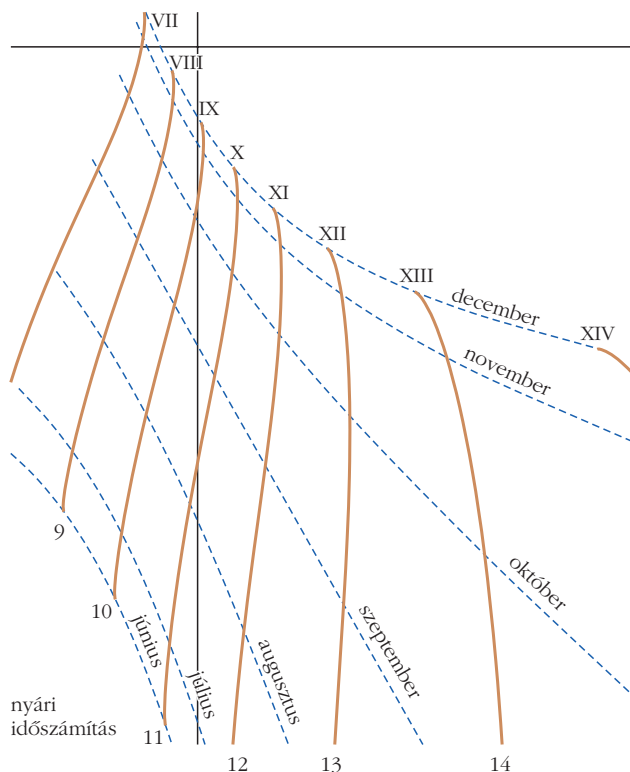
Az egyes órákhoz tartozó $P(x, y)$ oszloppárokat egyenként kell felvenni a tervezési menüfül adatmezejébe. Nyilván csak idő és türelem kérdése (az Excel bírja, rajzolási tudománya elegendő és jól is használható...), hogy az egész értékű skálavonalak mellé akár további fél- vagy negyedórás osztásvonalak kerüljenek. A hiperbolákat is ugyanígy egyenként kell beiktatni a tervezési menüfül adatmezejébe.

A skálakép tervezésekor az év egészére, első, illetve második felére vonatkozó skálárész óravonalainak adattartományát a nyomtatás előtt ki kell választani. Ehhez a teljes évi táblázat megfelelő soraira kell korlátozni a rajzolando részt. A váltást a képernyőn úgy lehet kényelmesen kivitelezni, ha egy külön oszlopba feltételtől függőként másoltatjuk a korrekcióra szánt IE időegyenlegrészt. Ehhez a váltáshoz a HAO logikai függvényeket lehet jól használni, akár csak a választható helyi és a zónaidő közti váltáshoz. A 3. ábrán látható skála esetén az azonos napi időbeli árnyékmet-széspontok lefelé haladnak a december-június közti első féleves időszakban, miközben a Nap deklinációja folyamatosan növekszik. A 4. ábra skálavonalain az azonos időbeli árnyékmet-széspontok felfelé másznak a június-december közti második féleves időszakban, amikor a Nap deklinációja csökken. A már említett – <http://fizikaiszemle.hu/extra/1807/molnar.xlsx> webhelyen mellékelt – Excel munkalap táblázata a nyolcas korrekció jellegére kérdez: milyen legyen? igen – nem – 1. félév – 2. félév – délben válaszok közül szándékunk szerint kell választani. Választani kell a helyi idő – zónaidő szerinti skálázási lehetőségéből, továbbá külön kell nyilatkozni a félórás óravonalak kívánatos alakjáról is: egyenes vagy nyolcas legyen? Mindez, némi „macerás piszmozgást” igényel, de ettől az érdeklődőt megkíméli a mellékletként szereplő munkafüzet, csak az új alapadatokat kell beírni. Ezután mozgósítva az Excel rajzoló képességeit, a különálló munkalapon, léptékhe-
lyes, feliratozott stb. skálát kapunk. Ezt papírra nyomtatva rajzsablonként használhatjuk. Ám a fal feliratozását és díszítését gyorsabb és kényelmesebb közvetlenül, csak a falon megvalósítani.

A képernyőn már elfogadhatónak tűnő skálaraajz két csapdát tartalmaz! A fő gondot az okozhatja, hogy az alkalmanként beírt (új) alapadatoktól függően a skála egyes óravonalaihoz tartozó néhány (x, y) értékpár 1-1



3. ábra. Az I. félévi skála rajza (a fényképen ezüst színű).



4. ábra. A II. félévi skála rajza (a fényképen bronz színű).

tagját ideiglenesen törölni kell, mert egyes görbék önmetsződését (arcsin, arctg stb.! és előjelek miatt) leg-egyszerűbben így lehet megszüntetni. Alkalmazható módszer az is, ha egyes vonalak rajzolási tartományát alkalmanként módosítjuk. A másik gond, hogy a (gép + képernyő + nyomtató) rendszer ritkán van pontosra kalibrálva. Ezért a papírra szánt, rajzsablonként használható nyomtatott x és y tengelyeinek léptékazonosságát ellenőrizni kell. Szükség esetén a kinyomtatott skálarajz méretarányát még a képernyőn kell megfelelőre, esetleg több lépésben is módosítani.

Magától értetődik – de azért érdemes külön is megjegyezni –, hogy mindezek a számítások és lehetőségek használhatók a $G_V = G_F$ esetben is, azaz egy hagyományos, elvben gnomon formájú árnyékvetít alkalmazó fali napóra meglehetősen egyedi formájú megvalósításakor is.

További érdekes kiegészítés (alkalmazási lehetőség), ha az árnyékvetítő eresze helyett valódi árnyékvetítő szálat (vékony, egyenes fém pálcát, betonvasat vagy kötelet, láncot) használunk. Kisebb méretek esetén a végeinél megtámasztott fém pálcát jó lehetőség, de ha behajlik, érdemes ténylegesen behajló, jól látható (parabolával közelíthető) láncgörbét alkalmazni. Ekkor a függőleges szálnál a falhoz közelebb, azzal párhuzamosan felfüggesztett lánc változó magassága miatt az árnyékpontok korábban kiszámított y koordinátáját egy $+p_{4U}$ paraméterű járulékos másodfokú taggal kell növelni:

$$y = -\frac{G_V \operatorname{tg}(m)}{\cos(Az - \alpha)} + p_{4U} x^2.$$

Ha a lánc két végpontja közti távolság H [cm], a belógása B [cm], akkor

$$p_{4U} = \frac{4B}{H^2} \left(1 - \frac{G_V}{G_F} \right)^2.$$

Ha a lánc közepét kellő módon megterheljük, úgy az eredetileg vízszintes ($y = 0$ koordinátájú) árnyékvetítő szálat helyett az origóhoz illeszkedő V alakot kaphatunk. Ennek hatását egy $+p_{4V}$ paraméterű elsőfokú járulékos taggal kell figyelembe venni:

$$p_{4V} = \frac{2B}{H} \left(1 - \frac{G_V}{G_F} \right)$$

és ekkor

$$y = -\frac{G_V \operatorname{tg}(m)}{\cos(Az - \alpha)} + p_{4V} x.$$

Ezeket a változtatásokat a csatolt Excel táblázat *U skála* és *V skála* nevű munkalapjai tartalmazzák.

Zárszó

A siófoki kétszázas napóra terv szerint készített skálavonalai papíralapon jelentek meg közvetlenül látható-fogható A4 méretű lapon, továbbá az Excel generálta vektoros formában digitális adathordozón. Ennek

alapján készült egy nagyítás 1:1 léptékű papírlap formájában. Ezt kellett a falra másolni, majd akrilfestékkel felfesteni, hogy az 1. ábra szerinti fénykép elkészülhessen.

Irodalom

1. Dominique Collin: Theorie sur le cadran solaire bifilaire vertical declinant. *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada* 94/3 (2000) 95–111.
—: *Les cadrans solaires bifilaires a gnomons rectilignes quelconques*. Société Astronomique de France, Calais (2002)
—: Theorie sur le cadran solaire bifilaire généralisé. *Observations & Travaux* 55 (2003) 12–31.
—: *Vers une finalisation des cadrans bifilaires a fils rectilignes*. Société Astronomique de France, Nice (2005)
2. Peter Duffett-Smith: Practical astronomy with your calculator. Cambridge, University Press, Third edition 1988, reprint 1995.
3. G. Ferrari: A curious property of bifilar sundials. *The Compendium* 7/4 (2000) 11–16.
4. Rafael Soja Gaya: Application de la méthode analytique aux tracés de cadrans solaires bifilaires. *Analemma* 32
5. M. A. Hacer: Relojes de sol bifilares. *Analemma* 2 (1991) 16–19.
6. Lothar Loske: *Die Sonnenuhren*. Springer Verlag, Berlin (1970)
7. Hugo Michnik: Theorie einer bifilar-sonnenuhr. *Astronomische Nachrichten* 217/5190 (1923) 81–90.

8. Jean Meeus: *Astronomical formulae for calculators*. Willmann-Bell, Richmond (1988)
—: *Astronomical algorithms*. Willmann-Bell, Richmond (1991)
9. Molnár János: *A napórakról*. Kairosz kiadó, Budapest (2012)
10. J. Moreno Bore: Relojes bifilares horizontales. *Analemma* 18 (1997) 3–8.
—: Ampliación del concepto de relojes bifilares a relojes de dos superficies... *Analemma* 16 (1996) 3–7.
11. B. Rouxel: Cadrans bifilaires: étude géométrique. *Cadran Info de la CCS de la SAF* 9 (2004)
12. F. W. Sawyer: Bifilar gnomonic. *Journal of the British Astronomical Association* 88/4 (1978) 334–351.
—: *Of analemmas, mean time and the sundial*. Sciatheric Notes North American Sundial Society Press (1998)
13. Henz Schumacher: *Sonnenuhren*. Callwel (1985)
14. Arnold Zenkert: *Fascination sonnenuhr*. VEB Verlag Technik, Berlin (1984), Verlag Harri Deutsch, Thun (1995)

Hasznos internetcímek

<http://2.iap.fr>; <http://astro.unibas.ch>; <http://astrosurf.com>;
http://cadrans/_solaires.scg.ula; <http://nass.com>; <http://val.ca>;
<http://cadrans-solaires.org>; <http://de-zonnewijzerkring.nl>;
<http://gnomonica.org>; <http://infraroth.de>; <http://home2.scarlet.de>;
<http://members.kabsi.at>; <http://members.ping.at>; <http://sonne.de>;
<http://orologisolari.it>; <http://shadowspiro.com>; <http://wikipedia.hu>;
<http://sundials.co.uk>; <http://sundials.org>; <http://sundialsoc.org.uk>

TÍZ ÉVES AZ ELTE FIZIKA DOKTORI ISKOLA »FIZIKA TANÍTÁSA PROGRAMJA« GYAKORLÓ FIZIKATANÁROK SZÁMÁRA

Juhász András – ELTE Anyagfizikai Tanszék

Tél Tamás – ELTE Elméleti Fizikai Tanszék és MTA–ELTE Elméleti Fizikai Kutatócsoport

Az ELTE Fizikai Intézet Tanácsa és a Fizika Doktori Iskola 2007 tavaszán elfogadta a Fizika tanítása programot, mint a három korábbi kutatási programmal (anyagtudomány, részecskefizika és statisztikus fizika) egyenértékű, önálló doktori diszciplínát. Ezzel kifejezte, hogy a szak módszertani képzést éppen olyan fontosnak tarja, mint a három nagy kutatási terület bármelyikét. A 2007–2008 tanévben szervezett formában elindult a fizikatanári doktori program. A cél olyan, a fizika tudományában és a szak módszertan

területén egyaránt jól tájékozott szakemberek képzése, akik képesek a fizikatanítás megújítására, a diákok érdeklődésének felkeltésére, a magas szintű tehetséggondozásra, tananyagfejlesztésre, új tanítási programok és módszerek kidolgozására [1]. A célok – az eredményesnek tűnő első lépések megtétele után is – változatlanul aktuálisak. A folytatás szempontjából minden bizonnyal hasznos lehet az eltelt tíz év mérlegének elkészítése, a tapasztalatok összegzése. Az alábbiakban összefoglaljuk a doktori program dokumentált eredményeit, a 10 évnyi működés tapasztalatait, majd a képzésben résztvevők körében végzett felmérésünk eredményét ismertetjük.

A tanulmány elkészítését a Magyar Tudományos Akadémia Tanításg-pedagógiai Kutatási Programja támogatta.



Juhász András az ELTE Anyagfizikai Tanszék nyugalmazott egyetemi docente. Elsősorban fizikatanár-jelöltek szaktárgyi alapozásában és szak módszertani képzésében dolgozott. Kutatómunkája is ehhez, valamint az anyagtudományhoz kapcsolódott. Több mint 160 tudományos cikke mellett szak- és ismeretterjesztő könyvek (társ)-szerzője, szerkesztője. A Fizika Tanítása doktori program 2007-es megindításának kezdeményezője. 2016 óta az MTA–ELTE Fizika Tanítása Kutatócsoport tagja.



Tél Tamás az ELTE-n szerzett fizikus diplomát 1975-ben. Azóta – külföldi vendégkutatói tartózkodásaitól eltekintve – az ELTE Elméleti Fizikai tanszékén dolgozik különböző beosztásokban. Kutatási témái a nemegyensúlyi rendszerektől a klímadinamikáig terjednek. 2007 óta vezeti a Fizika tanítása doktori programot, 2011 óta az MTA–ELTE Elméleti Fizikai Kutatócsoportot. 2016 óta az MTA–ELTE Fizika Tanítása Kutatócsoport vezetője.

A doktori program „iskolaszerű” működése, dokumentált adatai, eredményei

A Fizika tanítása doktori programra az eltelt 10 év alatt 56 fő iratkozott be és 43 fő folytat/folytatott kitarató tanulmányokat, közülük 39-en gyakorló középiskolai tanárként, 4-en a BSc képzésben dolgozó oktatóként. A program nyitott minden hazai fizikatanár és a határon túl magyar nyelven fizikát tanító pedagógus előtt. Doktoranduszaink közel 60%-a korábban az ELTE-n végzett, a többiek nagy vidéki egyetemeken (Debrecen, Pécs, Szeged), illetve a határon túl diplomáltak. Az elmúlt tíz évben 13 jelölt védte meg sikeresen disszertációját és nyert PhD fokozatot, 5-en közvetlenül a védelem előtt állnak, 16 fő disszertációja befejezésén dolgozik.

A tanári doktori képzés működését alapvetően az ELTE Doktori Szabályzata határozza meg, de néhány vonatkozásban különbözik más doktori programoktól. Ilyen lényeges különbség, hogy doktoranduszaink aktív tanárok, akik iskolai munkájuk mellett végzik tanulmányaikat és kutatómunkájukat. Mivel munkaviszonyuk van, ösztöndíj-támogatást nem kapnak, sőt a külső kutatóhelyekre vonatkozó mértékben a részvétel térítésköteles is. A doktori képzés két munkaterületre koncentrál: az első négy félévben a résztvevők korábbi szakmai ismeretei felfrissítésére és látókörüknek a mai fizika válogatott fejezeteivel történő bővítésére helyezzük a hangsúlyt. Ezt szemeszterenként 4 (összeségében $4 \times 4 = 16$), speciálisan tanárok számára szervezett előadássorozat és számos, a fizika tanításához kapcsolódó egyéni feladat (szakanyagok, számítógépes segédanyagok, programok készítése, oktatási kísérletekben történő részvétel stb.) szolgálja. A doktori iskola hallgatói minden hónapban egy szombati napot előadások hallgatásával töltenek az egyetemen. A kurzusok témáit úgy igyekeztünk összeállítani, hogy a fizikatanítás alapvető kérdései, módszertani lehetőségeinek áttekintése mellett, a fizika új, a tanárok és a középiskolás diákok számára is érdekes területeibe adjunk betekintést. A 4×4 kurzusról a doktori program hon-

lapján, <http://csodafizika.hu/fiztan> található részletesebb tájékoztatás. Ugyanitt, a *Közkincs-Hallgatók szakmai anyagai* (<http://csodafizika.hu/fiztan/kozkincs/szakmhallg>) menüpont kínál válogatást a doktoranduszok elektronikus oktatási anyagaiból, és ugyanígy „közkincs”-ként letölthetők a hallgatók magyar és angol nyelvű publikációi.

A doktori programhoz kapcsolódó akkreditált tanártovábbképzés

A doktori képzés előadássorozatára alapítva már négy éve működik a félévente 60 órás akkreditált tanártovábbképző tanfolyamunk: <http://pedakkred.oh.gov.hu/PedAkkred/Catalogue/CatalogueDetails.aspx?Id=5268>.

Az erre jelentkező tanárok ugyanazokat az előadásokat látogatják, mint a doktoranduszok, de a tanfolyam teljesítésének követelményei természetesen alacsonyabbak a doktori követelményeknél. Azok, akik a tanfolyam tapasztalatai alapján úgy döntenek, hogy a teljes doktori képzésre átjelentkeznek, megtehetik. A rendszer – úgy tűnik – működik. Az utóbbi évek doktoranduszai közül többen a tanártovábbképző tanfolyamon kaptak kedvet a munka folytatásához.

A tudományos kutatómunka gyakorlata

A doktori munka második része a doktorandusz által végzett tudományos igényű kutató-fejlesztő munka. E munka során kapott eredményeket a doktorandusz először a szakmai közönségnek szóló angol és magyar nyelvű publikációkban kell megjelentesse, majd összegezve, tézisekbe szervezve disszertációban is összefoglalja. A jelölt kutatómunkáját tudományos fokozattal rendelkező egyetemi oktató, témavezető irányítja és segíti. A gyakorló tanárok számára, az iskolai tanítás mellett, a doktori munka kutatási része a nehezebb. Ez a munkafázis még a legjobbak esetében is évekre elhúzódik, aminek – sajnos – érthető velejárója lehet a végleges lemorzsolódás is. Az okok bizonyára összetettek. Az első nehézséget az okozza,

1. ábra. A Fizika Tanítása Program által szervezett konferenciák referált kiadványai.



hogy a jelöltek napi iskolai munkájától eleinte távol áll a sajátos protokollal rendelkező kutatómunka [2, 3]. Aki mégis vállalja, az az egész folyamat és a téziseik megalkotása során megérti, hogy mit jelent a tantárgy-pedagógiai kutatás, egy új tudományos eredmény elérése. A megvédett disszertációk és az alapjukat adó tézisek a honlapon megtalálhatók.

A kutatási munka másik nehézsége, hogy a tanárok nehezebben értelmezik az egyéni kutatómunka szoros és lényegi kapcsolódását a hazai és nemzetközi szakmai közösséghez. Az egyéni eredmények értékét a szakmai közösség előtti bemutatás, illetve az utóbbi részéről történő elfogadás adja meg. E megmérettetés legfontosabb fórumát a referált külföldi és hazai folyóiratokban, lektorált kiadványokban megjelenő publikációk jelentik.

A doktori iskola része, hogy a tanárok rendszeresen részt vesznek hazai és nemzetközi konferenciákon, ahol eredményeik megismertetésén túl szakmai kapcsolataikat is bővíthetik. A Doktori Program az elmúlt években négy nemzetközi konferenciát szervezett, illetve vett rész annak szervezésében. A magyar nyelvű konferenciákon a hazai fizikatanárok mellett a határokon túli területekről is jelentős számban jöttek kollégák, az angol nyelvű konferencia résztvevőinek köre egész Európára kiterjedt. A konferencia-előadások referált írott változata (*1. ábra*), mintegy 2000 oldalnyi összterjedelemben, nyomtatásban is megjelent, és a Doktori Program honlapjáról elektronikus formában is letölthető.

A Fizika Tanítása Doktori Program a hallgatói vélemények tükrében

A tíz éve folyó doktori program értékelése szempontjából legfontosabb tényező a résztvevők véleménye. Ennek összegyűjtésére minden beiratkozott résztvevőnek – függetlenül attól, hogy hol áll a képzési folyamatban – 25 kérdést tartalmazó elektronikus kérdőívet küldtünk ki, és kértük annak anonim kitöltését. A kérdések a doktorandusztanárok iskolai helyzetének felmérésére, a doktori program tartalmi véleményezésére, a vállalt terhelés mértékére, a doktori képzésben végzett munka tényszerű eredményeinek összegző felmérésére és a képzés hasznosságának szubjektív megítélésére vonatkoztak. Kérdőívet az 56 címzett 70%-a (39 fő) küldte vissza. Az alábbiakban ezek lényegi tapasztalatait foglaljuk össze. A teljes kérdőív a kapott válaszok összesítésével a <http://csodafizika.hu/fiztan/kerdoiv.pdf> linken tekinthető meg.

A doktori munka motivációja és annak iskolai elismerése

A válaszok szerint jelentkezéskor elsődlegesen a szaktárgyi ismeretek felfrissítésének igénye motiválta a kollégákat. Emellett szerepet játszott a tanári életpálya-előmenetel és a szakmódszertani kutató-fejlesztő munka iránti érdeklődés is. A tanári életpályán törté-

nő előmenetel nem közvetlenül kapcsolódik a doktori cím megszerzéséhez. A kérdésekre kapott válaszokból kitűnik azonban, hogy doktoranduszaink munkahelyi előmenetelének sikeressége meghaladja az országos átlagét. Így a doktori program résztvevői közül 2 PhD fokozattal rendelkező kollégánk lett kutatótanár, 7-en mestertanári címet nyertek, 9-en pedig a pedagógus I.-ből átléptek a II. fokozatba. Ennek valószínű oka, hogy a doktori munka jól dokumentált szakmai eredményei megkönnyítik az előrelépéshez szükséges pályázati portfólió elkészítését.

A doktori munka elismerése az iskolavezetés, illetve kollégák részéről nem ennyire egyértelműen pozitív. Az iskolavezetés 11 kolléga esetén közömbösen tudomásul vette tanára jelentkezését a doktori képzésbe, 12 főnél erkölcsileg támogatást adott, bízta, míg 15 résztvevő esetén a képzés költségeihez anyagilag is hozzájárult. A tanártársak részéről iskolán belül mutatkozó szakmai elismeréssel kapcsolatban a végzetek általában pozitívan nyilatkoztak, kiemelve, hogy a közvetlen kollégák szakmai kérdésekben adnak véleményükre, gyakran kérnek konkrét kérdésekben tanácsot, segítséget. (Ezzel szemben volt olyan kolléga is, aki közvetlen kollégái részéről már a jelentkezéstől szakmai féltékenységet érzékelt.)

A doktori kurzusok tartalmi megítélése

Több kérdés is foglalkozott a vizsgaköteles kurzusok tartalmi véleményezésével. A résztvevőktől először azt kértük, hogy az iskolában megszokott ötfokozatú osztályozási rendszer szerint, összességében minősítsék a négy féléves előadássorozatot 16 kurzusát. Ehhez fontos szempontként adtuk meg, hogy a kurzusok témáit azzal a szándékkal állítottuk össze, hogy a résztvevők fizikaszemléletét szélesítsék, de egyúttal az iskolai munkában is hasznosíthatók legyenek. A beküldött 39 válasz osztályzatainak átlaga 4,6.

Ezután egy-egy pontban külön rákérdeztünk, van-e olyan tárgy, amit feleslegesnek és így elhagyhatónak éreznek, illetve mely tárgyat/tárgyakat tartanak kiemelkedően jónak, hasznosnak. Végül megkérdeztük, van-e olyan témakör, aminek feldolgozását a jelenlegi tematikában hiányolják és a jövőben feltétlenül szükségesnek és hasznosnak tartanák. Itt, mivel a képzési idő korlátozott, kértük, nevezze meg azt is, hogy az új témakört melyik jelenlegi tantárgy helyett javasolnák.

A kérdéscsoportra adott válaszok egyértelműen mutatják, hogy a jelenlegi kurzuskínálatban a legnépszerűbbek azok a modern fizikai témák (például *környezeti áramlások fizikája, relativitáselmélet alapjai, kaotikus mechanika*), illetve interdiszciplináris vonatkozású témák (például *fizika a biológiában, energia-termelés és környezet, kooperatív jelenségek – interdiszciplináris vonások*), amelyek a korábbi években az egyetemi tanárképzés tanterveiben nem vagy csak kis súllyal szerepeltek. A válaszadók többsége nem nevezett meg kihagyható tárgyat. A kérdéscsoportra adott válaszok tükrében tehát azt a következtetést lehet levonni, hogy a tantárgyi struktúra lényeges

átalakítására nincs szükség. A válaszadóknak lehetősége volt tetszőleges megjegyzéseket, bővítési javaslatokat is megfogalmazni a kérdőíven. Így megfontolandó észrevételeket, javaslatokat kaptunk a kurzusok belső tartalmának kiegészítésére, a hangsúlyok módosítására is. Ezeket a javaslatokat a következőkben a kurzusvezetőkkel részletesen megbeszéljük, és beépítjük a képzésbe.

A tudományos kutatómunka gyakorlata a Fizika Tanítása Doktori Programban

A munka során az első lépés a kutatási célok és a konkrét munkaprogram meghatározása. Ebben a doktorandusz a témavezetőjétől kap segítséget. A megvalósítás döntő része egyéni feladat, aminek eredményeit a munka lezárásakor egyes szám első személyben megfogalmazott „tézisek” tartalmazzák. A munka alapvetően egyéni jelegű, mégis akkor lehet igazán eredményes, ha azt sikerül beágyazni a szakmai közösségbe. Úgy látjuk, hogy ez utóbbi megvalósítása a gyakorlatban nem egyszerű. Fontosnak tartjuk tehát, hogy szoros munkakapcsolat alakuljon ki a doktorandusz és témavezetője között, illetve nyitott, segítőkész együttműködés a doktoranduszok között. Ez utóbbi azért is kiemelten fontos, mert a szakmódszertani kutató-fejlesztő munka lényegi részéhez tartozik a feldolgozott új témák, témakörök, illetve új módszerek iskolai kipróbálása is, amiben a társak segítsége rendkívül fontos. Kérdőívünk rákérdez a témavezetővel, illetve a doktorandusztársakkal kialakult munkakapcsolatokra. A válaszok azt mutatják, hogy a témavezetőkkel kialakított kapcsolat jó. A mentorok megfelelő segítséget adnak a doktori munkához és az eredmények szakszerű publikációjához egyaránt. A doktorandusztársakkal kialakított munkakapcsolatok vonatkozásában a válaszok azonban nem ilyen kedvezők. Aktív, egymást segítő munkakapcsolatot a válaszadók körülbelül 40%-nak sikerült kialakítania kollégáival. A doktoranduszok felének csak laza (formális) kapcsolata van, míg körülbelül 10% sajnos úgy nyilatkozott, hogy semmilyen munkakapcsolata sincs.

A kutatási eredmények igazi értékmérője a szakmai nyilvánosság. A tapasztalatok szerint a gyakorló tanárok anyanyelvi szóbeli kommunikációs készsége kiváló, a szócikkek megírása azonban nehezebben megy. Fokozottan igaz ez a nemzetközi előadások és cikkek vonatkozásában. A doktori képzés részeként nagy hangsúlyt fektetünk arra, hogy doktoranduszaink közvetlen szakmai tapasztalatokat szerezhessenek külföldön is [4]. Ezt segítő eddig 1 erdélyi, 3 nyugat-európai és 1 kanadai egyetemmel alakítottunk ki közvetlen együttműködést, aminek keretében mód nyílik rövid tanulmányutakra, közös kutatási munkákra, publikációkra is.

Kérdőívünk kiterjedt a külföldi tanulmányutak, a nemzetközi és hazai konferenciákon történő részvétel és a publikációk felmérésére is. A 39 visszaküldött válasz alapján az összesített adatokat az 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat A PhD hallgatók publikációs és konferencia-aktivitása ¹	
angol nyelvű külföldi közlemények száma	81
külföldi szakmai rendezvények	
részvételek száma	79
előadások	55
poszter-előadások	19
magyar nyelvű közlemények száma	192
hazai szakmai rendezvények	
részvételek száma	173
előadások, bemutatók	161

¹ 39 választ adó alapján.

Itt érdemes megjegyezni, hogy az esetek többségében az eredményes doktori munka a sikeres véddel nem záródik le. Sőt, a folytatáshoz általában minden érdekelt részéről megvan az igény. Jelenleg a folytatás lehetősége korlátozott mértékben adott a Doktori Program bázisán szerveződött MTA–ELTE Fizika Tanítása Kutatócsoport keretében <http://mta.hu/tantargy-pedagogiai-kutatasi-program/mta-elte-fizika-tanitasa-kutatocsoport-107105>. A kutatócsoport 2020-ig szólon „próbaidős” jelleggel működik az MTA anyagi támogatásával. Nagyon fontosnak tartjuk, hogy a szakmódszertani kutatás ezen formája az MTA támogatásával hosszú távon és rendszerszerűen működjön. Meggyőződésünk, hogy az erre fordított támogatás országos szinten és komplex módon hasznosul: a sikeres szakmódszertani kutatás támogatásán kívül hatékony segítséget jelent a doktori program jelenlegi működéséhez (doktoranduszok részvételi költségeinek támogatása külföldi konferenciákon, szakmai rendezvényeken, nemzetközi kutatási együttműködések kialakítása, a doktori munkák eredményeinek gyakorlati kipróbálását jelentő oktatási kísérletek finanszírozása stb.). A Kutatócsoport létezése egyúttal hátteret adva stabilizálja az egyetemi tanárképzés helyzetét is.

A fizikatanítás megújulásának fontos feltétele a tanárok szaktárgyi tájékozottságának szélesítése. A kérdőív két kérdésében arra kértünk választ, hogy a résztvevők e téren miként értékelik a doktori program munkáját:

„Változtatott-e a fizikaszemléletén a doktori program keretében végzett munka?” A 39 válaszadó közül 11 fő „lényeges” szemléletváltozást jelzett, 24-en a „részleges szemléletváltozás”-t, míg négyen szemléletváltozásuk mértékét az „alig” válasszal minősítették. A „nem” feleletet senki nem jelölte meg.

„Változtatott-e a fizika tanításával kapcsolatos szemléletén a doktori program keretében végzett munka?” A válaszadók közül 9 fő „lényeges”-nek, 22 „részleges”-nek minősítette a változást, 5 fő számára „alig” jelentett szemléletváltozást, míg 1 fő szerint „nem” történt ilyen változás.

Megkérdeztük a résztvevőket, összességében miként értékelik azt a terhelést, amit a négy féléven ke-

resztül tartó előadások hallgatása, a vizsgák teljesítése, majd az önálló kutatómunka, az eredmények publikációja (és a disszertáció elkészítése) jelent. A választ négy lehetőség közül lehetett kijelölni. A 39 válaszadó közül 3 fő „irreálisan nagy”-nak értékelte a terhelést (kicsit ellentmondva ennek, más kérdésekre adott válaszaikból kitűnik, hogy mindhárman sikeresen teljesítették az elvárásokat és már védtek, vagy közvetlenül védelem előtt állnak.) A terhelés mértékére a többség (21 fő) „nehéz, de elviselhető” minősítést adott, 14 kolléga szerint a terhelés „elviselhető”, egy válaszadó számára pedig „nem számottevő”.

Arra a kérdésre, hogy ajánlaná-e kollégájának, esetleg szakmabeli hozzátartozójának a jelentkezést az ELTE fizikatanári doktori képzésére, valamennyi válaszadó pozitív értelemben felelt. Többen feltételként fűzték hozzá, hogy csak jól képzett, a munkája iránt elkötelezett és igényes kolléga esetén mernék ajánlani.

A felmérés – a konkrét kérdések megválaszolásán túl – kérte a résztvevőket, hogy írják meg minden észrevételüket, javaslatukat, ami a képzés jobbítását szolgálhatja. Számos ilyen javaslat érkezett, konkrét tartalmi kérdésektől, a vizsgák megszervezésén át, az egyetemi elektronikus adminisztráció nehézségéig. Lehetőség szerint igyekszünk megoldani a felvetett problémákat, az előadók bevonásával megfontoljuk a javaslatokat és, ha lehet, beépítjük a képzési rendbe.

A fentiek alapján úgy értékeljük, hogy a doktori program – bár számos területen javítandó – alapvetően működőképes és eredményes. A hosszú távú eredményes működés azonban külső feltételektől is függ. Így a szaktanárok érdeklődésétől, ezen belül a doktori fokozat oktatáspolitikai elismerésétől, de függ a szakmódszertan terület működésének egyetemi helyzetétől is. Az jelenti az alapvető problémát, hogy az utóbbi évtizedben nyugdíjba vonult kollégák helyét nem lehetett betölteni, és ezért a feladatok folyamatos átadása-átvétele nem zavartalan. Mivel az ELTE helyzete a magyar fizikatanár-képzésben meghatározó, országos érdek, hogy az egyetem biztosítsa a szakmódszertani oktatógárda színvonalas utánpótlását és az ezen a területen végzett munka elismerését.

A doktori program folyamatosságát az előadói kör elöregedése különösen is érinti. A működése az elmúlt 10 évben a jó célokért lelkesedő kollégák önkéntes munkáján alapult, az itt végzett munka nem számított az egyetemi óraterhelésbe és nem járt anyagi elismeréssel sem. Induláskor a 16 előadó között 2 fő volt nyugdíjas, ma 10 fő. 2007-ben a tudományos munkát irányító témavezetők az Intézet főállású okta-

tói voltak, ma felerészben nyugdíjasok [5]. Ilyen feltételek mellett a Fizika Tanítása Doktori Program hosszú távú működése sajnos bizonytalan.

Összegzés

A tíz éve indított Fizika Tanítása Doktori Program szervezőiként a tapasztalatok és a megkérdezett résztvevők véleményét összegezve jó érzéssel állapíthatjuk meg, hogy a befektetett munka oktatói és résztvevői oldalról sem tűnik hiábavalónak. Akár sikertörténetnek is nevezhetnénk, hogy a hazai fizikatanár-képzésben egy komoly terheléssel járó, de értékteremtő, minőségi szintű tanári „elitképzés” szervezett alapjait raktuk le. Természetesen a rendszer nem tökéletes és saját tapasztalatainkat, valamint a résztvevők javaslatait átgondolva igyekezni fogunk javítani azokon a tartalmi és szervezési problémákon, amelyek saját hatáskörben változtathatók. Meggyőződésünk, hogy Magyarországnak szüksége van magas szinten képzett fizikatanároknak. Ennek rendszerszintű biztosításához azonban nem elegendő néhány egyetemi oktató ügy iránti elkötelezettsége, személyes lelkesedése. Szükséges lenne, hogy a hallgatókat az oktatásirányítás hosszú távon támogassa (megpályázható tandíjtámogatás, ösztöndíj, külföldi tanulmányutak költségtámogatása, esetleges iskolai órakedvezmény a tanulmányok idejére), de szükség lenne az egyetemi, kari, intézeti vezetés támogatására is, ami az ország legnagyobb egyetemén hosszú távon biztosítaná a szaktanárok tudományos szintű képzésének anyagi és személyi feltételeit. Mi magunk, az ügyért lelkesedő kollégáinkkal együtt, készen állunk a további munkára.

U.i.: A Fizika Tanítása program előadásai minden érdeklődő tanárkolléga számára nyilvánosak, a helyszín, az előadások címe és ideje a <http://csodafizika.hu/fiztan/index.html> honlapon megtalálható.

Irodalom

1. Juhász A.: Az ELTE Fizika Doktori Iskolája „A Fizika tanítása” címmel PhD-programot indít fizikatanárok részére. *Fizikai Szemle* 57/9–10 (2007) 333–340.
2. Tasnádi P., Juhász A.: Hagyományok és valóság. Szükség van-e tudós tanároknak a természettudományban? *Természet Világa* 141 (2010) 26–29.
3. Tasnádi P.: Motiváció, interpretáció, empátia: oktatási feladatok, tudományos kihívások a természettudományi szakmódszertanban. In: *Tanulmányok a tudós tanárképzés műhelyeiből*. (szerk.: Károly K., Perjés I.), ELTE Eötvös Kiadó, Budapest (2015) 77–91.
4. T. Tél, A. Juhász: Physics Education PhD Program at Eötvös University, Budapest. *Physics Competitions* 12 (2010) 38–39.
5. Tél T.: Tanári doktori program fizika szakmódszertanból az ELTE-n: célok és tapasztalatok. *Új Pedagógiai Szemle* (2015/9–10) 23–29.



**Az Eötvös Társulat
főnt van a facebook-on!**



FIZIKA AZ ÉLŐ TERMÉSZETBEN

Rajkovits Zsuzsanna
ELTE TTK Anyagfizikai Tanszék

Az iskolai oktatásban – célszerűségi megfontolásokból – a természet egészére vonatkozó ismereteket részekre bontva, egymástól elválasztva szervezzük tantárgyi tartalmakká. Az élő és élettelen természet bonyolultnak tűnő világában a diákok a hosszú idő óta elfogadott, akadémiai módon felosztott tantárgyszerkezetnek megfelelően a fizika-, a kémia-, a biológia- és a földrajzórán elsajátított ismeretek segítségével próbálnak eligazodni. E folyamatot könnyebbé tehetjük, ha felhívjuk a figyelmet e tárgyak kapcsolódási pontjaira. A továbbiakban a fizika és az élővilágból vett jelenségek kapcsolatát keressük, de hasonló vizsgálatot végezhetünk más tudományterületek között is.

Biológia a fizikaórán

Manapság, amikor a természettudományok népszerűsége egyre csökken, mérlegelnünk kell azt is, hogy tanításunk során a tantárgyakat diákjaink számára még érdekesebbé, még vonzóbbá tegyük. A sok kínálkozó lehetőség közül egy módszer, ha például „észrevesszük” a fizikát a körülöttünk lévő élő természetben. Minden korosztály számára érdekes lehet és mindkét tantárgy szempontjából hasznos is, ha „meghívjuk” az élővilágot a fizikaórára.

Tehetjük ezt például a fizika néhány törvényének tanítása során azzal, hogy a tanórai fizikai kísérletek mellett „demonstrációként” ismert biológiai jelenségeket is bevezetünk. A segítségükkel megismert fizikai törvények birtokában az élővilág jelenségeit is mélyebben megérthetjük.

Megváltozott a világ. Manapság nem csak az iskola oktat, nem csak a pedagógus az ismeretek fő forrása. A diákot a médiából folyamatosan információáradat éri, amelynek egyes elemeit okosan felhasználhatjuk a fizikaórán. A fizika törvényeire épülő, a minden

tudományágban használatos egyre tökéletesedő vizsgálati technikákkal (nanotechnológia) az élővilág eddig nem ismert finom részletei is feltárnak. Az új eredményekről diákjaink számtalan, igen igényesen illusztrált népszerűsítő könyvből, természetfilmből, de ma már az internetről is, a felfedezést követően szinte azonnal tudomást szerezhettek. Napjainkban – a természettudományok egyes területei közötti kölcsönhatásnak köszönhetően – az újabb felfedezések eredményeit szinte a diákok szeme láttára kell beépíteni egy-egy tantárgy korábban „változtathatatlanak” hitt tananyagába. Ennek lehettünk tanúi a közelmúltban, például amikor a szén módosulatainak tanításakor a fullerének bekerültek a tananyagba.

Nem csak egy-egy fizikai törvény tanításához „vehetünk” példát az élővilágból. Egy-egy élőlény felépítésén, életterének bemutatásán keresztül rávilágíthatunk azokra a fizikai jelenségekre is, amelyek az evolúció folyamatában hozzájárultak ahhoz, hogy az élőlények éppen az adott formában fejlődtek ki. Így lehet a fizika hasznos „vendég” a biológiaórán is.

A biológiai példák a fiatalabb korosztály számára néha csak figyelemfelkeltő jelleggel használhatók, de később, a diákok fizikai ismeretanyagának bővülésével, a felsőbb osztályokban az élővilág jelenségeinek mélyebb elemzésére is sort keríthetünk.

A mindennapi tanári gyakorlatban a hiányzó ismeretek gyűjtéséhez a nagy internetes tapasztalattal rendelkező tanulókat feltétlenül érdemes bevonni. Az így előálló ismeretanyagból tanári segítséggel választhatjuk ki a szakmailag helyes, és a számunkra megfelelő részleteket. A diák érezheti, hogy kutatómunkájával nem csak, mint egyik alanya, de a tanári munka segítőjeként aktív részese is lesz a tanítási folyamatnak. Ez a részmunka, az „együtt-tanulás” egyben jó lehetőség a tanár-diák kapcsolat építésére, jobbítására.

Az alábbiakban a hidrosztatika témaköréhez kapcsolódóan szeretnék mintát mutatni a természettudományok kapcsolódási pontjainak keresésére, s arra, miként használható e módszer a mindennapi tanítási gyakorlatban, a tanórákon, szakköri foglalkozásokon. A témakör először az általános iskolában kerül elő, számos, az alábbiakban ismertetett részlet a hetedik osztályos korosztálynak változatlanul tanítható.

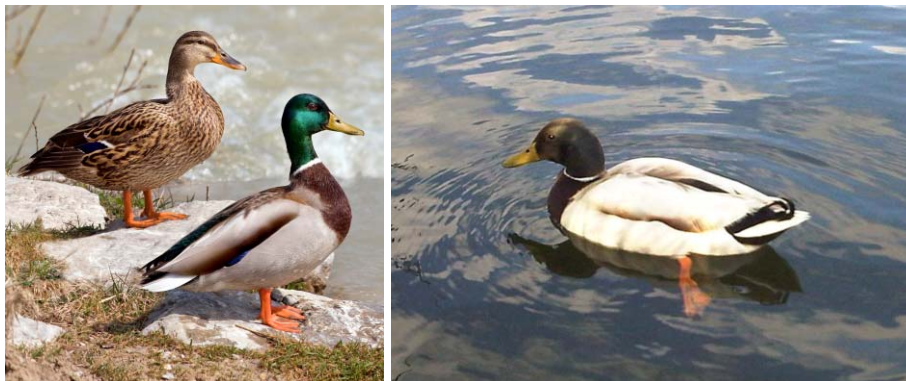
Arkhimédész törvénye az élővilágban

Vízben élnek a Föld legnagyobb testű élőlényei. A kacs a földön totyogva nehézkes madár benyomását kelti. Nem így a vízben! A vízfelszínen könnyedén siklik (1. ábra).

Az írás a szerző azonos című könyve (ismertetve folyóiratunk idei februári számában) alapján készült.



Rajkovits Zsuzsanna PhD, ny. egyetemi docens. Az ELTE kémia-fizika szakán végzett, ahol az Anyagfizikai Tanszék *fémfizikai kutatásaiban* vett részt. Az *oktatáskutatásba* a tehetséggondozás új módszereinek bevezetésével, új típusú tanulmányi versenyekkel kapcsolódott be. 1994-ben *nemzetközi versenyt alapított* (ICYS), amelynek azóta is elnöke. Általános és középiskolásoknak írt újszerű fizika tankönyvek társszerzője, interdiszciplináris szemléletű internetes gyűjtemény összeállítója.



1. ábra. Szárazföldön suta, de a vízen könnyedén sikló tőkés récék.

1. a víznél kisebb sűrűségű testek úsznak a víz felszínén,
2. ha a test sűrűsége meg- egyezik a víz sűrűségével, akkor a test bármely mélységben egyensúlyban van, lebeg,
3. a víznél nagyobb sűrűségű, tömör testek elmerülnek a vízben,
4. a víznél nagyobb sűrűségű anyagból készült üreges testek úsznak a víz felszínén, ha ezek átlagos sűrűsége kisebb a víz sűrűségénél.

Mi okozza ezt a különbséget? A testek a vízben könnyebbek, és mozgásukat a víz sem fékezi annyira, mint ha a talajon sűrűlődnének. A kisebb *sűrűlődség* és a testekre a vízben ható *felhajtóerő* jelentősen befolyásolta a vízi élőlények felépítését, viselkedését. Miért, hogyan?

A válaszhoz először elevenítsük fel az ide vonatkozó fizikai ismereteinket.

A nyugvó folyadékok tulajdonságait a *hidrosztatika* törvényeivel írhatjuk le. A nyugvó folyadékok felszíne a Földön vízszintes, a nehézségi erőre merőleges. A folyadékban egy adott mélységben a nyomás, a *hidrosztatikai nyomás*, a *h* mélységgel egyenesen arányosan nő,

$$p = \rho g h,$$

ahol ρ a folyadék sűrűsége, g a nehézségi gyorsulás értéke azon a helyen. A levegő nyomásával – *Torricelli* kísérlete szerint – 76 cm magas higanyoszlop hidrosztatikai nyomása tart egyensúlyt. A légnyomás értéke a fenti összefüggésből könnyen kiszámítható,

$$p = 10^5 \text{ Pa} = 100 \text{ kPa}.$$

Hasonló módon győződhetünk meg arról, hogy a vízben közelítőleg 10 méter mélyen ugyanekkora a nyomás. Az ott tartózkodó testekre tehát a légköri nyomás kétszerese, körülbelül 200 kPa nehezedik. Minden újabb 10 méter a nyomást 100 kPa-lal növeli.

A hidrosztatikai nyomás következménye a testekre ható *felhajtóerő*, értéke a test folyadékba merülő térfogatának megfelelő térfogatú víz súlya:

$$F = V_{\text{test}} \rho_v g.$$

Úszáskor a testekre ható erők eredője nulla, a nehézségi erőt a felhajtóerő kiegyenlíti. Számítással győződjön meg mindenki maga arról, hogy igazak az alábbi kijelentések:

2. ábra. Az úszóhólyag és helye a hal belsejében.



Víziállatok egyedülálló merülési „praktikái”

A tengerek, óceánok, tavak élővilága igen gazdag, egy-egy vízi élőlény élettere sokszor a vízfelszíntől kezdve több száz méter mély térségekre is kiterjed. Ahhoz, hogy az állat energiáját a leggazdaságosabban használja, a megélhetéséhez szükséges cselekedetekre fordítsa, minden mélységben valamilyen „trükkkel” biztosítania kell – szakirodalmi elnevezéssel – a „semleges úszóképesség” állapotát, ami nem más, mint a mindenkor mélységnek megfelelő lebegés beállítása. A vízmélységgel nő a nyomás, csökken a hőmérséklet, s e körülményekhez minden víziállatnak alkalmazkodnia kellett. Minden tartózkodási helyükön az állatra ható nehézségi erőnek egyensúlyt kell tartania a felhajtóerővel, s ehhez a szabályozáshoz bizonyos fortélyokra van szükség. A víziállatok merülése és felszínre emelkedése gyors folyamat, de a kívánt mélységekben való huzamosabb tartózkodáshoz szükségesek azok a fortélyok, amelyek többnyire az állat átlagsűrűségének változtatásával valósulnak meg.

Vajon a vízben élő állatok milyen fogásokat alkalmaznak átlagsűrűségük változtatására?

A csontos halak

A vízben élő állatok átlagos sűrűsége a vízével közel azonos, ezért a rájuk ható felhajtóerő a nehézségi erőt teljesen kiegyenlíti, lebegnek. Ez a körülmény felépítésükben úgy tükröződik, hogy a csontvázuk tömege a teljes testtömegnek csupán néhány százalékát teszi ki, nincsen szükség olyan masszív tartó szerkezetre, mint amilyen a szárazföldön élő társaiknál tapasztalható.

Míg a halak csontváza a teljes testtömegük körülbelül 8%-a, a vízi és szárazföldi életet is élő békáké körülbelül 11%, addig a nyúlénál ez az érték már a 15%-ot is eléri.

A csontos halak érdekes szerve az *úszás* mélységét finoman szabályzó *úszóhólyag* (2. ábra).

Az úszóhólyag fala figyelemre méltó, rugalmas tulajdonságokkal rendelkezik. A hal az úszóhólyagjával „állítja be” a mindenkori mélységnek megfelelő átlagos sűrűségét. A zárt úszóhólyagot gázzal tölti meg, ha a térfogat növelésére van szükség, ha viszont mélyebbre kerül, az ott uralkodó nagyobb nyomás miatt az úszóhólyag összenyomódik, az állat átlagsűrűsége nő. A hólyag méretével változik a hal térfogata, emiatt *átlagsűrűsége* is.

Akár a gáztörvények tanításánál is használhatjuk a halak merülési szokásait. Hangozzék a feladat a következőképpen: körülbelül 50 méter mélységben a hal úszóhólyagjának térfogata a teljes testtérfogat 5 százaléka legyen. Hányszorosára változik az úszóhólyag térfogata 300 méter mélységben? (A víz hőmérséklet-változásától számításainkban tekintsünk el!)

Az állandó hőmérséklet feltételezése miatt a Boyle–Mariotte-törvény felhasználásával adhatjuk meg a választ. A nyomás 50 méter mélyen 6 atmoszféra, 300 méter mélyen pedig 31 atmoszféra.

$$V_0 \cdot 6 \text{ atm} = V \cdot 31 \text{ atm},$$

$$\frac{V_0}{V} \approx 5.$$

Az úszóhólyag térfogata 300 méter mélységben ötödére csökken. Ezzel a hal átlagsűrűsége az 50 méteres mélységbeli átlagsűrűséghez viszonyítva megnő, különös erőfeszítés nélkül folyamatosan tartózkodhat 300 méter mélyen [1]. A gáztörvények tanításakor ilyen jellegű egyszerű feladatokkal változatosabbá tehetjük a tanítást, mert egyúttal feleleveníthetünk más témákhoz, illetve más tudományterületekhez kapcsolódó ismereteket is.

A cápák

A cápák (3. ábra) porcos halak, nincsen úszóhólyagjuk. Más merülési praktikához kell folyamodniuk. Vázuk már azzal könnyebbé válik, hogy csont helyett porcból áll. De átlagsűrűségük változtatására más lehetőségük is van.

A *cáпамáj* a mindenkori átlagos sűrűség beállításához használt szervük, amely az állat teljes testtömegének akár 25–30 százaléka is lehet (emlősnöknél csak 5 százalék). A cáпамáj körülbelül 70 százalékban a tengervíz-nél kisebb sűrűségű olajokat és egyéb szerves anyagokat (squalene) tartalmaz. A cápa a tartózkodási helyének megfelelő átlagsűrűségét a máját alkotó anyagok térfogati hányadának változtatásával állítja be. A tengervíz sűrűsége $\rho_t = 1,026 \text{ g/cm}^3$, az olajok sűrűsége $\rho_o = 0,90\text{--}0,92 \text{ g/cm}^3$, a squalene sűrűsége pedig $\rho_s = 0,855 \text{ g/cm}^3$. Mivel a cápák mája, mint sűrűség szabályozó



3. ábra. Porcos halak képviselője, a cápa.

nem annyira hatékony szerv, mint az úszóhólyag a csontos halaknál, a cápák állandóan mozgásban vannak, hogy elkerüljék az elmerülést.

A tintahal

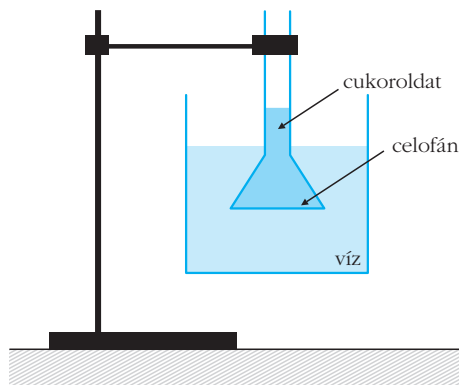
A tintahal vagy szépia nevével ellentétben nem hal, hanem puhatestű, lábasfejű (más néven fejlábú), a polipok rokona. Merüléskor a szabályozást a szépiacsonttal oldja meg, amely a teljes testtérfogat közel 10 százalékát (9,3%) teszi ki (4. ábra).

A szépiacsont celluláris anyag, lemezes szerkezetű, a CaCO_3 aragonit kristályaiból épül fel. Az aragonitlemezek szerveződését ilyenéné egy szerves molekula (kitin) irányítja. Az állatból frissen kivett csont átlagsűrűsége a $\rho = 0,57\text{--}0,64 \text{ g/cm}^3$ tartományban mozog. Elég könnyű, az állat átlagsűrűségét csökkenti, és kiváló mechanikai tulajdonságai is vannak, így jól ellenáll a mélységváltozás okozta nagy nyomásváltozásnak is. Védi az állat létfontosságú szerveit, például kiugró fejlettségű idegrendszerét. A szépiacsont másik fontos feladata a semleges úszóképesség beállítása, amelyet a tintahal a csont víztartalmának változtatásával valósít meg. A víztartalom változtatása – más tengeri állatokhoz hasonlóan, – az úgynevezett ozmoregulációs folyamattal történik [1].

Az ozmózis részletes ismertetése a középiskolás tantervekbe sem mindig kerül be, pedig az élővilág gyakran előforduló jelensége. Itt csupán egy kísérlettel mutatjuk be a jelenséget, a kvantitatív elemzést elkerüljük.

4. ábra. A fejlábúakhoz tartozó közönséges tintahal és a szépiacsont.





5. ábra. Kísérlet az ozmózisnyomás demonstrálására.

Az ozmózis jelensége

Ozmózisnak nevezzük az olyan „egyirányú” diffúziót, amely oldat és oldószer között jelentkezik, ha ezeket féligáteresztő (más néven szemipermeabilis) fal (hártya) választja el. Féligáteresztő az olyan fal, amely az oldószer molekuláit átengedi, de az oldott anyag molekuláit nem. Az ozmózis az oldat hígulásával jár együtt. Ha az oldat zárt edényben hígul, akkor nyomása megnő. A nyomás sok esetben tekintélyes lehet.

Egyszerű kísérlettel magunk is előállíthatjuk a jelenséget.

Ragasszunk celofánhártyát egy körülbelül 3-4 cm átmérőjű, hosszúnyakú üvegtölcsérre! A ragasztást úgynevezett akváriumragasztóval könnyen elvégezhethetjük. A tölcserbe töltünk cukoroldatot, és a tölcser száján jelöljük meg az oldat szintjét. A tölcser állványba fogva, a 5. ábrán látható módon helyezzük vízzel telt főzőpohárba úgy, hogy az oldat és a víz szintje egy magasságban legyen.

A víz diffúziója a féligáteresztő hártyán keresztül rövidesen mindkét irányban megindul, de az oldat felőli diffúzió kisebb mértékű. A folyamat végeredményeként az oldat hígul, térfogata nő, a tölcser szájában emelkedik a folyadékszint. A szintkülönbségnek megfelelő nyomás addig nő, amíg a nyomás a víz további oldatba hatolását már megakadályozza. Ezt a nyomást az oldat ozmózisnyomásának nevezzük. Az oldatok ozmózisnyomása meglepően nagy,

például az 1%-os cukoroldat ozmózisnyomása a légköri nyomás körülbelül 2/3 része, amely majdnem 7 méter magas vízoszlop nyomásának felel meg. A celofánhártya ekkora nyomást nem bír ki, a demonstráció már néhány deciméteres emelkedés után kényszerű véget ér. A nagy ozmózisnyomás teszi lehetővé például azt, hogy a talaj nedvessége a fák koronájába is eljusson.

A szépiacsontozóhoz visszatérve, ezután már megérthetjük a tintahal átlagsűrűség-beállító folyamatát. A szabályozás nagy körvonalakban abban áll, hogy az állat a szépiacsontban lévő folyadék-gáz arányt képes változtatni. Nagyobb gázhányad könnyebb csont, kisebb arány mellett viszont nehezebb csont áll elő, így változik az állat átlagsűrűsége is. Az ozmózisnyomásnak a csontbeli folyadék mozgásában van szerepe. Kutatók kimutatták, hogy a szépiacsontnak az állat lágy részeihez csatlakozó felületén található lemezek között mindig található folyadék, amely a tenger-vízhez hasonlóan főleg oldott NaCl-ot tartalmaz. Ha a csonttal érintkező testfolyadékok nagyobb az ionkoncentráció, akkor olyan folyamat indul meg a féligáteresztő szövet- és sejhártyákon keresztül, amely hígítja a nagyobb koncentrációjú tartományt, azaz víz kerül a csontból a testbe. A folyamat teljes részletezését e helyen mellőzzük, itt csak az ozmózis szerepére kívántuk felhívni a figyelmet [2].

A csigaházazs polip

A *Nautilus pompilius* vagy csigaházazs polip a lábasfejűek közé tartozik (6. ábra). A mintegy 20 cm-re megnövő, gyöngyházazs Nautilus ma is élő faj az azon puhatestűeknek, amelyek már 550 millió évvel ezelőtt megjelentek. „A csigáspolip élő fosszília” – szokták mondani. A polipok közül az egyetlen, amely házat növeszt.

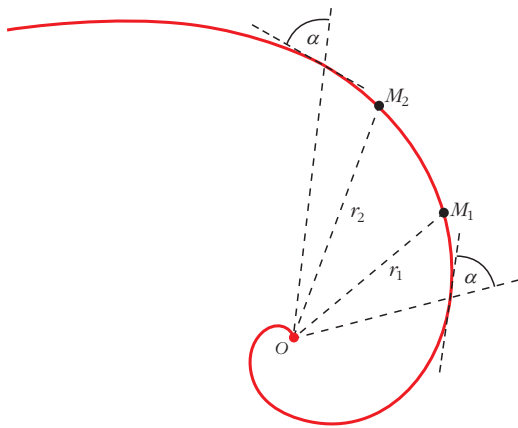
A csigáspolip a házat szigorú rend szerint építi. A lapos, szinte egy síkban készült építmény *logaritmikus spirál*¹ (7. ábra) módjára tekeredik. Házának belsejében *kamrák* vannak, az állat a legkülső kamrában lakik.

Házát szinte szakadatlanul építi, nagyobbítja, a már „kinőtt” helyiséget lefalazza. A lezárt ház térfogata arányos megnövekedett testtömegével, így biztosítja úszóképességét. Az állat a spirál kezdőpontjánál lévő kamrához csatlakozó *szifóján* keresztül áll összeköttetésben a kamráival (8. ábra) [3]. A kamrák gázt tartalmaznak, csak a néhány frissen „lefalazott”, legkülső kamrában van egy kevés tengervíz.

6. ábra. A csigaházazs polip és házának hosszanti metszete.



¹ A görbe úgy képződik, hogy a kiinduló O pontból a görbe M_i pontjába húzott egyenes és az M_i ponthoz tartozó érintő által bezárt α ($< 90^\circ$) szög állandó, ekkor az $OM_i = r_i$ távolság logaritmikusan nő.



7. ábra. A logaritmus spirál görbéje.

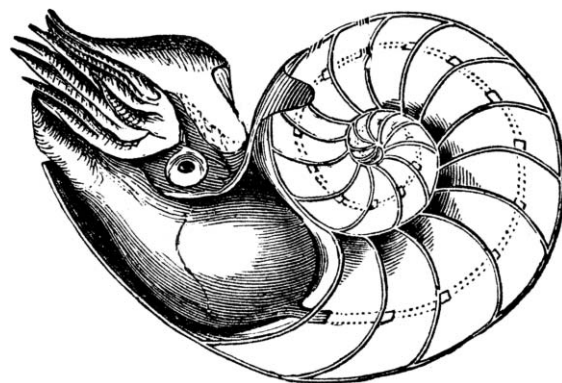
Azt is szokták mondani, hogy a Nautilus „élő tengeralattjáró”. A Nautilus 50 és 500 méteres mélységben is előfordul. Ekkora mélységbeli különbségek igen nagy *nyomás- és hőmérséklet-változásokkal* járnak. Az állatnak tehát alkalmazkodnia kellett e szélsőséges körülményekhez. A csigáspolip nappal általában a tengerfenéken él, csak éjszaka merészkedik magasabbra. Ilyenkor néhány tíz méter mélységben, a melegebb vízrétegben tartózkodik. Tojásait – amelyek bőrrel borított kapszulákhoz hasonlítanak – is ide rakja, általában kemény felületre, sziklára vagy korallokra. Szaporodását még most is titok övezi. Élő embrióit először – akváriumi körülmények között – csak 1985-ben figyeltek meg [4].

A csigaházaspolip nagyon rövid idő alatt több száz méter mélyre tud süllyedni, s onnan felemelkedni.

A mélytengeri expedícióknak köszönhetően sok film készült a csigaházaspolip életéről. Jellemzően „himbálódzó” mozgásáról az állat messziről megismerhető. E mozgás a *lebegés* jelenségével kapcsolatos, amely állapotot az állat minden mélységben saját módszerrel maga állítja be. Mivel a ház és a puhatestű állat együttes térfogata – és emiatt a rá ható felhajtóerő is – a mélységtől függetlenül mindig ugyanakkora, az egyes eltérő mélységekben *tömegét* kell szabályoznia.

A frissen lezárt kamrák tengervizet is tartalmaznak. Egy adott mélységben a lebegését a csigáspolip is úgynevezett ozmoregulációval biztosítja. A víz a kamrából ozmotikus úton – a szifó szövetein, sejtein keresztül –, a testnedvek ozmózisnyomását megfelelően beállítva tűnik el. Ezzel csökken az állat átlagsűrűsége, így a csigáspolipra ható nehézségi erő is, és az állat a felhajtóerőnek köszönhetően magasabb vízrétegekben lebeghet. Ha mélyebbre kerül, akkor néhány hátsó kamrájába ismét – a szifószövetei, sejteji membránjain keresztül – folyadékot juttat, megnövelve ezzel az átlagsűrűségét, így állapota a mélyebb vizekben, a nagyobb nyomású helyeken stabilizálódik.

Házában túlnyomásnak kell lennie, amely néhány száz méter mélyen már jelentős, ellenkező esetben gyöngyházból készült háza a nagy külső nyomás miatt összeroppanna. A csigáspolip tökéletesebb,



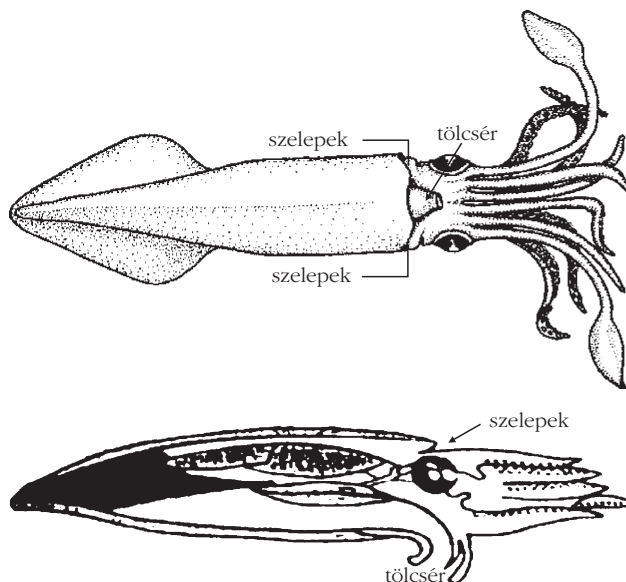
8. ábra. A szifó spirálisa.

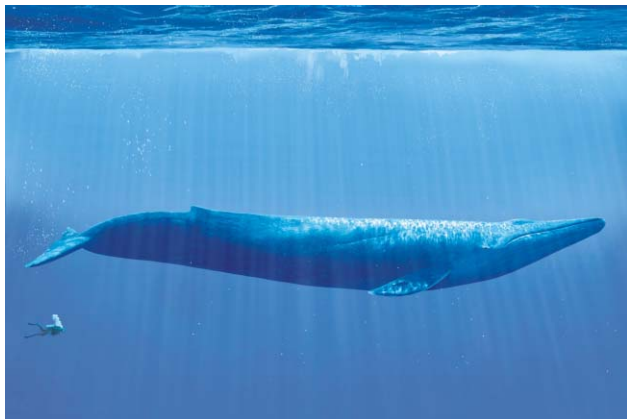
mint a hasonló elven működő tengeralattjáró, mert a tengeralattjáró a víz kiszorításához használt levegőt többsúlyként viszi magával.

Fejlábúak helyváltoztatása

A Nautilus, puhatestű társaihoz hasonlóan, *vízszugárhajtással* halad. A rakétameghajtást Ciolkovszkij a 19. század végén írta le. Mint ismeretes, a rakétákat a magukkal vitt üzemanyag elégetésekor keletkező gázok kiáramlásánál fellépő reakcióerő hajtja előre. A polipok, kalmárok, tintahalak, amelyek igen aktív vadászok, helyváltoztatáshoz a *vízszugárhajtást* már sokkal régebben használják. Meneküléskor (és vadászatkor) a testük nagy hányadát elfoglaló *köpenyüregbe* vizet szivattyúznak, s a tölcsérré alakult szervükön keresztül azt kilövellik, amitől – az impulzusmegmaradás törvényének megfelelően – ők az ellenkező irányba mozognak el. A veszélyt érzékelő állat hirtelen megnöveli a köpenyüreg térfogatát, benne a nyomás lecsökken, s az előálló nyomáskülönbségnek köszönhetően a testfelszín *megfelelő helyén* található szelepeken keresztül a tengerből víz áramlik a köpeny belsejébe. Az elvet a kalmár sematikus ábráján mutatjuk be (9. ábra), mert

9. ábra. A „vívízszugárhajtású” kalmár sematikus rajza.





10. ábra. A hengeralkakkal közelítőleg leírható kékbálna.

ennél az állatnál szembetűnőbbek a részletek. Az állat izma segítségével még be is görbítheti a tölcsért, így mozgása során *irányváltoztatásra* is képes.

Tengeri emlősök

A vízben lévő testekre a Föld vonzásán kívül a felhajtóerő is hat, a testek *súlya* éppen ezzel az értékkel kisebb, mint a levegőben. Ez a magyarázata annak, hogy vízben élnek, s könnyen mozognak a világ *legnagyobb tömegű* élőlényei.

Míg az elefánt, 3-5 tonna tömegével a legnagyobb tömegű szárazföldi emlős, addig a kékbálna (10. ábra) tömege a 130 tonnát is eléri.

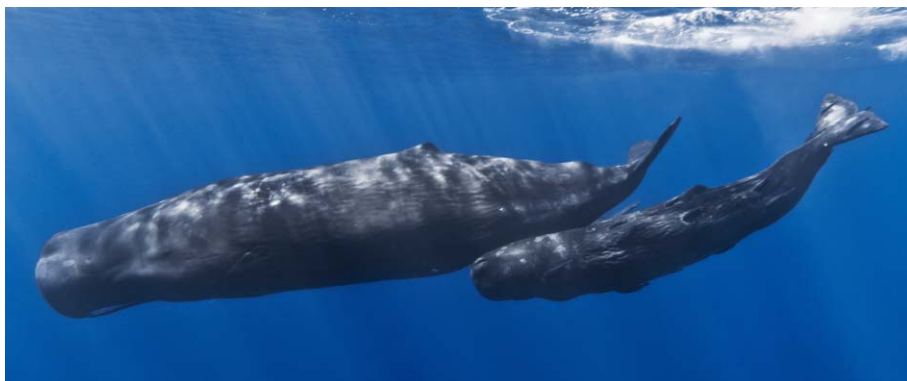
A bálna méreteinek ismeretében az Arkhimédész törvénye segítségével már általános iskolás tanulókkal is megbecsülhetjük a bálna tömegét. Jacques-Yves Cousteau, a közismert Cousteau kapitány tengerkutató mélytengeri megfigyeléseiből tudjuk, hogy egyes kékbálnap példányok hossza a 30 métert is meghaladja, átmérőjük ennek körülbelül a tizedrésze. Durva becsléshez elég, ha az állatot hengeralakúnak feltételezzük. A bálna által kiszorított víz súlya

$$G_{\text{víz}} = V_{\text{bálna}} \rho_{\text{víz}} g,$$

amelyből a térfogatra a

$$V_{\text{bálna}} = \frac{d^2 \pi}{4} h = \frac{h^2}{10^2} \frac{\pi}{4} h = \frac{h^3}{400} \pi$$

11. ábra. A mintegy 500 lóerős ábráscet és borja.



összefüggést kapjuk. A $h = 30$ méteres hosszat felhasználva a térfogatra 212 m^3 adódik.

A kiszorított víz súlya, a tengervíz sűrűségét $\rho_{\text{víz}} = 1030 \text{ g/m}^3$ -nek tekintve

$$G_{\text{víz}} = 212 \text{ m}^3 \cdot 1030 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 2,18 \cdot 10^6 \text{ N}.$$

A bálna tömege néhányszor 10^5 kg , azaz néhány száz tonna. (A valóságos tömegnél természetesen nagyobb adódott, mert az egyszerűbb számítás miatti hengeres bálnaalak durva, felső közelítés.)

Ezzel a hatalmas tömeggel akár 30 km/óra sebességgel is képes úszni. (A motorcsónak sebessége körülbelül ekkora.) A 60 tonna tömegű ábráscet (11. ábra) néhány méter magasra még ki is ugrik a vízből. De a vízi életmódhoz alkalmazkodott csontvázuk a szárazföldön képtelen lenne ekkora terhet megtartani. Érthető, ha ezek az állatok – valamilyen oknál fogva – partra vetődve képtelenek levegőt venni, ekkor tüdejük a hatalmas tömegű izom és zsírpárna súlya alatt szinte teljesen összenyomódik, elpusztulnak.

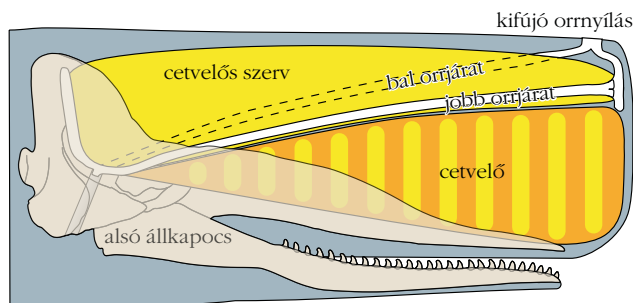
Bálnák merülése

Természetfilmből ismeretes, hogy ezek az emlősállatok vízszintes, lapátszerű farokuszójukkal – amelynek teljesítménye elérheti az 500 lóerőt, ez egy traktor teljesítményének közel kétszeresével egyenlő, $1 \text{ lóerő} = 736 \text{ watt}$ – csapnak a vízre.

A bálna a reakcióerőnek – a víz által az állat 4 méteres vízszintes kiterjedésű farokuszójára ható erőnek – köszönhetően bukik a mélybe, ahol a légköri nyomás 5 - 6 -szorososa várja. E nyomás hatására tüdeje a lehető legkisebb térfogatúra nyomódik össze, emiatt a bálna teljes testének térfogata csökken. A kisebb térfogat már kevesebb vizet szorít ki, a felhajtóerő lecsökken, tartósan a mélyben maradhat. A felszínre jutva levegőt vesz, tüdeje kitágul, a felhajtóerő megnő. A változatlan nehézségi erő, de a megnövekedett felhajtóerő miatt nem is szükséges teljesen elmerülnie, gyakran látható, hogy a test egy része a vízből kiemelkedve úszik. Azt is mondhatjuk, hogy a bálna változatlan tömege mellett a $\rho = m/V$ átlagsűrűségét *térfogata* változtatásával befolyásolja.

Nem így az ábráscet!

Hordó alakú feje a testhossz negyedét teszi ki, és a teljes testtömeg harmad része. Fejében és törzsében a gerincoszlop mentén különleges lágy, hőre rendkívül érzékeny anyaggal, cetvelővel töltött kamrák vannak. A fejében található szerve, amely a cetolaj vagy bálnaolaj néven ismert anyagot tartalmazza, felelős a semleges úszóképesség-



12. ábra. Az ámbráscet cetvelőt tartalmazó szerve.

ség biztosításáért (12. ábra). A körülbelül 2000 liter cetolaj – amely viasz-észterek és trigliceridek keveréke – egy „zsákban” helyezkedik el, és rendkívül érdekes termodinamikai tulajdonságokkal rendelkezik. A cetolaj körülbelül 29 °C hőmérsékleten folyadék-szilárd halmazállapot-változáson megy keresztül. 30 °C körül viszonylag kis viszkozitású folyadék, amelynek atmoszférikus nyomáson vett sűrűsége 862 kg/m³, 29 °C alatt térfogatcsökkenéssel is járó szilárd viasszá kristályosodik, ekkor sűrűsége 22,5 °C-on 889 kg/m³.

Merüléskor a tengervíz hőmérséklete a mélységgel csökken, eközben a cetvelő lágy állapotból nagyobb sűrűségű szilárd állapotúvá válik. A fentiekből látható, hogy már nagyon kicsi, csupán 1-2 °C hőmérséklet-változás jelentős sűrűségváltozással jár. Mivel a szerv tömege nagy, e módszerrel hatékony tömegnövekedés érhető el. A cetvelő hőmérséklet-szabályozásában a szervén áthaladó érhálózat melegítő hatása és a szervet átszelő orrjáratokon átáramló tengervíz hűtő hatása játszik szerepet [5]. Az állat tömege tehát így változtatható. Az állat térfogata bármely mélységben ugyanakkora, az átlagsűrűség-változtatás ebben az esetben a tömeg csökkentésén, illetve növelésén keresztül történik.

E helyen csak megjegyezzük, hogy ezzel a szervvel valósul meg a bálnák és delfinek ultrahangokkal történő tájékozódása, az echolokáció is. A szerv ekkor „viaszlelencse” módjára viselkedik, amely az állat fejében a megfelelő helyre fókuszálja a bálnák által kibocsátott, a tengervízben a levegőhöz viszonyítva ötször nagyobb sebességgel terjedő hanghullámokat. Ebből is láthatjuk, hogy ez az állat is számos vonatkozásban kapcsolódik a fizikához, érdemes jól megismerni minden tulajdonságát, majd a más tudományterületeken szerzett ismereteink segítségével megpróbálni megérteni a viselkedését.

Miért nem merülnek el a vízi madarak?

A vízi madarak (13. ábra) tollukat zsírozzák, a vízzel nem nedvesedő tollak és a pehelytollak között jelentős mennyiségű levegőt tudnak tárolni. A sok megkötött levegőtől a madarak átlagsűrűsége csökken, testüket sajátos „buborék” veszi körül, ezért úszva csak térfogatuk kis hányada merül a vízbe.

Ha tolluk víztaszító tulajdonsága megváltozik, például környezetszennyezés miatt, akkor a fogva tartott levegő mennyisége csökken, elmerülnek. Ha a tavak-

ba olyan szennyező anyag (például mosószer) jut, amely csökkentheti a víz felületi feszültségét, akkor a toll jobban nedvesedik, az állat akár vízbe is fulladhat. Látható, hogy a környezetszennyezés az állatot két oldalról is veszélyezteti.

Az úszás munkával jár

Elgondolkodhatunk azon, hogy mekkora teljesítmény szükséges ahhoz, hogy a víznél nagyobb sűrűségű élőlény mozgása során a vízben mégse merüljön el.

Végezzünk számításokat! A V térfogatának f hányadával vízbe merülő ρ sűrűségű állatra ható F_f felhajtóerő:

$$F_f = fV\rho_v g,$$

ahol ρ_v a víz sűrűsége. Az állatnak munkavégzéssel a nehézségi erő és a felhajtóerő

$$F = gV(\rho - f\rho_v)$$

eredőjének megfelelő nagyságú, de azzal ellentétes irányú erőt kell kialakítania ahhoz, hogy el ne merüljön.

Ez az erő előállítható, ha az állat valamely testrészel lefelé mutató irányban a vízre csap. Ekkor ugyanis a víz lefelé gyorsuló mozgást végez, a víz ellenereje hat az állatra, amely a vízfelszínen tartja őt.

Ha a mozgó testrészt területe A , a csapással gyorsított víz végsebessége v , akkor a mozgás során időegység alatt gyorsított víztömeg

$$m = Av\rho_v.$$

A víz mv impulzusa pedig éppen az úszó test lendületigénye is. Az *impulzus időegység alatt* történő változása éppen a meglökött víz állatra ható – a testét fenntartó – *reakcióereje*. Egyenletekkel a következő formában adható meg:

$$gV(\rho - f\rho_v) = Av^2\rho_v,$$

ahonnan

$$v^2 = \frac{gV(\rho - f\rho_v)}{A\rho_v}.$$

13. ábra. A víznél sokkal kisebb átlagsűrűségű szárcsa.



A mozgásban lévő testrészek által végzett munka a víz kinetikus energiájává alakul. Így a testrészek teljesítménye éppen a víz egységnyi idő alatt történő mozgásienergia-változásával lesz egyenlő, amely

$$P = \frac{1}{2} A \rho_v v v^2 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\left[\rho g V \left(1 - \frac{f \rho_v}{\rho} \right) \right]^3}{A \rho_v}}$$

képlettel fejezhető ki [6].

A fenti formula felhasználásával számos érdekes jelenségre kvantitatív magyarázatot adhatunk. Például: kiszámíthatjuk, hogy az 50 kg tömegű úszónőnek ahhoz, hogy az orrát a vízfelszín felett tartsa, mozgó végtagjaival 7,8 watt teljesítményt kell kifejteni.

(A számításához használt további adatok: a test 95 százaléka merül vízbe, a mozgó végtagok teljes területe 600 cm^2 , s legyen $\rho_{\text{úszó}} = \rho_v$.)

Számítással magunk is ellenőrizzük a teljesítmény fenti értékét!

Irodalom

1. Paul Davidovits: *Physics in Biology and Medicine*. 3rd edition, Academic Press, Elsevier Inc. (2008) 93–95.
2. Kundt Schmidt-Nielsen: *Animal Physiology*. 4th Edition, Cambridge University Press, Cambridge (1990) 433–448.
3. Greguss Ferenc: *Eleven találmányok*. Móra Könyvkiadó, Budapest (1976)
4. http://en.wikipedia.org/wiki/Waikiki_Aquarium
5. M. R. Clarke: Physical properties of spermaceti oil in sperm whales. *J. Mar. Biol. Ass. U.K.* 58 (1978) 19–26.
6. Paul Davidovits: *Physics in Biology and Medicine*. 3rd edition, Academic Press, Elsevier Inc. (2008) 82–87.

RELATIVITÁSELMÉLETRŐL KÖZÉPISKOLÁBAN – MÁSKÉNT, KIEGÉSZÍTÉS

Kürti Jenő

ELTE Biológiai Fizika Tanszék

A *Fizikai Szemle* 2018. áprilisi számának *A fizika tanítása* rovatában jelent meg Kiss Miklós remek írása, hogy miként lehet az érdeklődő középiskolások figyelmét fölhívni arra, hogy az elektromos és a mágneses mezők mindig együtt kezelendők. Külön-külön az elektromos mezőnek és a mágneses mezőnek nem csak a nagysága, hanem még a léte vagy nem léte is függ attól, hogy milyen vonatkoztatási rendszerből nézzük. Ez valóban elgondolkodtató lehet az érdeklődő diákoknak.

A konkrét példa két párhuzamos, nagyon („végtelenül”) hosszú, egyenletesen töltött szigetelő egyenes közötti erőhatás vizsgálata volt. A levezetés során azonban egy kis „kegyes csalás” történt. Az az állítás ugyanis, hogy „A vonatkoztatási rendszertől nem függhet az erő nagysága” nem igaz, ha – amint a cikkben is történt – a klasszikus, úgynevezett hármaskörrel beszélünk. Még akkor sem, ha itt a kölcsönös mozgás irányára merőleges komponensről van szó!

Szerencsére még egy pongyolaság történt, ugyanis a szövegben nem egyetlen ponttöltésre ható erőről van szó, hanem az egységnyi hosszúságú darabra ható erőről. Így a levezetés végül mégis helyes, köszön-

hetően annak, hogy két ellentétes tényező kompenzálja egymást. Mivel ez azonnal nem látható, ezért szeretném ezt kicsit részletesebben kifejteni ebben az írásban.

Válasszunk egy még egyszerűbb esetet, mint amelyet Kiss Miklós írása tárgyal: az egyik töltött egyenes helyett legyen egy q ponttöltésünk. (A két ponttöltés esete fizikailag még egyszerűbb, azonban ott matematikai komplikációk merülnek föl: a töltés-, illetve áramsűrűségeknél az úgynevezett Dirac-deltával kellene dolgoznunk.) A másik töltött egyenes pedig legyen egy vékony, tömör egyenes henger (ennek előnye később világos kell legyen). A mezőket a hengeren kívül vizsgáljuk.

A feladat tehát a következő: egy végtelen hosszú, egyenes, A keresztmetszetű, henger alakú szigetelőt egyenletesen feltöltünk ρ (térfogati!) töltéssűrűséggel. A henger tengelyétől d távolságra egy, a hengerhez képest nyugalomban lévő pontszerű q töltést helyezünk el. Vizsgáljuk a ponttöltésre ható erőt két vonatkoztatási rendszerből:

a) laboratóriumi rendszerből, amelyben minden töltés nyugalomban van és

b) a henger tengelyével párhuzamosan állandó v sebességgel mozgó inerciarendszerből.

A számításokhoz – a jobb áttekinthetőség kedvéért – relativisztikus mértékegységrendszert, vagyis olyat használjunk, amelyben a vákuumbeli fénysebesség

$$c \equiv \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 1,$$

sőt külön az ϵ_0 -t (és ezzel persze automatikusan a μ_0 -t) is válasszuk 1-nek! Hangsúlyozzuk, hogy emiatt



Kürti Jenő (1954) fizikus, az MTA doktora, az ELTE Biológiai Fizika Tanszékének professzora. Kutatási területe elsősorban szén nanosztruktúrák elméleti vizsgálata, különös tekintettel azok rezgési spektroszkópiájára. A *Fizika III* egyetemi tankönyv *Relativitáselmélet*, valamint *Atomfizika* részeinek szerzője.

ebben az írásban a v nem a hagyományos, m/s-ban mért sebességet jelenti, hanem a fénysebesség egységekben mért dimenziótlan sebességet! A kapott képletek – kis odafigyeléssel – bármikor átírhatók az SI-mértékegységekkel kifejezett alakjukra.

Annak érdekében, hogy a probléma mélységeihez jobban hozzáférjünk, használjuk a relativisztikus, úgynevezett négyes formalizmust, persze „lájtos” módon. Az alább leírtak jobb megértéséhez segítséget nyújthat például a *Fizika III* tankönyv középiskolások számára is megemészthető *Relativitáselmélet* fejezete [1].

Foglaljuk össze nagyon röviden a téridőbeli négyesvektorok legfontosabb tulajdonságait!

Minden négyesvektor egy idő- és három térkomponensből áll. Legyen például a^μ egy téridőbeli négyesvektor ($\mu = 0, 1, 2, 3$), amelynek időkomponense $a^0 \equiv a_t$, a három térbeli komponense pedig (a_x, a_y, a_z) , röviden összefoglalva $\mathbf{a}$. Ekkor írhatjuk:

$$a^\mu \equiv (a^0, a^1, a^2, a^3) \equiv (a_t, a_x, a_y, a_z) \equiv (a_t, \mathbf{a}).$$

A négyesvektorok mintapéldánya a téridő-helyvektor (idő-hely négyesvektor):

$$x^\mu \equiv (x^0, x^1, x^2, x^3) \equiv (t, x, y, z) \equiv (t, \mathbf{r}).$$

Másik nevezetes példa a négyesimpulzus (energia-impulzus négyesvektor), vagy – *Károlyházy Frigyes* szemléletes elnevezésével – anyagvektor:

$$p^\mu \equiv (p^0, p^1, p^2, p^3) \equiv (\epsilon, p_x, p_y, p_z) \equiv (\epsilon, \mathbf{p}).$$

ahol ϵ az energia és $\mathbf{p}$ az impulzus (lendület).

Számunkra fontos lesz még a négyesáram-sűrűség:

$$j^\mu \equiv (j^0, j^1, j^2, j^3) \equiv (\rho, j_x, j_y, j_z) \equiv (\rho, \mathbf{j}).$$

ahol ρ a töltés- és $\mathbf{j}$ az áramsűrűség.

Ezek a példák azt sugallják, hogy egy négyesvektor három térbeli komponense egy klasszikus fizikai (három)vektor, időkomponense pedig egy klasszikus fizikai skalár. Ez azonban nincs mindig így! Éppen a négyeserő egy olyan példa, ahol nem ilyen egyszerű a helyzet, és ez kulcsfontosságú lesz.

Előtte azonban ejtsünk pár szót a négyesvektorok transzformációs tulajdonságairól. Egy téridőmennyiség definíciószerűen akkor négyesvektor, ha komponensei a koordináta-rendszer forgatásakor úgy transzformálódnak, ahogy a téridő-helyvektor komponensei. Itt nemcsak tisztán térbeli forgatásról lehet szó, hanem igazi téridőbeli „forgatásról” is! Az utóbbi hétköznapi nyelvre lefordítva annak felel meg, amikor egyik inerciarendszerről áttérünk egy hozzá képest mozgó másik inerciarendszerre [1]. A megfelelő transzformációk a Lorentz-transzformációk. A legegyszerűbb eset amikor két inerciarendszer a közös x tengely mentén mozog egymáshoz képest v sebességgel, az y és z tengelyek párhuzamosak. Ebben az úgynevezett standard elrendezésben a t és x koordináták transzformálódnak, a v -re merőleges y és z koordináták nem. Ilyenkor be-

szélünk a t - x téridő síkban (Minkowski-síkban) történő forgatásról, mivel a transzformációs képletek nagyon hasonlóak a közös síkban végzett forgatást leíró kifejezésekhez. A geometriai kép a képleteket egyszerűbbé, átláthatóbbá teszi. A Lorentz-transzformációt nem a bonyolult, $(1-v^2)^{1/2}$ -es faktort tartalmazó képlettel célszerű leírni (ne felejtsük, $c = 1$). Helyette sokkal egyszerűbb, ha az euklideszi síkbeli forgatáshoz nagyon hasonlóan, tehát szögfüggvényekkel kezeljük a Minkowski-síkban történő forgatást is. Egyetlen nagy különbség az, hogy míg az euklideszi síkban a trigonometrikus függvényeket ($\cos$, $\sin$, $\tan$, ...) használjuk, a Minkowski-síkban hiperbolikus függvényekkel (ch , sh , th , ...) kell dolgozni. Az utóbbiak definíciója és tulajdonságai – sok más tankönyv vagy internetes oldal mellett – [1]-ben is megtalálhatók. Itt csak az alapdefiníciókat idézzük föl:

$$\text{ch}\theta = \frac{e^\theta + e^{-\theta}}{2}, \quad \text{sh}\theta = \frac{e^\theta - e^{-\theta}}{2}, \quad \text{th}\theta = \frac{\text{sh}\theta}{\text{ch}\theta}.$$

Egy nagyon fontos „hiperbolikus azonosságot” célszerű még leszögezni:

$$\text{ch}^2\theta - \text{sh}^2\theta \equiv 1.$$

A Minkowski-síkban történő forgatás θ szöge (úgynevezett sebességparaméter) és az egyik inerciarendszer másikhoz képesti (dimenziótlanított!) v sebessége közötti kapcsolat:

$$v = \text{th}\theta.$$

(Miközben a θ sebességparaméter $-\infty$ -ről $+\infty$ -re változik, tangens hiperbolikusza -1 -ről $+1$ -re nő.)

A θ sebességparaméter használatával egy tetszőleges a^μ négyesvektor idő- és térkomponenseinek Lorentz-transzformációja a standard elrendezésben a következő áttekinthető alakban írható:

$$a'_t = a_t \text{ch}\theta + a_x \text{sh}\theta,$$

$$a'_x = a_t \text{sh}\theta + a_x \text{ch}\theta,$$

$$a'_y = a_y,$$

$$a'_z = a_z.$$

(θ előjele attól függ, hogy melyik inerciarendszerről térünk át a másikra.)

Ha valaki θ helyett a v sebességet szeretné használni, akkor könnyen átválthat a Lorentz-transzformáció „klasszikus”, négyzetgyökös kifejezéseket tartalmazó alakjára. Például:

$$\begin{aligned} \text{ch}\theta &\equiv \frac{\text{ch}\theta}{1} \equiv \frac{\text{ch}\theta}{\sqrt{\text{ch}^2\theta - \text{sh}^2\theta}} \equiv \frac{1}{\sqrt{1 - \text{th}^2\theta}} \equiv \\ &\equiv \frac{1}{\sqrt{1 - v^2}}. \end{aligned}$$

Ezek után nézzük magát az eredeti problémát!

Laboratóriumi rendszerben

Itt minden töltés nyugalomban van, ezért expliciten még nincs szükség a relativitáselméletre. Felhasználhatjuk a Kiss Miklós cikkében leírt gondolatmenetet, csupán α lineáris töltéssűrűség helyett ρ térfogati töltéssűrűséget használunk. A kettő közti kapcsolat nyilvánvaló: $\alpha = \rho A$. Egy ρ térfogati töltéssűrűségű, A keresztmetszetű henger középtengelyétől d távolságban (persze kívül a hengeren) a henger tengelyére merőleges irányú az elektromos térerősség, amelynek nagysága

$$E = \frac{1}{2\pi} \frac{A\rho}{d}.$$

A tengelytől d távolságra nyugalomban lévő q ponttöltésre ható erő tehát

$$F = qE = q \frac{1}{2\pi} \frac{A\rho}{d}.$$

A konkrétság kedvéért legyen ρ és q is pozitív. Laboratóriumi rendszerben tehát a fenti képlettel leírható tisztán elektromos taszítás lép föl, mágneses mező nincs.

A laboratóriumhoz képest mozgó inerciarendszerben

Az előző esethez viszonyítva két változás is van. Az egyik, hogy ebből a rendszerből nézve a szigetelő töltései v sebességgel mozognak, tehát megjelenik egy $j' \neq 0$ áramsűrűség is. Ez nem jelenthet problémát egy középiskolásnak. Az már kevésbé nyilvánvaló, hogy a töltéssűrűség sem lesz egyforma a két rendszerben, $\rho' \neq \rho$. A Lorentz-transzformáció fenti képleteit alkalmazva ($\rho, j \equiv 0$)-ból könnyen megkapjuk ρ' -t és j' -t:

$$\rho' = \rho \cosh \theta,$$

$$j' = \rho \sinh \theta \equiv \rho \cosh \theta \tanh \theta \equiv \rho' v.$$

Az áramsűrűség összefüggése relativitáselmélet nélkül is minden további nélkül érthető egy középiskolás számára. A töltéssűrűség növekedésénél pedig a Lorentz-kontrakcióra – ami miatt adott mennyiségű töltés rövidebb szakaszon oszlik el a laboratóriumhoz képest mozgó inerciarendszerből nézve – lehet utalni.

Ezek után már könnyű dolgunk van, alkalmazhatjuk a középiskolában megismert formulákat az elektromos és most már a mágneses mezőre is.

Az elektromos térerősség nagysága most

$$E' = \frac{1}{2\pi} \frac{A\rho'}{d} = E \cosh \theta.$$

Az $I' = Aj'$ áramerősség miatt kialakuló mágneses mező nagysága pedig

$$\begin{aligned} B' &= \frac{1}{2\pi} \frac{I'}{d} = \frac{1}{2\pi} \frac{Aj'}{d} = \frac{1}{2\pi} \frac{A\rho' v}{d} = \\ &= \frac{1}{2\pi} \frac{A\rho'}{d} v = E' v. \end{aligned}$$

Vegyük észre, hogy A és d mindkét rendszerben ugyanaz, hiszen a téridő-helyvektor (mint minden négyesvektor) kölcsönös mozgásra merőleges komponensei nem transzformálódnak!

A mezők ismeretében – erre az esetre alkalmazva a Lorentz-féle erőtvényt – megkaphatjuk a q ponttöltésre ható erő nagyságát:

$$\begin{aligned} F' &= q(E' - vB') = q[E' - v(E'v)] = \\ &= qE'(1 - v^2). \end{aligned}$$

(Megjegyzendő, hogy a q elektromos töltés Lorentz-invariáns, tehát számértéke mindkét vonatkoztatási rendszerben ugyanaz.)

Látható, hogy az elektromos taszítás megnövekszik ($E' = E \cosh \theta$), ugyanakkor a megjelenő mágneses mezőben mozgó töltésre föllép egy vonzó erő. Kérdés, hogy az elektromos taszítás növekedését kompenzálja-e a megjelenő mágneses vonzás. Vagyis, vajon ugyanaz-e az erő értéke a kétféle inerciarendszerben? Lássuk mit kapunk, ha behelyettesítjük a fenti összefüggéseket!

$$\begin{aligned} F' &= qE \cosh \theta (1 - \tanh^2 \theta) = qE \cosh \theta \frac{\cosh^2 \theta - \sinh^2 \theta}{\cosh^2 \theta} = \\ &= qE \cosh \theta \frac{1}{\cosh^2 \theta} = F \frac{1}{\cosh \theta}. \end{aligned}$$

A két erő tehát NEM egyforma! Az elektromos taszítás növekedését túlkompensálja a mágneses vonzás, a mozgó rendszerből nézve – a laboratóriumi rendszerhez képest – lecsökken a taszítás.

De ez nem is baj, ezt szeretném még röviden megmutatni.

Korábban – a standard elrendezés esetére fölirt összefüggésekből – már láttuk, hogy a Lorentz-transzformáció során egy négyesvektor kölcsönös mozgásra merőleges két térbeli komponense nem változik. Ez azonban csak a négyesvektorok térbeli komponenseire igaz! Márpedig a középiskolában megtanult

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

Lorentz-erő ebben a formában nem egy négyesvektor három térbeli komponense! Ennek belátását ne az $\mathbf{E}$ és $\mathbf{B}$ transzformációs tulajdonságainak vizsgálatára alapozzuk, mert az még a jó középiskolás diákok számára is nehezebb gondolatmenet. Helyette kövessünk egy talán egyszerűbb utat.

A kulcsot az a tény adja, hogy minden olyan esetben, amikor időderiválással származtatunk egy új mennyiséget (sebesség, gyorsulás, ...), figyelembe kell venni, hogy a koordinátaidő és az úgynevezett sajátidő különböznek egymástól. A klasszikus hármasvektoroknál a koordinátaidő szerint deriválunk, míg a négyesvektoroknál a sajátidő szerint.

Annak érdekében, hogy lássuk mire vezet ez a tény, induljunk ki egy anyagi objektum sorsának két közeli eseményét (a téridőben világvonala két közeli pontját) összekötő téridő-helyvektorból:

$$dx^\mu \equiv (dt, dx, dy, dz) \equiv (dt, d\mathbf{r}).$$

A komponensek (így dt is!) attól függenek, hogy milyen vonatkoztatási rendszerben adjuk meg azokat. Ezzel szemben a speciális relativitáselmélet egyik alapösszefüggése, hogy az időkomponens négyzetének és a térbeli komponensek négyzetösszegének *különbsége* olyan kifejezés (négyesvektorunk négyzetes téridőhossza), amelynek értéke nem függ attól, hogy milyen inerciarendszerben számoljuk ki (invariáns). Ez az érték azon $d\tau$ sajátidőtartam négyzete, amelyet egy olyan inerciarendszerben mérünk, amelyben a két esemény ugyanott történik ($d\mathbf{r} = 0$). Írhatjuk tehát, hogy

$$\begin{aligned} d\tau &:= \sqrt{dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2} \equiv \sqrt{dt^2 - d\mathbf{r}^2} \equiv \\ &\equiv dt\sqrt{1 - \mathbf{v}^2} \equiv \frac{dt}{\text{ch}\theta}. \end{aligned}$$

(Ne felejtjük, hogy $c = 1$, $\mathbf{v}^2 = \text{th}^2\theta$ és $\text{ch}^2\theta - \text{sh}^2\theta \equiv 1$!)

A $d\tau$ sajátidő és a nála $\text{ch}\theta$ -szor nagyobb koordinátaidő kis sebességekre ($v \ll 1$) alig különbözik.

Egy négyesvektorból időderiválással újabb négyesvektor nyerhető, de csak akkor, ha azt nem a koordinátaidő, hanem az invariáns sajátidő szerint végezzük. A sebesség, impulzus, erő relativisztikusan helyes kifejezései tehát a következők.

Négyessebesség:

$$\begin{aligned} u^\mu &= \frac{dx^\mu}{d\tau} = \frac{dx^\mu}{dt} \frac{dt}{d\tau} = \left(\frac{dt}{dt}, \frac{d\mathbf{r}}{dt} \right) \frac{dt}{d\tau} = \\ &= (1, \mathbf{v}) \text{ch}\theta. \end{aligned}$$

Könnyen belátható, hogy ez egy egységvektor a téridőben, iránya pedig a test világvonalának mindenkor érintője mentén mutat.

Négyesimpulzus (energia-impulzus négyesvektor, más kifejezéssel anyagvektor):

$$p^\mu \equiv (\epsilon, \mathbf{p}) = m u^\mu = m(1, \mathbf{v}) \text{ch}\theta,$$

ahol m az adott részecske invariáns tömege.

Végül pedig a négyeserő:

$$\begin{aligned} f^\mu &= \frac{dp^\mu}{d\tau} = \frac{dp^\mu}{dt} \frac{dt}{d\tau} = \left(\frac{d\epsilon}{dt}, \frac{d\mathbf{p}}{dt} \right) \text{ch}\theta = \\ &= (\mathbf{F}\mathbf{v}, \mathbf{F}) \text{ch}\theta. \end{aligned}$$

Az utolsó átalakítás a newtoni mechanikából ismert munkatétel, illetve impulzustétel (amiből nekünk most a második a fontos), ahol $\mathbf{F}$ a klasszikus háromdimenziós erő.

Azt kaptuk tehát, hogy nem a klasszikus hármaserő merőleges komponense marad változatlan a Lorentz-transzformáció során, hanem a négyeserőé, és az utóbbi $\text{ch}\theta$ -szorosa az előbbinek! Pontosan ezt tükrözi amit korábban kaptunk, amikor a Lorentz-féle erőképletet nemrelativisztikusan, a $\text{ch}\theta$ szorzó nélkül alkalmaztunk.

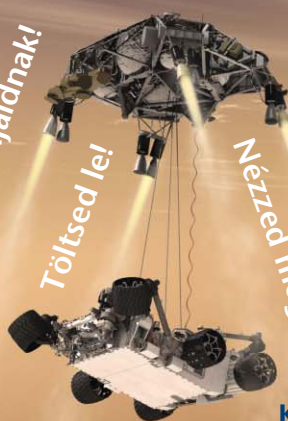
Annak oka egyszerű, hogy az eredeti írásban miért nem könnyen vehető észre a kegyes csalás. Az egységnyi hosszú darabban lévő ponttöltések *darabszáma* a Lorentz-kontrakció miatt éppen egy $\text{ch}\theta$ szorzó-faktorral növekszik meg, ami pont kompenzálja az *egyetlen* töltésre ható *hármaserő csökkenését*. Vagyis (legalábbis ebben a speciális esetben) az *egységnyi hosszra* ható hármaserő nagysága valóban megegyezik a két inerciarendszerben.

A leírtaktól teljesen függetlenül még egy értelemzavaró nyomtatási hibát is megemlítek: az eredeti cikk elején, a 2. Maxwell-egyenlet sztatikus elektromos mezéjénél az „örvénymentes” helyett tévedésből „forrásmentes” szerepel.

Végül, nehogy félreértés legyen, szeretném leszögezni: Kiss Miklós cikke középiskolások számára nagyon tanulságos és figyelemfelkeltő, érdemeit semmiképpen sem kívánom kisebbiteni, sőt. Jelen írással csupán az alapprobléma még pontosabb megértéséhez szeretnék hozzájárulni.

Irodalom

1. Erostyák János, Kürti Jenő, Raics Péter, Sükösd Csaba: *Fizika III.* (szerk.: Erostyák János, Litz József), Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest–Debrecen–Pécs 2006, V. rész: Relativitáselmélet, 201–252.



Tanítsd meg diákjaidnak!

Töltsd le!

Mutasd meg másoknak!

Nézzed meg!

Hogyan érkezett a Curiosity a Marsra?

VAN ÚJ A FÖLD FELETT

Keresd a fizikaiszemle.hu mellékletek menüpontjában!



XXI. ORSZÁGOS SZILÁRD LEÓ NUKLEÁRIS TANULMÁNYI VERSENY – 1. rész

Sükösd Csaba
BME Nukleáris Technikai Intézet

Éppen 20 évvel ezelőtt, *Szilárd Leó* születésének centenáriuma alkalmából, *Marx György* professzor kezdeményezésére 1998-ban került először megrendezésre a Szilárd Leó Országos Középiskolai Tanulmányi Verseny. Azóta a Szilárd Leó Tehetséggondozó Alapítvány, az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, az Energetikai Szakgimnázium és Kollégium és a Magyar Nukleáris Társaság minden évben megrendezi a versenyt. A verseny célja a modern fizikai ismeretek, ezen belül az atomfizika iránti érdeklődés felkeltése és annak minél szélesebb és mélyebb megismertetése. A verseny elő kívánja segíteni a nukleáris szakterület számára szükséges szakember-utánpótlás kinevelését az elkövetkezendő években, évtizedekben. Erre az atomerőmű üzemidejének meghosszabbítása és a tervezett új blokkok építésének és üzemeltetésének érdekében elengedhetetlenül szükség van. 2006 óta határon túli magyar anyanyelvű iskolák tanulói részére is megnyitottuk a részvétel lehetőségét. 2015 után idén ismét volt jelentkező a határon túlról, igaz, csak egyetlen fő: a Székely Mikó Kollégium (Sepsiszentgyörgy, Románia) egyetlen első kategóriás (11–12. osztályos) fiút nevezett a versenybe. Sajnos, Szerbiából és Horvátországból, valamint Kárpátaljáról és a Felvidékről ez évben sem kaptunk nevezést. Összesen 232 első kategóriás és 102 junior kategóriás nevezés érkezett. Öröndöletesen, ez több tanuló érdeklődését jelzi, mint az elmúlt években, megoszlásukat mutatja az 1. táblázat.

Feltűnő a budapestiek létszámának és arányának növekedése, valamint – öröndöletes módon – a lányok jelentkezői kedve is megnőtt, különösen a II. (Junior) kategóriában.

A 2018. február 19-én megtartott első forduló (válogató verseny) tíz feladatát az iskolákban, három óra alatt lehetett megoldani. Kijavítás után a tanárok azon megoldásokat küldték be a BME Nukleáris Technika Tanszékére, ahol a 9–10. osztályos (junior) versenyzők legalább 40%-os, a 11–12. osztályos (I. kategóriás) versenyzők legalább 60%-os eredményt értek el. A verseny fordulóján másokkal (és az internettel) való

1. táblázat Nevezések megoszlása 2014-ben, zárójelben a 2013. évi adatok				
	I. kategóriás		II. kategóriás	
	fiú	lány	fiú	lány
budapesti	106 (72)	21 (8)	34 (33)	17 (5)
vidéki	94 (116)	10 (16)	38 (35)	13 (4)
határon túli	1 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
összesen	201 (168)	31 (24)	72 (68)	30 (9)

kommunikációt lehetővé tevő eszközök kivételével bármilyen segédeszköz használható volt.

Az alábbiakban ismertetjük a válogató verseny, valamint a döntő feladatait, és a megoldókulcsot, amely a javító tanárok számára jelentett iránymutatást. A tanárok természetesen minden helyes ötletet és megoldást is pontozhattak. Olyanokat is, amelyek eltértek a megoldókulcsban bemutatott megoldástól. Minden feladatra maximálisan 5 pontot lehetett adni.

A válogató verseny feladatai és megoldásuk

1. feladat

Válaszoljunk az alábbi tudománytörténeti kérdésekre:

- Ki szabadalmaztatta a neutronos láncreakciót?
- Kiről mondják, hogy az első reaktormérnök volt?
- Heisenbergnél doktorált, majd a hidrogénbomba atyjának is nevezték. Ki volt ő?
- A radioaktív nyomjelzés ötlete tőle származik. Ki volt ő?
- Ki adta a radioaktivitás nevet a sugárzási jelenségeknek?

Megoldás

a) Szilárd Leó, b) Wigner Jenő, c) Teller Ede, d) Hevesy György, e) Marie Curie. (Minden helyes válasz 1-1 pontot ér.)

2. feladat

Hogyan változna meg a H-atom mérete és energiaszintjei, ha

- az elektron tömege kétszeresére nőne,
- az elektron tömege felére csökkenne,
- a proton tömege kétszeresére nőne,
- az elektron töltése felére csökkenne,
- a proton töltése kétszeresére nőne?

A megoldásnál használd a mellékelt táblázatot!



Sükösd Csaba (1947) a BME címzetes egyetemi tanára, az ELFT elnökségi tagja. Kísérleti magfizikus, aki kísérleti munkáját nagyrészt külföldi kutatóintézetekben végezte. Kutatási területe a magreakciók, óriásrezonanciák és némely asztrofizikailag releváns magreakció vizsgálata radioaktív ionnyalábokkal. Marx György tanítványaként részt vett a 70-es évek MTA oktatási kísérletében. Azóta is szoros kapcsolata van a fizikatanárok közösségével, több tanár- és oktatóval kapcsolatos program vezetője.

Megoldás

Az ajánlott irodalmakban több helyen is szerepelnek a következő, H-atomra vonatkozó képletek:

$$r_n = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m_e q_e^2} n^2, \text{ valamint } E_n = -\frac{m_e q_e^4}{8 h^2 \epsilon_0^2} \frac{1}{n^2}.$$

Ezek alapján a válaszok könnyen megadhatók. (Alapállapotban $n = 1$.) A töltésváltozások hatásának megítéléséhez vegyük figyelembe, hogy a töltések a Coulomb-energiából származnak, azaz például a q_e^2 -ben az egyik q_e a proton töltéséből, a másik q_e az elektron töltéséből származik. Hasonlóképpen, a q_e^4 -ben q_e^2 származik a proton, és q_e^2 az elektron töltéséből.

(Megjegyzés: egyes függvénytáblázatokban hibásan szerepel a H-atom energiájának képlete: a töltés hatványkitevője hiányzik. Ennek alapján készült megoldásokat nem lehet elfogadni.)

paraméterének változása	H-atom méretének változása	energiaszintjeinek változása
a) Elektron tömege kétszeresére nő	Csökkenne az elektron kvantumos nyüzsgése, ezért felére csökkenne az atom egyensúlyi mérete	A negatív energiaszintek kétszeresére mélyülne
b) Elektron tömege felére csökken	Nőne az elektron kvantumos nyüzsgése, ezért kétszeresére nőne az atom egyensúlyi mérete	A negatív energiaszintek felére csökkennének
c) Proton tömege kétszeresére nő	A méretet a proton tömege nem befolyásolná	Energiaszintek változatlanok maradnának
d) Elektron töltése felére csökken	A proton vonzása csökkenne, a méret kétszeresre nőne	A negatív energiaszintek energiája negyedére csökkenne
e) Proton töltése kétszeresére nő	A proton vonzása nőne, a méret a felére csökkenne	Az energiaszintek négyszer mélyebbek lennének

Mind a 10 részfeladat fél-fél pontot ér.

3. feladat

Egy 1 MeV energiájú gamma-foton kölcsönhatásba lép

- egy nyugvó elektronnal;
- egy nyugvó H-atommal;
- egy nyugvó atommaggal.

Mindhárom esetben csak foton – részecske között lép fel kölcsönhatás, és tegyük fel, hogy a fotonnal kölcsönható atomi részek egyben maradnak.

Kérdések:

- Mely kölcsönhatás(ok)nál nyelődhet el (részecskéként megsemmisül) a foton?
- Ha elvileg létrejöhet a kölcsönhatás, akkor milyen feltételnek kell teljesülni?

Megoldás

1–2) Csak az atommaggal való kölcsönhatás során történhet foton elnyelődése. Ennek feltétele, hogy az atommagnak legyen olyan energiaszintje, amelyre gerjeszthető a mag úgy, hogy a lendület- és energia-megmaradás is teljesüljön. (2 pont)

A másik két esetben ez nem jöhet számításba:

Nyugvó elektronnál azért nem, mert az elektronnak nincs belső szerkezete, így az nem gerjeszthető. Ugyanakkor, mint nyugalmi tömeggel rendelkező részecske, nem tudja átvenni a fotontól annak lendületét, és az azzal arányos energiáját is. Könnyen belátható, hogy ellentmondásra jutunk. Tegyük fel, hogy a meglökött elektron átveszi a foton p_γ lendületét. Ekkor az energiamegmaradás a következőképpen írható fel:

$$p_\gamma c + m_0 c^2 = \sqrt{(p_\gamma c)^2 + (m_0 c^2)^2},$$

hiszen a kezdő állapotban van egy foton és egy nyugvó elektron (az egyenlet bal oldala, m_0 az elektron nyugalmi tömege), végállapotban pedig csak egy elektron van, amelynek lendülete megegyezik a foton lendületével (az egyenlet jobb oldala).

Négyzetre emelés után azt kapjuk, hogy az egyenlőség akkor teljesülhet, ha

$$2 p_\gamma c m_0 c^2 = 0,$$

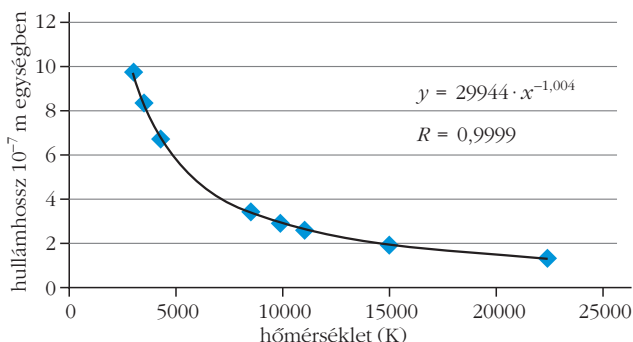
Mivel $m_0 > 0$, ez csak akkor teljesíthető, ha $p_\gamma = 0$ lenne. Ekkor viszont nincs foton. (2 pont)

b) Ugyanez a helyzet a H-atom esetében is. Igaz ugyan, hogy a H-atom gerjeszthető, de a foton energiája túlságosan nagy (MeV) a 13,6 eV ionizációs energiához képest, tehát a H-atom szétesne, ha ekkora energiát nyelne el (1 pont).

4. feladat

Az alábbi ábra néhány csillag által kibocsátott fény maximális intenzitásánál mért hullámhosszát és a csillag felszíni hőmérsékletének (K) kapcsolatát mutatja. A hullámhosszak a függőleges tengelyen 10^{-7} m egységben vannak. Az ábrán szereplő csillagok névsorban: Achernar, Arcturus, Betelgeuse, Deneb, Proxima Centauri, Rigel, Sirius, Spica.

Csillagok által kibocsátott fény maximális intenzitásánál mért hullámhossza a felszíni hőmérséklet függvényében.



Melyik törvény olvasható ki a grafikonból? Határozzuk meg a törvényben szereplő állandó értékét a grafikon alapján!

Megoldás

Az ábrán szerepel az Excel által megadott illesztés képlete is. Ezt a hullámhosszal és a hőmérséklettel felírva kapjuk (jó közelítéssel)

$$\lambda = \frac{29\,944}{T}.$$

Azaz a két paraméter között jó közelítéssel fordított arányosság áll fenn. (Ne felejtjük el, hogy itt a hullámhossz 10^{-7} m egységekben van!) (2 pont)

Átrendezve ezt a következő módon is írhatjuk:

$$\lambda T = \text{konstans}.$$

Ez a Wien-féle eltolódási törvény. (2 pont)

Ha a hullámhosszat méterben, a hőmérsékletet kelvinben adjuk meg, akkor a konstans az illesztés alapján: $2,9944 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$ (1 pont). A Wien-féle konstans irodalmi értéke: $2,8978 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$.

5. feladat

Korunk egyik legnagyobb műszaki teljesítményének számító, a CERN-ben megépített LHC (Large Hadron Collider = Nagy Hadronütköztető) gyorsítóját 2008-ban kapcsolták be először. A föld alá helyezett, közel kör alakú 26,7 km területű gyorsítóban 7 TeV (tera = 10^{12}) energiájú protonok keringenek és ütköznek. A teljes terület mentén 2808 csomagban keringenek a protonok. Egy csomagban $1,15 \cdot 10^{11}$ darab proton van.

a) Mekkora egy protoncsomag teljes energiája?

b) Ha egy 150 kg tömegű kismotor ekkora mozgási energiával rendelkezne, mekkora sebességgel mozogna?

c) Mekkora a teljes terület mentén egy irányban mozgó protonok energiája?

d) Mekkora tömegű 25 °C hőmérsékletű aranytömböt lehetne megolvasztani ekkora energiával?

Adatok: az arany C fajhője $126 \text{ J/(kg}^\circ\text{C)}$, olvadáspontja: $1337,6 \text{ K}$, L olvadáshője $64,9 \text{ kJ/kg}$.

Megoldás

a) Egyetlen részecske energiája:

$$7 \text{ TeV} = 7 \cdot 10^{12} \text{ eV} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \frac{\text{J}}{\text{eV}} = 1,12 \cdot 10^{-6} \text{ J}.$$

Tehát $E = 1,15 \cdot 10^{11} \cdot 1,12 \cdot 10^{-6} \text{ J} = 1,29 \cdot 10^5 \text{ J}$ egy csomag teljes energiája. (1 pont)

b) A kismotor

$$v = \sqrt{\frac{2E}{m}} = \sqrt{\frac{2,58 \cdot 10^5}{150}} = 41,47 \frac{\text{m}}{\text{s}} \approx 149 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

sebességgel száguldana. (1 pont)

c) A teljes terület mentén egy irányba mozgó összes proton $E_{\text{össz}} = 1,29 \cdot 10^5 \cdot 2808 = 362,2 \text{ MJ}$ energiával rendelkezik. (1 pont)

d) Ezen összenergia az arany olvadáspontig való melegítésére és ott megolvasztására fordítódik, azaz

$$E_{\text{össz}} = C m \Delta T + L m,$$

amiből kapjuk hogy

$$m = \frac{E_{\text{össz}}}{C \Delta T + L} = 1849 \text{ kg}$$

tömegű aranyat olvaszthatnánk meg. (2 pont)

6. feladat

Legalább mekkora a nukleonok keV egységekben kifejezett kinetikus energiája az $A = 125$ tömegszámú atommagon belül? Adjunk rá becslést!

Adatok: $r_0 = 1,2 \cdot 10^{-15} \text{ m}$, $m_{\text{nukleon}} \approx 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$, $\hbar = 1,055 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$.

Megoldás

Ezen atommag sugara

$$r = r_0 \sqrt[3]{A} = 1,2 \cdot 10^{-15} \cdot 5 = 6 \cdot 10^{-15} \text{ m}.$$

A határozatlansági relációból:

$$\Delta x \Delta p_x \geq \hbar,$$

azaz

$$\Delta p_x \geq \frac{\hbar}{\Delta x}.$$

A hely bizonytalanságát becsüljük az atommag átmérőjével, azaz $\Delta x = 2r = 1,2 \cdot 10^{-14} \text{ m}$. Természetesen a másik két dimenzióra is ugyanígy igaz, azaz $\Delta x = \Delta y = \Delta z$. Ezekből következik, hogy

$$\Delta p_x = \Delta p_y = \Delta p_z \geq \frac{\hbar}{\Delta x}$$

a nukleon minimális lendülete. (2 pont)

A nukleon kvantumnyüzgésből származó

$$E = \frac{(\Delta p)^2}{2m} = \frac{\Delta p_x^2 + \Delta p_y^2 + \Delta p_z^2}{2m} = 3 \frac{\hbar^2}{2m \Delta x^2}$$

mozgási energiájára a lendületbizonytalanságból adhattunk becslést. (2 pont)

Behelyettesítve a $\Delta x = 1,2 \cdot 10^{-14} \text{ m}$ helybizonytalanságot, kapjuk: $E \geq 434 \text{ keV}$. (1 pont)

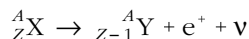
Természetesen ez csak a legalacsonyabb energiájú állapotban lévő nukleonok kinetikus energiája. A Pauli-elv miatt a többi nukleon egyre nagyobb kinetikus energiájú állapotba kényszerül, így a legmagasabb energiájú betöltött állapotban lévő nukleon kinetikus energiája ennél sokkal nagyobb – akár 30 MeV is – lehet.

7. feladat

Létezik-e olyan atommag, amely pozitronkibocsátással bomlik, de elektronbefogással nem? Indokoljuk meg!

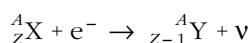
Megoldás

A pozitronkibocsátás során:



az atommagban egy proton neutronná alakul át, miközben egy pozitront és egy neutrínót bocsát ki. (1 pont)

Az elektronbefogás során:

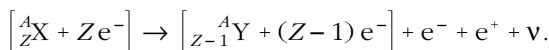


is az atommag egy protonja alakul át neutronná, mivel befog egy elektront az atommag körül elhelyezkedő elektronok közül (legvalószínűbben a maghoz legközelebb eső 1s pályáról), és egy neutrínó bocsátódik ki. (1 pont)

Hasonlítsuk össze a két folyamat energetikai feltételét! Mivel földi világunk semleges atomokból áll, célszerű a teljes folyamat (semleges atomokból semleges atomok képződése) teljes energiáját összehasonlítani.

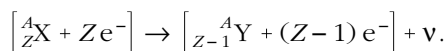
Írjuk fel a fenti reakciókat, figyelembe véve az egyes atomok elektronjainak számát is! Először az egyenlet mindkét oldalához adjunk Z darab elektront!

A pozitronemisszió:



Az egyenlet mindkét oldalán a szögletes zárójelekben a semleges atomok összetétele szerepel. Mivel a leánymag rendszáma eggyel kisebb, azért az egyenlet mindkét oldalához hozzáadott Z darab elektrontól az egyenlet jobb oldalán, a pozitron mellett egy elektron külön jelenik meg.

Az elektronbefogás:



Itt az elektron befogása miatt a végállapotban már eleve eggyel kevesebb $(Z-1)$ elektron marad. Ezek alapján a pozitronemisszió feltétele:

$$M_X c^2 > M_Y c^2 + 2 m_e c^2$$

(1 pont), az elektronbefogás energetikai feltétele pedig:

$$M_X c^2 > M_Y c^2,$$

ahol m_e az elektron/pozitron tömege vonatkozik, M_X és M_Y pedig a semleges atomok tömege. (1 pont)

Nyilvánvaló, hogy amennyiben az előbbi feltétel teljesül, akkor szükségképpen teljesül az utóbbi is. (1 pont)

Ebből következik, hogy minden pozitront emittáló atommag befoghat elektront, de fordítva ez nem feltétlenül igaz. Tehát nem létezik olyan atommag, amely csak pozitronkibocsátással bomlik, de elektronbefogási folyamata nincs.

8. feladat

Egy laboratóriumból egy igen hosszú, állandó átmérőjű kábelcsatornán folyamatosan radioaktív toron gáz szivárog. A csatornában 2 m/s sebességgel halad előre a levegő, amelyben egyenletesen oszlik el a szennyező gáz. A laboratóriumtól 10 m távolságban a cső mellett a megengedett sugárzás 16-szorosát mérik. A toron a radon 220-as izotópja és felezési ideje 56 s.

a) A laboratóriumtól mekkora távolságra éri el a sugárzás a megengedett szintet?

b) A laboratóriumtól mekkora távolságban lesz a sugárzás a megengedett érték háromszorosa?

Megoldás

A mérés helyén a megengedett érték 16-szorosát mérik, ezért a felezési idő négyszeresének kell eltelnie ahhoz, hogy a sugárzás értéke megfelelő legyen. Ez $t = 224$ s. Ezen idő alatt a gáz a csatornában $s = vt = 448$ m méter utat tesz meg. Tehát a laboratóriumtól $10 + 448 = 458$ m távolságra lesz a sugárzás intenzitása elfogadható. (2 pont)

A mérés helyétől 448 méterre a sugárzás intenzitása a kezdeti A_0 érték $1/16$ -od része. A keresett helyen ennek háromszorosát mérhetjük. Az aktivitás t' idő múlva lesz ennyi.

$$3 \frac{A_0}{16} = A_0 2^{-\frac{t'}{T_{1/2}}}.$$

Logaritmálás és az adatok behelyettesítése után a t' idő kifejezhető:

$$t' = -56 \cdot \frac{\lg \frac{3}{16}}{\lg 2} = 135,24 \text{ s.}$$

Ennyi idő alatt a levegő $s' = vt' = 270,48$ métert halad előre a mérőhelytől. Tehát a labortól $10 + 270,48 = 280,48$ méterre lesz az aktivitás a megengedett érték háromszorosa. (3 pont)

9. feladat

20 MeV energiájú protonok 500 mA-es nyalábja egy céltárgyra esik, ahol teljesen elnyelődik.

a) Másodpercenként hány proton nyelődik el?

b) Mekkora teljesítménnyel fűti a protonnyaláb a céltárgyat, ha a protonok teljes kinetikus energiája hővé alakul?

c) Hány százalékkal nagyobb a protonok relativisztikus tömege, mint nyugalmi tömege?

d) Mekkora erőt fejt ki a protonnyaláb az elnyelődő céltárgyra?

Megoldás

a) Az 500 mA áram azt jelenti, hogy másodpercenként 500 mC töltés halad át egy felületen (például a céltárgyon). Mivel egy proton töltése $1,6 \cdot 10^{-19}$ C, ezért a másodpercenként

$$N = \frac{500 \cdot 10^{-6}}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 3,125 \cdot 10^{15}$$

számú proton nyelődik el. (1 pont)

b) A 20 MeV energia olyan, mintha 20 MV feszültséggel gyorsítottuk volna a protonokat. Azaz

$$P = UI = 20 \cdot 10^6 \text{ V} \cdot 500 \cdot 10^{-6} \text{ A} = 10\,000 \text{ W} = 10 \text{ kW}$$

a nyaláb (villamos) teljesítménye. (1 pont)

c) A teljes energia és a mozgási energia kapcsolata: $mc^2 = E_{\text{kin}} + m_0 c^2$. Ebből a teljes relativisztikus tömeg éppen a mozgási energiának megfelelő tömeggel nagyobb a nyugalmi tömegnél. Azaz

$$\frac{E_{\text{kin}}}{m_0 c^2} = 2,13\%$$

a keresett növekmény. (1 pont)

d) A protonnyaláb által kifejtett erőt az időegység (1 s) alatt a céltárgynak átadott lendületből tudjuk meghatározni. Mivel a protonok mozgási energiája sokkal kisebb, mint a nyugalmi tömegéből számított energia, ezért számolhatunk klasszikusan. Ekkor egyetlen proton lendülete:

$$p = \sqrt{2 m_0 E_{\text{kin}}} = \sqrt{2 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot 20 \cdot 10^6 \text{ eV} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \frac{\text{J}}{\text{eV}}} = 1,03 \cdot 10^{-19} \frac{\text{kg m}}{\text{s}}$$

Elnyelődésekor minden proton ennyi lendületet ad át a céltárgynak. Azt viszont korábban kiszámoltuk, hogy 1 s alatt $3,125 \cdot 10^{15}$ proton nyelődik el, így az összes lendületátadásból (mivel $\Delta t = 1$ s)

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t} = 3,125 \cdot 10^{15} \cdot 1,03 \cdot 10^{-19} = 3,22 \cdot 10^{-4} \text{ N}$$

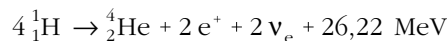
a nyaláb által kifejtett erő. (2 pont)

10. feladat

Mekkora a felszíni hőmérséklete annak a Naphoz hasonló csillagnak, amelynek sugara 750 ezer kilométer, és a csillagtól mért 220 millió kilométer távolságban a neutrínófluxus értéke $5,9 \cdot 10^{13} \text{ 1/(m}^2\text{s)}$ (vagyis 1 m^2 merőleges felületen másodpercenként ennyi neutrínó halad át)?

Megoldás

A Naphoz hasonló csillagokban a fúziós energiatermelés a proton-proton ciklusban történik, amelyben sok részfolyamat során összességében a



folyamat zajlik. (1 pont)

A csillagtól mért 220 millió kilométer távolságban található ϕ_ν neutrínófluxusból a csillagban másodpercenként keletkező neutrínók száma meghatározható, hiszen ha ismerjük, hogy mennyi neutrínó halad át másodpercenként 1 m^2 -en, akkor ki tudjuk számolni, hogy

$$\frac{\Delta N_\nu}{\Delta t} = \phi_\nu 4 \pi d^2 = 3,5885 \cdot 10^{37} \frac{1}{\text{s}}$$

halad át a $d = 220$ millió kilométer sugarú gömb teljes felszínén. (1 pont)

Mivel minden 26,22 MeV felszabadult energia két neutrínó keletkezésével jár, ezért minden neutrínóhoz 13,11 MeV energia felszabadulása tartozik, azaz

$$P = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta N_\nu}{\Delta t} \cdot 26,22 \frac{\text{MeV}}{\text{s}} = 7,527 \cdot 10^{25} \text{ W}$$

a csillag teljesítménye. (1 pont)

A csillag felszínének (R sugarának) ismeretében a Stefan–Boltzmann-törvény alapján

$$T = \sqrt[4]{\frac{P}{\sigma 4 \pi R^2}} \approx 3700 \text{ K}$$

felszíni hőmérséklet adódik. (2 pont)

Az elődöntő eredményei

Az elődöntő feladatait 44 fő I. kategóriás, és 23 fő junior versenyző teljesítette olyan szinten, hogy dolgozataikat a javító tanárok be tudták küldeni a BME Nukleáris Technika Tanszékére további értékelés és rangsorolás végett. Ezek megoszlását mutatja a 2. táblázat. (A zárójelben lévő számok itt is a 2017-es eredmények.)

A vidéki iskolák a hibahatáron belül 2018-ban is ugyanolyan eredményesek voltak mindkét kategóriá-

2. táblázat		
Az I. forduló után beküldött dolgozatok megoszlása, zárójelben a 2017. évi adatok		
	I. kategóriás	II. kategóriás
budapesti	16 (24)	8 (13)
vidéki	28 (29)	15 (12)
határon túli	0 (0)	0 (0)
összesen	44 (53)	23 (25)

ban, mint 2017-ben. A budapestiek azonban gyengébben teljesítettek, ami meglepő, hiszen 2018-ban jóval több budapesti versenyző regisztrált (178), mint 2017-ben (118). Enyhe és nem arányos emelkedést vártunk, hiszen sok olyan budapesti tanuló (és iskola) lehetett, aki először ismerkedett az Országos Szilárd Leó Verseny feladataival. Viszont öröndetes a budapesti junior kategóriás tanulók tavalyinál lényegesen jobb szereplése, ami reményt ad arra, hogy a következő években felkészültebb tanulók versenyeznek majd. Sajnos, határon túli iskolában továbbra sem született olyan dolgozat, amely elérte volna a továbbküldési szintet.

Az Országos Szilárd Leó Fizikaverseny első fordulójából beküldött dolgozatok ellenőrzése után egy egyetemi oktatókból álló bírálóbizottság a legjobb 10 junior versenyzőt és a legjobb 20 első kategóriás versenyzőt hívta be a 2018. április 21-én megrendezett

döntőre. Sajnos két bejutott első kategóriás versenyző csak túl rövid idővel a verseny előtt jelezte, hogy nem tud részt venni, így a döntőben szereplő első kategóriás tanulók száma 18-ra csökkent.

Idén négy lány jutott a verseny döntőjébe: *Csuba Boglárka* és *Krasznai Anna* (Vajda János Gimnázium, Keszthely), valamint *Világos Blanka* (Szent István Gimnázium, Budapest) az I. kategóriában, továbbá *Sajgó Anna Mária* (SZTE Gyakorló Gimnázium és Általános Iskola) a juniorok között.

A verseny döntőjét – mint eddig minden évben – Pakson, az Energetikai Szakgimnázium és Kollégiumban (ESZI) rendeztük 2018. április 20. és 22. között. A döntő zökkenőmentes lebonyolításáért *Csajági Sándor* igazgatóhelyettes úrnak, valamint *Csanádi Zoltán* igazgató úrnak tartozunk köszönettel.

Folytatása következik.

A TIZEDIK NUKLEÁRIS SZAKTÁBOR

Mester András
az MNT tanári tagozatának elnöke

Felsőfokú műszaki szakemberek iránti igény az energetikában

A Magyar Nukleáris Társaság (MNT) hamar felismerte, hogy a duális képzések korában fontos, hogy már a középiskolás diákokat megnyerjék a megfelelő szakterületek számára. Nagyon sok tehetséges diák azért nem választ bizonyos szakmákat, mert nem rendelkezik megfelelő ismeretekkel. Éppen emiatt lényeges, hogy még a pályaválasztás előtt megfelelő tájékozottsággal bírjanak a fiatalok. (A felsőfokú műszaki végzettségük közül speciális energetikai, atomerőművi (szakmérnöki) továbbképzésben részesültek aránya 2009-ben 11% volt.)¹ Annak érdekében, hogy a nukleáris ipar szakemberigénye kielégíthető legyen, a jövő atomerőműveinek, kutatóintézteinek, oktatási intézményeinek humán erőforrásáról időben gondoskodni kell (*1. ábra*). A nukleáris képzés jelentősége megnőtt, hiszen elkezdődött a két új paksi blokk építésének előkészítése. Miután ezek a blokkok 60 éven át működnek majd, az atomerőmű és a hozzá kapcsolódó tudományos, szakmai háttérintézmények is hosszú távra kínálnak perspektívát a fiataloknak.



Mester András Rátz Tanár Úr Életműdíjas nyugalmazott fizikatanár a Kossuth Lajos Tudományegyetem matematika-fizika szakán diplomázott. A kezdeményezésére indított Városi Fizikavetélkedőt tizennégy éven át szervezte a Diósgyőri Gimnáziumban. Közel húsz éve vesz részt az ELFT és az MNT munkájában. 1998 óta tagja a Szilárd Leó Fizikaverseny versenybizottságának. 2007 óta egyik fő szervezője az MNT Nukleáris Szaktáborának, ahol részt vesz a programok összeállításában és lebonyolításában.

Nukleáris szaktáborok

A nukleáris szakemberképzés erősítése, a tehetséggondozás igénye már korábban is számos alkalommal felmerült, mielőtt 2007 tavaszán megfogalmazódott a nukleáris szaktábor megvalósításának ötlete. Középis-kolások részére az I. Nukleáris Szaktábort 2007 nyarán indította az MNT. Az első tábor sikerét követően az MNT fontosnak tartotta a tábor következő években való megszervezését is.

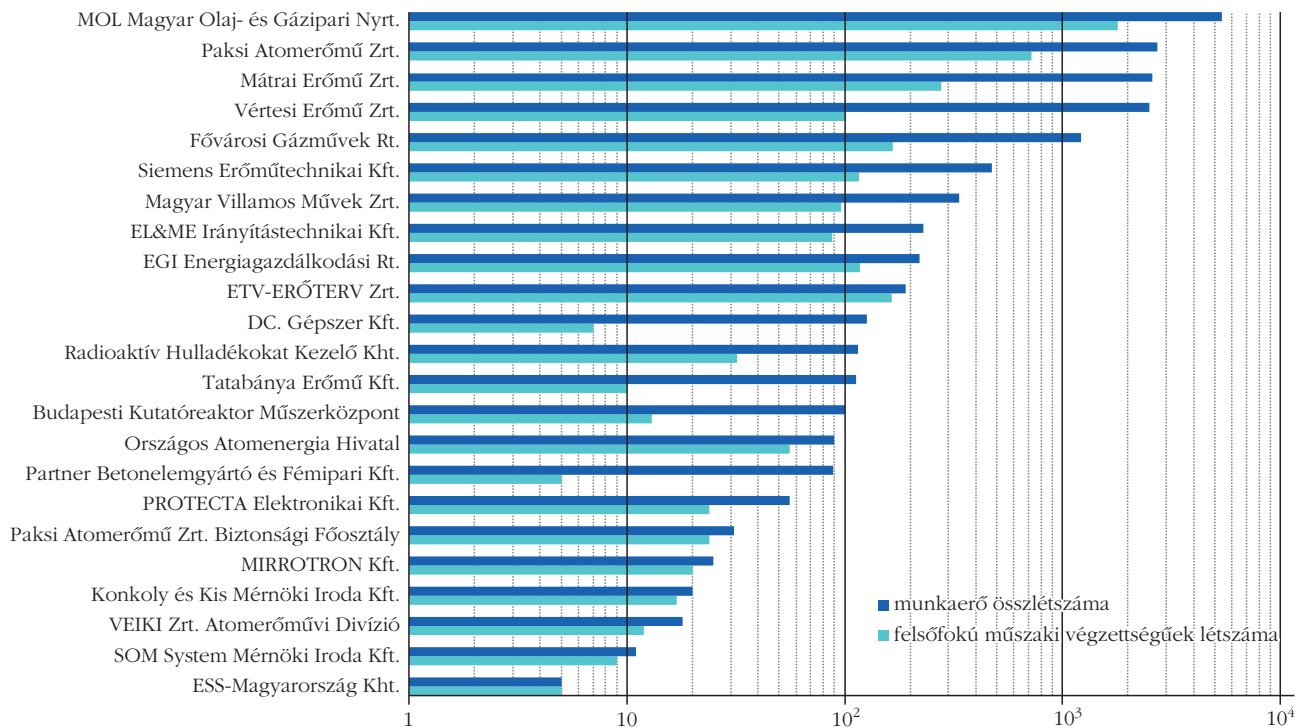
A tábor kiváló lehetőséget jelent a fiatalok számára a szakmai ismeretek elsajátítására, a területen dolgozó szakemberek megismerésére. A táborban megszerzett tudás és képességek alapján a fiatalokat be lehet vonni a tudományos kutatásokba, elősegítve szakmai fejlődésüket, egyúttal megalapozva az utánpótlásképzést.

Az eltelt 10 év lehetőséget ad némi elemzésre is: a visszajelzések alapján a táborozók közül – akik meghatározó élményként tekintenek a táborra – többen választották a fizikusi vagy mérnöki pályát. Örömmel tapasztaljuk, hogy velük egyre többször találkozunk szakmai rendezvényeken.

X. Nukleáris Szaktábor az MNT jelentős támogatásával

2016-ban a korábbi gödi helyszínről Keszthelyre vittük a tábor. Ezzel is igyekeztünk vonzóbbá tenni a rendezvényt. A X. Nukleáris Szaktábor 2017. július

¹ Aszódi Attila: *Az energetikai, műszaki képzés és tájékoztatás helyzete*. Magyar Energetikusok Kerekasztala, 2009.06.10., 22. old. http://www.mee.hu/files/images/Asz_di.pdf



1. ábra. Az energetikában dolgozók létszáma, egy 2006-os felmérés eredményei alapján.²

2-től 7-ig tartott, az előadások és a szállás az előző évi helyszínen, a Keszthelyi VSZK³ tantermeiben és kollégiumában voltak.

A résztvevők között évek óta többen jelen vannak az Országos Szilárd Leó Fizikaverseny versenyzői közül is. A helyezettek kedvezményrel vehetnek részt a táborozáson.

Július 2-án 30 diákkal indítottuk a tábort. A tábor legfőbb céljának – a diákok érdeklődésének felkeltése a nukleáris technika iránt – elérése érdekében törekedtünk az igényes, változatos program kialakítására, ugyanakkor nagy hangsúlyt fektettünk az elméleti és gyakorlati oktatásra is. Délelőttök zömében tapasztalt szakemberek, egyetemi oktatók tartottak előadásokat (2. ábra). Közöttük a BME Nukleáris Technikai Intézetének oktatói (Boros Ildikó, Horváth András, Kis Dániel, Pesznyák Csilla, Pokol Gergő), az MTA Ener-

2. ábra. Pokol Gergő előadás közben.



giatudományi Központjának kutatói (Fábián Margit, Hózer Zoltán), a Paksi Atomerőmű Zrt. vezető szakemberei (Cserbáti András, Lencsés András), az Eötvös Loránd Tudományegyetem (Horváth Ákos, Radnóti Katalin) és a Debreceni Egyetem (Trócsányi Zoltán) tanárai szerepeltek. A mérési, kísérleti, játékos programokat a magfizika oktatásában vezető szerepet játszó középiskolai tanárok (Farkas László, Mester András, Oláh Éva, Pántyáné Kuzder Mária, Ujvári Sándor) vezették.

Szakmai előadások

A program összeállítását Mester András koordinálta. Összesen 17 előadás hangzott el. A bevezetőt követően – többek között – hallhattak

- az atomerőművekről, a fűtőelemekről,
- a fúzióról,
- a hulladéktárolásról,
- a sugárvédelemről,
- a nukleáris eseményskáláról,
- az orvosi alkalmazásokról,
- a sötét anyagról,
- a részecskefizikáról,
- az MNT infografikáiról,
- a radonról,
- a Szilárd Leó fizikaversenyről és
- a Paksi Atomerőmű mérőkocsijáról.

A több témát érintő előadásokkal fontosnak tartottuk, hogy a magfizikát ne csak egy-egy szakterülettel

² I. m. 19. old.

³ Keszthely Város Vendéglátó, Idegenforgalmi, Kereskedelmi Szak-képző Iskolája és Kollégiuma



3. ábra. A X. Nukleáris Szaktábor résztvevői és szervezői (ebben az évben lila egyentrikóban).

azonosítsák a táborozókat. Az MNT ifjúsági szervezetével a FINE-vel (Fiatalok a Nukleáris Energetikáért) Sárdy Gábor ismertette meg a táborozókat.

Mérések, laboratóriumi gyakorlatok a Vajda János Gimnáziumban

2017-ben hangsúlyt kívántunk helyezni a modern fizika elemeinek gyakorlatban való megismerésére. A legtöbb iskolában kevés lehetőség van az atomfizikával kapcsolatos mérések elvégzésére, kísérletek megtekintésére. Nem kis munkával sikerült egy teljes délutáni programot összeállítani (4. ábra). A mérésekhez, kísérleti bemutatókhoz az eszközök a keszthelyi Vajda János Gimnáziumból, a miskolci Herman Ottó Gimnáziumból, a paksi Energetikai Szakgimnázium és Kollégiumból, a székesfehérvári Lánosz Kornél Gimnáziumból és a miskolci Diósgyőri Gimnáziumból kerültek ki.

A laboratóriumi program része volt:

- a Planck-állandó meghatározása
- a béta-sugárzás eltérülésének mérése
- a radon felezési idejének meghatározása
- a Franck–Hertz-kísérlet elemzése
- színeképek elemzése spektroszkóppal
- az elektron hullámhosszának meghatározása diffrakciós csővel és
- tömegspektroszkópai kísérlet elemzése.

Egyéb szakmai programok

- Kísérleti bemutatót tartott Ujvári Sándor.
- *Játékos részecskefizika* címmel Oláh Éva vezetett esti programot a táborozók számára
- A Paksi Atomerőmű mérőkocsiját Lencsés András mutatta be a táborozóknak.
- Egy magfizika-feladatlapot – amelynek megoldását a tábor végén értékeltük – állítottunk össze a diá-

kok számára. A táborozók többsége igen komolyan dolgozott a feladatokon. Meglepően szép eredmények születtek.

Kiegészítő programok

Keszthely megismerése céljából az első nap Farkas László kolléga, a Vajda János Gimnázium matematika-fizika tanára rövid sétával egybekötött idegenvezetést tartott a városban.

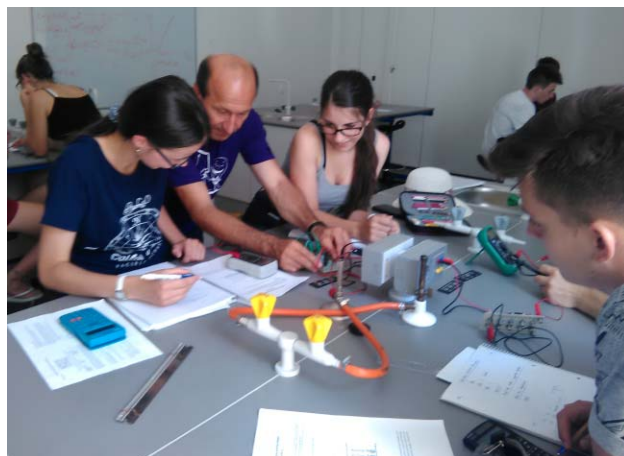
A második nap délutánján a Balatoni Múzeumot tekintették meg a diákok (5. ábra).

A tábor résztvevői meglátogatták a Hévízi Gyógyfürdőt, ahol egy ismeretterjesztő előadás után fürdésre is volt lehetőség.

Szabadidős programok

Szerencsénk volt az időjárással. A kezdeti hűvösebb időt követően minden lehető alkalommal strandlátoga-

4. ábra. Mérési gyakorlat a Vajda János Gimnáziumban Farkas László tanár úr vezetésével.





5. ábra. Csoportkép a Balatoni Múzeum előtt.

tást szerveztünk, így – a hévízi lehetőséget is beszámítva – majdnem minden nap tudtak fürödni a táborozók.

A kollégium sportpályáján és a tornateremben lehetőség adódott focizásra is, amit a diákok természetesen ki is használtak.

Az utolsó esti ünnepélyes keretek között megtartott záróvacsorán a táborozóknak alkalmuk volt a táborral kapcsolatos tapasztalataik elmondására. A vacsorán vendégként részt vett *Ördög Miklós*, az MNT elnöke, *Pántyáné Kuzder Mária*, az ELFT alelnöke, valamint *Kis Dániel*, a BME NTI docense.



A tábor teljes időtartama alatt a diákokkal volt *Mester András*, *Ujvári Sándor* és *Horváth András*, akik gondoskodtak a felügyeletről, illetve a programok lebonyolításáról.

Hatalmas munkát végzett és köszönet illeti *Farkas Lászlót* – egyik vendéglátónk, a Keszthelyi Vajda Já-

nos Gimnázium tanárát –, aki az előkészületi munkákban és a helyi szakmai-kulturális programok szervezésében is aktívan részt vett.

A táborozók véleménye, összegzés

Minden évben megkérjük a résztvevőket, hogy értékeljék a tábort. Volt néhány módosításra utaló javaslat (például: legyen több szünet az előadások között), amelyeket figyelembe veszünk a következő tábor szervezésekor. Elégedettek voltak a helyszínnel, a szakmai színvonallal, hasznosnak találták az előadásokat követő beszélgetések lehetőségét. Arra a kérdésre, hogy „Összességében elégedett vagy-e táborral?” igen pozitív válaszokat kaptunk. Ez azért is figyelemre méltó, mert ebben az évben több nyolcadik, illetve kilencedik osztályt végzett, úgynevezett kezdő is volt a táborban.

Infografika a 10 éves évfordulóról

A tizedik évforduló kapcsán infografika készült a táborról, amely összefoglalja az eltelt tíz év eseményeit. Az infografika elérhető az MNT honlapján (http://nuklearis.hu/sites/default/files/Nuktabor_0.jpg).

XI. Nukleáris Szaktábor

A XI. Nukleáris Szaktábort 2018. július 1-től 6-ig tartottuk az előző évek helyszínén Keszthelyen. Nagy örömünkre a résztvevők száma meghaladta a 30 főt. A táborral kapcsolatos információk az MNT honlapján érhetők el: <http://nuklearis.hu/nuklearis-szaktabor-0>.

RÁTZ TANÁR ÚR ÉLETMŰDÍJ, 2017

Mester András tanár úrral *Radnóti Katalin* beszélget

A 2017-ben kiadott Rátz Tanár Úr Életműdíj egyik díjazottja *Mester András*, amelyhez gratulálók!

Mester András 1978-ban végzett a Kossuth Lajos Tudományegyetemen matematika-fizika szakos középiskolai tanárként. Több középiskolában tanított Miskolcon, legtovább a Diósgyőri Gimnáziumban, innen is ment nyugdíjba 2015-ben. Azóta óraadó tanárként dolgozik az Európa Baptista Gimnázium, Szakgimnázium és Szakközépiskolában. A tanítás mellett évekig volt szaktanácsadó. Jelenleg is több társadalmi szervezet aktív tagja, az Eötvös Loránd Fizikai Társulat megyei csoportjának titkára volt, majd főtítkárhelyettese, később alelnöke, a Társulat Középiskolai Oktatási Szakcsoportjának elnöke. E mellett részt vesz a Magyar Nukleáris Társaság (MNT) elnökségének munkájában, ahol jelenleg a Tanári Tagozat elnöke.

Nős, felesége *Mesterné Csordás Judit* középiskolai tanár. Két gyermekük született, akik eddig három fiúunokával ajándékozták meg.

Kitüntetései, elismerései: Ericsson-díj, 2003; Szilárd Leó-díj, 2013; Pedagógus szolgálati emlékérem, 2016; Rátz Tanár Úr Életműdíj 2017.

Az alábbi interjúban felidézzük a tanár úr gazdag életpályájának néhány érdekes és fontos állomását.

– *Szerinted milyen a jó fizikatanár?*

– Az a jó tanár, aki érdekes órákat tart. Legyenek olyan érdekesek az órái, hogy magával tudja ragadni a gyerekeket. Ehhez fontos, hogy maga a tanár is szeresse a szaktárgyát, és ezt lássák a gyerekek.

– *Milyen tantárgy a fizika?*

– Az a meglátásom, hogy sok gyerek félreérti a tantárgy jellegét. Azt gondolja, hogy a fizika a mate-

matika egyik „torzszüleménye”. Pedig nem erről szól, hanem arról, hogy ismerjük meg a természet törvényeit. Azon senki nem csodálkozik, hogy a tyúk tojást tojik, de a gravitáción már igen. Pedig a természet arra is alkotott egy törvényt, meg erre is. És az lenne a fizikaoktatás célja, hogy ezen fontos és alapvető természeti törvényeket ismerjük meg, de úgy látom, az oktatás során ez elvész valahogy.

– Mikor döntötted el, hogy fizikatanár szeretnél lenni?

– Volt egy nagyon jó, lelkes fiatal fizikatanárom. Másrészt mindig szerettem dolgokat építgetni, összerakni, ezért vonzódtam a fizikához.

– Van-e kedvenc témaköröd?

– Több is van, de a nukleáris vonalon eléggé képviseltetem magam. 1994-ben voltam tanulmányúton a CERN-ben, amelyet Marx György professzor úr szervezett. Alapításától fogva tagja vagyok a Szilárd Leó Verseny zsűrijének. A felkészülést segítő több példatár szerkesztésében is részt vettem, amely a verseny feladatait és részletes megoldásait mutatja be a diákok és az őket felkészítő lelkes tanárok számára. Tehát a fizika számomra legkedvesebb fejezete elsősorban a modern fizika. Továbbá ez a fizika azon fejezete, ahol szembesülünk, hogy modellt kell alkotni a jelenségek leírásához, a mikrovilág törvényeinek megismeréséhez, azok matematikai megfogalmazásához, és e modellekkel próbálunk magyarázatokat adni a jelenségekre. A mikrovilág leírásához hullám-részecske kettősség használandó, ezt meg kell érteni. Itt jönnek rá a gyerekek, hogy igazán mi is a fizika.

Fontosnak tartom a diákok versenyeztetését. Igyekszem minden évben érdekes versenyfeladatokat kitűzni a fiatalok számára, amelyek közül kettőt szeretnék bemutatni.

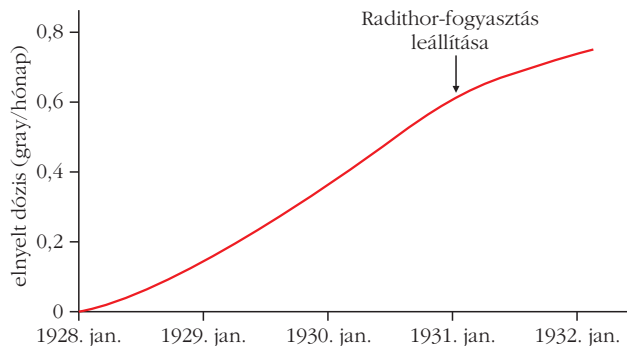
Az első a 2014. évi Szilárd Leó Fizikaverseny döntőjén kitűzött feladatom.¹

„A nagy rádium botrány” jelzővel illeték azt az esetet, amikor 1932. március 31-én Eben M. Byers többszörös milliomos, egykori golfbajnok testsúlyának jelentős részét elvesztve, drámai körülmények között meghalt. Byers – egy sérülést követően – roboráló („erősítő”) gyógyszerként Radithort fogyasztott. Egy Radithort tartalmazó fél uncias (1 uncia = 28,25 gramm) üvegcsé desztillált vízben ^{226}Ra és ^{228}Ra izotópokat tartalmazott. Az izotópok aktivitása nagyjából azonos, egyenként körülbelül 1-1 μCi ($\sim 37\text{ kBq}$) volt.

a) Mennyi volt az egyes izotópok tömege egy üvegcsében?

b) Mennyi volt az egyes izotópok által egységnyi idő alatt leadott energiák aránya?

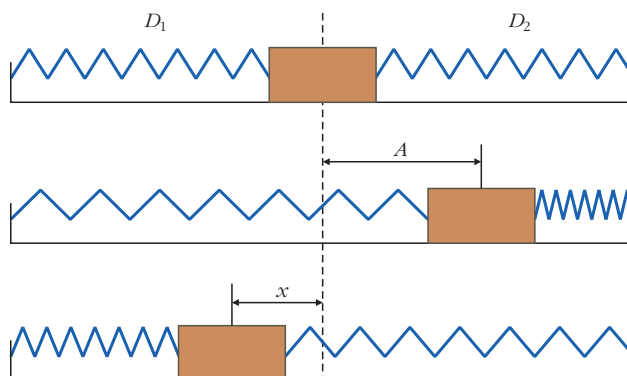
c) Az ábra Byers csontjaiban havonta elnyelt dózis becsült értékét mutatja. Mire lehet következtetni az ábrából?



Adatok: a ^{226}Ra α -sugárzó, $E_\alpha = 4,871\text{ MeV}$, felezési ideje 1600 év, a ^{228}Ra β^- -sugárzó, átlagos β -energia $\bar{E}_\beta = 7,2\text{ keV}$, felezési ideje 5,7 év.

2002-től 2015-ig szerveztem iskolámban Miskolcon, a Diósgyőri Gimnáziumban a Városi Fizikavetélkedőt. A második példát egy a 2009. évi feladataim közül választottam.

Egy vízszintes asztallapra két rugó közé, az ábra szerinti elrendezésben egy 0,5 kg tömegű testet helyezünk el. Kezdetben a rugók feszítetlen állapotban vannak.



Az asztal és a test között a tapadási súrlódási együttható $\mu_0 = 0,3$, a rugóállandók megegyeznek: $D_1 = D_2 = 50\text{ N/m}$.

a) Mekkora lesz a két rugóból álló rendszer rugóállandója? Miért?

b) Mekkora A távolsáig mozdíthatjuk a testet, hogy a rugók még ne rántsák vissza?

c) Mekkora a mozgási súrlódási együttható, ha az A helyről elindult test az egyensúlyi helyzetben való áthataladás után, a kezdeti x kitérés háromnegyedéig jut?

– Hogyan készültél az óráidra kezdő pedagógusként és hogyan manapság?

– Mindig készülök az óráimra, most is. Minden gyerekszoport más és más. Hiába vannak előre összeállított sémáim, az nem alkalmazható minden osztályra. Minden osztály karakterének megfelelően kell rájuk, az ő órájukra készülni.

– Megjelennek-e új eszközök a tanítási gyakorlatban?

– A fizika tanításához tartozó klasszikus didaktikai eszköz a kísérlet. Ellenben a mindennapi életben megjelent a számítógép. Én már évek óta digitális táblán tanítok. Ez sok dologra ad lehetőséget. Pél-

¹ A Scientific American folyóirat 1993. augusztusi számában megjelent cikk alapján. A feladat megoldását lásd: Fizikai Szemle 64/10 (2014) 364. oldal.



A díjátadóról készült fényképen Mester András (jobbra), a másik díjazott Piláth Károly (balra). Középen a díjat átadó Éry Gábor, az Ericsson Magyarországi igazgatója.

dál rendszeres probléma, hogy a diákok a feladatok megoldása során nem tudják numerikusan kiszámítani az eredményeket. Még akkor sem, ha esetleg a diák tudja az elméletet – a számítás problémát okoz. Ekkor kiteszem a digitális táblán az „asztalra” a számológépet, kinagyítjuk, és azon végezzük el a számítást az osztály számára teljes mértékben követhető módon. De emellett – természetesen – sok animáció, szimulációs program, videó is helyet kap a tanóráimon. A diákok számára sokat jelent az is, ha a tudósok képeit is látják, nem csak a róla elnevezett és megtanulandó törvényt.

A feladat megoldásánál a feladat szövegét – amelyhez kép, ábra, esetleg videórészlet tartozik – kivétem. A feladat megoldása mindig ott helyben, a gyerekekkel közösen születik meg. A digitális táblán létrejött dokumentumot, valamint az előre elkészített prezentációkat is megosztom a diákokkal. Így könnyű korábbi anyagokra hivatkozni, visszakeresni azokat. A diákok számára fontos segítséget jelentek ezek a szakanyagok a tanulásban, például a dolgozatokra való felkészülésben.

Az évek során kialakítottam a dolgozatok szerkezetét, amelyekben szerepel 8-10 tesztkérdés és 3-4 feladat. A tesztek általában könnyebbek, az elméleti anyagot tartalmazzák. Ha valaki ezeket jól megoldja, már elérte a kettes szintet. A jobb jegyhez a feladatok megoldásából is kell teljesíteni.

Szeretem alkalmazni az Excel programot, amikor a diákok számára állítok össze hasonló számításokat igénylő feladatokat. Például elektromosságtan témakörében a soros és a párhuzamos kapcsolások esetében mekkora az eredő ellenállás, mekkora feszültség esik az egyes áramköri elemeken, mekkora az áramerősség stb. Erre írtam egy programot, amelyben meg lehet adni a bementeti adatokat és az Excel gyorsan kiszámítja a többi hiányzó adatot. Így egyszerű több, különböző, de azonos számítási metódust alkalmazó

feladatot előállítani. Így 8-10 csoportot is létre tudok hozni egy osztályban.

A csúszási és tapadási sűrűdással kapcsolatos jelenséghez tartozó számítások is egyszerűen végezhetők. Például különböző erők hatására a test gyorsul, nem gyorsul stb. Néha beviszem a diákokat az informatikaterembe, hogy aki tud, írjon programot különböző jelenségekre.

– *A Nukleáris Tábor szervezése mit jelent számodra?*

– 2007-ben a Magyar Tudományos Akadémia Nagytermében volt egy *Aszódi Attila* professzor úr vezetett találkozó, ahol az atomerőművet gyártó cégek mutatkoztak be. Arról viszont nem esett szó,

hogy kik fognak dolgozni a majdani létesítményben. A tervezők rajzokon mutatták be, hogy milyen lesz egy nagy erőmű és néhány helyre pici embereket is rajzoltak. De azzal senki nem foglalkozott, hogy kik azok a pici emberek? Ekkor merült fel az ötlet: jó lenne olyan tábort szervezni, amely elősegítené a nukleáris témák iránt érdeklődő gyerekek felkarolását, és ez egyben fontos utánpótlásbázist is jelenthetne a nukleáris szakma számára. Az ötlet valóra vált és idén a tábort már 11. alkalommal rendeztük meg a középiskolás diákok számára a Magyar Nukleáris Társaság szervezésében. Az egy hetes, bentlakásos táborba mindig a nukleáris szakma képviselői jönnek előadást, különböző interaktív foglalkozást tartani a lelkes fiatalok számára.

Táboronként korábban átlagosan 23 fiatallal lehetett számolni – tavaly már 30-an voltak, idén még azt is meghaladták – 16 előadással és 3-4 látogatással, mint Paksi Atomerőmű Rt., ELTE TTK Magfizikai laboratóriumai, BME Tanreaktor, MTA EK laboratóriumai. A leggyakoribb előadási témák: nukleáris alapfogalmak, atomerőművek, hulladéktárolás, sugárvédelem, nukleáris medicina, képalkotó eljárások, a sugárzás a mindennapokban, nukleáris történelem. De azért nem marad ki a tábor programjából a szórakozás, sport és – nyár lévén – a fürdőzés.

– *Hogyan éled meg a fizika tantárgy fokozatos visszaszorulását?*

– Nehezen. De ennek az is oka lehet, hogy annyit változott a mindennapi világunk, hogy az átlagember már nehezen érti meg a körülöttünk lévő egyre bonyolultabb eszközök működését. Nagy lett a szakadék a szakmai ismeretekkel bíró szűk kör és az átlagfelhasználók között.

– *Milyen útravalót adnál általánosságban a fiataloknak, és konkrétan a fizikatanári hivatást választóknak?*

– Szeressék a fizikát és szeressék a gyerekeket!

NAGYFREKVENCIÁS JELEK KÁBELBENI TERJEDÉSÉNEK FIZIKAI ALAPJAI – 1. rész

Simon Ferenc

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Fizika Tanszék
és MTA–BME PROSPIN Lendület Kutatócsoport

Az egyetemi fizikaoktatásban azt találjuk, hogy a rádiófrekvenciás jelek terjedésének leírása sötét foltot képez. Már középiskolában is megfelelően oktatjuk az RLC-áramköröket, egyetemen pedig az optikai terjedési és törési törvényeket, azonban az 1 MHz – 10 GHz-es frekvenciatartományba eső jelekre úgy tekintünk, mintha ez a mérnöki tudományok „felségterülete” lenne. Pedig a modern mérés technika és mérési módszerek (például nanoelektronika, mágneses rezonancia) bemutatásához és megértéséhez ezen terület magabiztos ismerete szükséges. Fizikus szemmel nézve a témakör nem más, mint a Maxwell-egyenletek alkalmazása egy speciális esetre, azaz vezetékekre, kábelekre, adott esetben úgynevezett hullámvezetőkre. Amennyiben az olvasót valaha is izgatja, miért van minden nagyfrekvenciás műszerre a „bűvös $50\ \Omega$ ” írva, mit jelent a kábelvégi reflexió és az impedanciaillesztés, akkor kérdéseire a jelen és az ezt követő cikkünkben választ kap.

A vizsgálódásunk egyik legfontosabb üzenete, hogy az alacsony frekvenciás hálózatok vizsgálatakor megszokott leírásmód nagyobb frekvenciákon érvényét veszti, és a hagyományos áramköri jelenségeken túlmutató, szokatlan jelenségek lépnek fel, mint például a jelek visszaverődése (reflexiója). Ahhoz, hogy az elsődlegesen adódó kérdést, „Mi is az a nagyfrekvencia?” megválaszoljuk, vizsgáljuk meg a terület kialakulásának történetét!

A 19. század közepén felmerült az igény a nagy, akár kontinensnyi távolságban történő adattovábbításra, például tenger alatti kábelek segítségével (az első transzatlanti kábel 1858-ban helyezték üzembe). Hamar kiderült, hogy a vezetékekben történő jeltovábbításnál lényeges a hullámjelenségek figyelembevétele. Ez a technológiai fejlődés és az igény az elméleti leírásra időben közel volt a Maxwell-egyenletek

(1861) megszületéséhez. A vezetékekben terjedő hullámjelenségek leírását ma mint az úgynevezett *távíró-egyenleteket* (angolul *telegrapher's equations*) ismerjük. Ez lényegében a Maxwell-egyenletek által megjósolt elektromágneses hullámjelenségek egyik első gyakorlati alkalmazása. A távíróegyenletek gyakorlati sikere inspirálóan hatott az elektromágneses sugárzás későbbi felfedezésére (Hertz, 1886).

A fizikustanulmányok során legtöbbször felmerülő egyenáramú (DC) és alacsony frekvenciás váltóáramú (AC) hálózatok vizsgálatakor nem törődünk a jel véges terjedési sebességével. Feltételezzük, hogy adott ponton feszültséget kapcsolva egy áramkörre, annak hatása pillanatszerűen megjelenik az áramkör egészén. Gondoljunk csak egy RLC-áramkör jól ismert analízisére! Mindez nyilvánvalóan érvényét veszíti, amikor a jel számára szükséges terjedési idő, $t = d/c$ (itt d a kábel hossza, c a közegben érvényes fénysebesség) összemérhető a jel periódusidejével: $t \approx 1/f$ (a gyakorlatban inkább a $10 t \approx 1/f$ feltétel a használatos). Például a transzatlanti kábel esetére az így kapott frekvencia $f = 6$ Hz. Ez az eredmény azt jelenti, hogy a hullámjelenségek figyelembe vétele nélkül a transzatlanti kommunikáció csak ennél lényegesen alacsonyabb frekvencián, mai szóhasználatnál élve, 6 Hz *sávszélességen* (azaz 6 bit/s) mehetne csak végbe. Ezt az igen alacsony adatátviteli sebességet az első kábel lefektetése után a gyakorlatban is tapasztalták, ami elvezetett a távíróegyenletek leírásához.

A hullámjelenségek figyelembevétele a modern kommunikációs eszközöknél még fontosabb, mivel például 10 GHz-es vivőfrekvencián (ami egy elterjedt műholdas kommunikációs sáv) a hullámhossz mindössze 3 cm. Másik gyakorlati példánk a számítógépek, amelyek tipikusan 2-3 GHz-es jelekkel dolgoznak ($\lambda \approx 10$ cm). Ezeket a jeleket 10-20 cm távolságra juttatják el, így itt az áramkörök tervezésekor a hullámjelenségek figyelembevétele nyilvánvalóan szükséges.

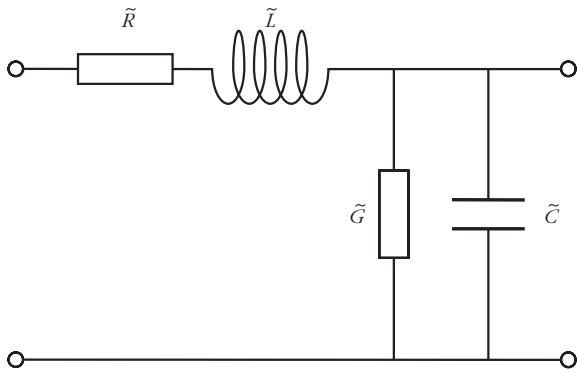
A távíróegyenletek

Tekintsük a jelet továbbító vezeték egy infinitezimálisan kicsi darabját, amelynek áramköri modellje az 1. ábrán látható. A helyettesítő képben minden fizikai mennyiség hosszegységre van normálva: legáltalánosabban egy soros, úgynevezett *elosztott ellenállás*, $\hat{R}$ (egysége ohm per méter), *elosztott induktivitás*, $\hat{L}$ (egysége henry per méter), *elosztott kapacitás*, $\hat{C}$ (egysége farád per méter), és a két vezeték közti *elosztott vezetés*, $\hat{G}$ (egysége siemens per méter) jellemzi.

A szerző köszönetet mond a cikksorozat alapjául szolgáló egyetemi laboratóriumi gyakorlat leiratának elkészítésében közreműködő Gyüre-Garami Baláznak, Márkus Bencének, Fülöp Ferencnek és Halbritter Andrásnak.



Simon Ferenc fizikus, egyetemi tanár (BME), az MTA doktora. Érdeklődési területei: kísérleti szilárdtest spektroszkópia, a spintronika elméleti és kísérleti aspektusai, a fizika népszerűsítése. Legfontosabb eredményei: ESR-jel felfedezése új fémekben (MgB_2 , bórral dőpolt gyémánt, alkálival dőpolt grafén); spinrelaxáció egyesített elméletének kidolgozása; elektron- és magspinnel nyomjelzett szén nanocsövek előállítása. ERC- és Lendület-pályázat vezetője. 8 TDK, 31 BSc/MSc és 3 PhD témavezetője.



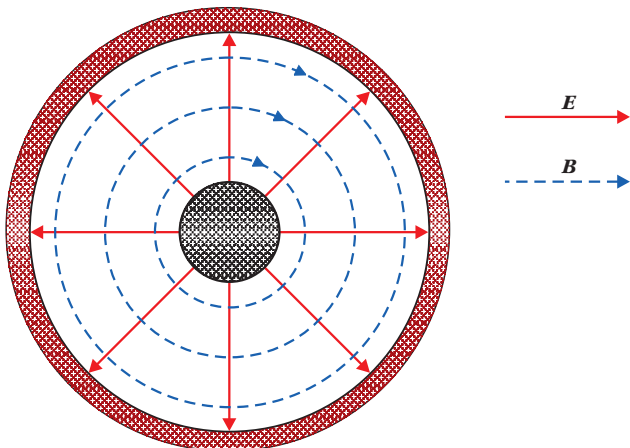
1. ábra. A jelterjedésben vizsgált vezeték egy darabjának áramkörti modellje.

A soros ellenállás oka a vezetékdarabokban lévő veszteség, az induktivitás oka pedig az, hogy a két vezeték között mágneses teret találunk, amihez önindukció is tartozik. A $\tilde{G}$ írja le a két vezetékdarab közti elektromos vezetést, szivárgást. A kapacitás oka pedig az, hogy a két vezeték nincs azonos potenciálon és közöttük valamilyen dielektrikum helyezkedik el. Ideális esetben $\tilde{R}$ és $\tilde{G}$ értéke 0.

A fenti paraméterek közül $\tilde{R}$ értéke elsősorban a vezető anyagi minőségétől függ (értéke nagy frekvencián a *szkineffektus* miatt megnő), azonban $\tilde{L}$, $\tilde{C}$ és $\tilde{G}$ értéke nagyban függ attól, hogy a két vezeték egymáshoz képest hogyan helyezkedik el (például sodort érpárra $\tilde{L} \approx 0$, de $\tilde{C}$ értéke nagy). Egymástól adott távolságra elhelyezkedő drótpár esetére $\tilde{L}$ értéke fix, viszont $\tilde{C}$ nagyban függ a környező dielektrikumtól (utóbbi probléma a sós víz miatt a transzatlanti kábelnél merült fel).

Mindezen problémákra kínál megoldást a koaxiális kábel (*Heaviside*, 1880), amiben a földelt külső vezetéken belül helyezkedik el a másik vezeték. Ennek előnye, hogy minden paramétere jól definiált és a környezetre érzéketlen, mivel mind az elektromos, mind a mágneses erővonalak a koaxiális kábel két vezetéke között vannak, amint a 2. ábra mutatja.

2. ábra. A koaxiális vezeték keresztmetszete az elektromos és mágneses tér $\mathbf{E}$, illetve $\mathbf{B}$ vonalaival a kábel alapvető, úgynevezett TEM00 módusára. A belső vezetéken változó feszültség van, míg a külső leggyakrabban le van földelve.



A korábbi, merev falú, levegővel kitöltött koaxiális kábeleket mára a rugalmas dielektrikummal kitöltött kábelek váltották fel, amelyekre tipikusan $\epsilon_r = 2-3$ és $\mu_r = 1,0$ értékű.

A koaxiális kábelek hosszegységre eső kapacitására és önindukciós együtthatójára e két paraméter definíciójából adódik:

$$\tilde{C} = \frac{2\pi \epsilon_0 \epsilon_r}{\ln(D/d)} \quad (1)$$

és

$$\tilde{L} = \frac{\mu_0 \mu_r \ln(D/d)}{2\pi}, \quad (2)$$

ahol D az árnyékoló vezeték belső átmérője és d a kábel belső vezetőjének külső átmérője, ϵ_0 és μ_0 az ismert fizika állandók, ϵ_r és μ_r az anyagra jellemző relatív dielektromos állandó és relatív permeabilitás.

A távíróegyenletek bemutatásához, a legegyszerűbb eset tárgyalásához feltesszük, hogy mindkét vezeték tökéletes vezető ($\tilde{R} = 0$) és tökéletesen szigetelt egymástól ($\tilde{G} = 0$), tehát a jelterjedés csak $\tilde{L}$ és $\tilde{C}$ -től függ. Ekkor mind az $U(x, t)$ feszültség, mind az $I(x, t)$ áram hely és időfüggő, és leírásukra – az elemi vezeték szakaszokra alkalmazott *Kirchhoff* csomóponti és huroktörvénye miatt – a következő két csatolt, lineáris, elsőrendű parciális differenciálegyenlet adódik (*Heaviside*, 1880):

$$\frac{\partial U(x, t)}{\partial x} = -\tilde{L} \frac{\partial I(x, t)}{\partial t}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial I(x, t)}{\partial x} = -\tilde{C} \frac{\partial U(x, t)}{\partial t}.$$

A (3) távíróegyenletek két ekvivalens, egydimenziós hullámegyenletté vonhatók össze mind az áramra, mind a feszültségre:

$$\frac{\partial^2 U(x, t)}{\partial t^2} = \frac{1}{\tilde{L} \tilde{C}} \frac{\partial^2 U(x, t)}{\partial x^2}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 I(x, t)}{\partial t^2} = \frac{1}{\tilde{L} \tilde{C}} \frac{\partial^2 I(x, t)}{\partial x^2}.$$

Az egydimenziós hullámegyenlet általános alakjával,

$$\frac{\partial^2 \Psi(x, t)}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 \Psi(x, t)}{\partial x^2} \quad (5)$$

(ahol Ψ a hullámfüggvény és v ennek terjedési sebessége) összehasonlítva látható, hogy a kábelben terjedő zavar sebessége,

$$v = \frac{1}{\sqrt{\tilde{L} \tilde{C}}}.$$

A legáltalánosabb megoldás a vezetékben terjedő feszültségre és áramra:

$$U(x, t) = U^+ f(\omega t - kx) + U^- f(\omega t + kx), \quad (6)$$

$$I(x, t) = I^+ f(\omega t - kx) + I^- f(\omega t + kx),$$

ahol ω a terjedő hullám körfrekvenciája, $k = \omega/v$ pedig a hullámszáma. U^+ és U^- a pozitív, illetve negatív x irányba terjedő jel amplitúdója, f egy tetszőleges függvény. Vegyük észre a (2) egyenlet alapján, hogy a kábelbeni terjedési sebesség kifejezhető a c vákuumbeli fénysebességgel:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0 \epsilon_r \mu_r}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}}.$$

A hullámimpedancia

Egy speciális eset az, amikor a kábelben csak egy irányba haladó harmonikus hullám van jelen, megoldása:

$$U(x, t) = U_0 e^{i(\omega t - kx)}, \quad (7)$$

$$I(x, t) = I_0 e^{i(\omega t - kx)}.$$

A (7) speciális megoldást a (3) távíróegyenletekbe visszairva kapjuk, hogy a feszültség és áram aránya a haladó hullám esetén:

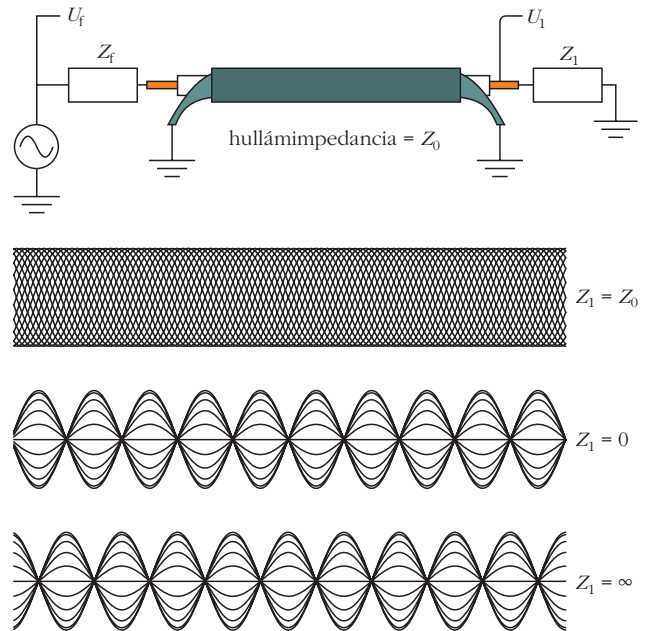
$$\frac{U(x, t)}{I(x, t)} = \sqrt{\frac{\tilde{L}}{\tilde{C}}} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} \frac{\ln(D/d)}{2\pi} = Z_0, \quad (8)$$

ahol a Z_0 (ellenállás dimenziójú) mennyiséget a kábel *hullámimpedanciájának* nevezzük. A távíróegyenletek és megoldásuk legfontosabb tanulsága, hogy minden kábelhez rendelhető egy Ω dimenziójú hullámimpedancia, még ha ideális esetben a kábelnek nincs is valós ellenállása. A hullámimpedancia fontos szerepet játszik a kábelben haladó jelek visszaverődésének vizsgálatakor, amit a továbbiakban ismertetünk.

A hullámimpedancia fizikai jelentésének bemutatásához célszerű a távíróegyenletek és a szabad térben terjedő elektromágneses sugárzás egyenletei közötti kapcsolatot bemutatni. Ismert, hogy az elektromágneses sugárzásra fennáll $E = cB$, ahol E és B az elektromostérerősség- és mágnesesindukció-vektorok nagyságát jelölik egy adott helyen. Ezt átírva a H mágneses térerősségre adódik:

$$\frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \approx 377 \, \Omega.$$

Első hallásra meglepő és kevésbé ismert, hogy az elektromágneses sugárzásához is rendelhető egy ellenállás dimenziójú mennyiség, amelyet a *vákuum hullámimpedanciájának* nevezünk. Ez a mennyiség felfogható úgy is, mint az ellenállás alapvető egysége



3. ábra. Sematikus áramkör szinuszos meghajtó generátorral, amelynek Z_f kimenő ellenállása van és koaxiális vezetékkel, amelynek végén Z_l lezáró impedancia van. A generátorból akkor jön ki a teljes teljesítmény, ha $Z_f = Z_0$. A lezárás három értékére vonatkozó vezetékbeli feszültség értékét is mutatjuk 20 pillanatfelvétellel, amikor $d = 5\lambda$. Vegyük észre, hogy $Z_l = Z_0$ esetén a feszültség burkolófüggvénye homogén a vezetékben, $Z_l = 0$ esetén mindkét végén csomópont van (ekkor forráson is 0 feszültséget mérünk), és $Z_l = \infty$ esetén mindkét végén duzzadóhely van.

a természetben, amelyhez képest minden ellenállásértéket – mértékegység-választástól függetlenül – kifejezhetnénk.

A (8) egyenletben megadott Z_0 hullámimpedancia értékében láthatjuk, hogy annak a vákuum hullámimpedanciájától való eltérése az alkalmazott dielektrikum jelenlétéből és a kábel geometriájából adódik. Cikkünk következő részében megmutatjuk, hogy a kábel hullámimpedanciájának kitüntetett szerepe van abban az értelemben, hogy amennyiben egy jel terjed a kábelben, csak akkor nem verődik vissza a kábel végéről, amennyiben ott is egy úgynevezett lezáró ellenállás van, amelyre $Z_l = Z_0$. Egyéb esetben kábelvégi visszaverődés történik, hasonlóan, ha a kábel mentén bárhol sérülés éri a vezetékét, és ezért hullámimpedanciája megváltozik, visszaverődést találunk. Ezt a hatást a hosszú kábelrendszerek sérüléseinek felderítésére lehet használni, illetve kémfilmekben így veszik észre, ha valaki a kábelre csatlakozva lehallgatja az adást.

Először két szélső esetet mutatunk be: amikor a kábel végén szakadás ($Z_l = \infty$) vagy rövidzár ($Z_l = 0$) van. Mindkét esetben a jel teljes visszaverődést szenved a kábel végéről, azonban a kábel végén lévő lezáró ellenállás értéke más peremfeltételt ír elő, amit a 3. ábra mutat be. Az odamenő és visszavert hullámok interferenciájának révén a kábel mentén duzzadóhelyek és csomópontok alakulnak ki, amint azt a 3. ábra mutatja. Vegyük észre, hogy az így kialakult állóhullámkép emlékeztet a hangtanból jól ismert bezárt, illetve nyitott végű síp esetére, amikor is a hanghullámok

valósítják meg az állóhullámok jelenségét. Alább olyan kísérleteket mutatunk be, amelyekkel az állóhullámok jelenléte kimutatható a diákok számára. A kábelben kialakuló állóhullámkép mindenképpen szokatlan a DC-áramköröknél szerzett ismeretek alapján, amikor is azt várnánk, hogy a feszültség a rövidre zárt drótpárban végig 0, míg a szakadós végű drótpárra végig a meghajtó generátor feszültségét veszi fel.

A bűvös 50 Ω és impedanciaillesztés a hétköznapiakban

A hullámimpedancia értéke egy adott koaxiális kábelre jól meghatározott, leggyakrabban 50 Ω -os (például laborműszereknél), 75 Ω -os (TV jelek kábeleinél) és 100 Ω -os (UTP-s ethernet) kábelekkal találkozunk. Emellett régebben egyéb hullámimpedancia-értékekkel is találkozhattunk, például 150 vagy 600 Ω . Utóbbi két értéknek történeti háttere van: a hagyományos, nem koaxiális távíróvonalaknak (két rézdrót egymástól 1 láb távolságra) körülbelül 600 Ω a hullámimpedanciája. Az első távolsági telefonok ezeket a vezetékeket használták, ezért abban az időben a 600 Ω volt a távközlési standard. Később a csavart rézdrótpár terjedt el (felfedezője A. G. Bell), aminek 150 Ω a hullámimpedanciája.

A koaxiális kábelek elterjedésével felmerült a standardizálás iránti igény. Azonban alapos kutakodásunk ellenére sem sikerült a standardizálás történeti hátterét egyértelműen feltárunk. Több forrásból merítve¹ a következő történetet találjuk.

A koaxiális kábelek felfedezését követően felmerült az a kérdés, hogy a látszólag tetszőleges, és a kábel méreteivel befolyásolható hullámimpedanciának, a nyilvánvaló 377 Ω értéken kívül van-e kitüntetett értéke. Kiderült, hogy van, de túl sok kitüntetett érték is van attól függően, hogy a kábelt mire szeretnénk használni, például teljesítményátvitelre, vagy kis amplitúdójú jelek mérése során történő jelátvitelre. A koaxiális kábelben átvihető maximális teljesítményre optimalizálva $Z_0 = 30 \Omega$ adódik. A nagyfeszültségű elektromos letörésben akkor kaphatjuk a legnagyobb értéket, ha $Z_0 = 60 \Omega$. Az átvitt jel feszültségében a legkisebb veszteség pedig akkor lép fel ha $Z_0 = 77 \Omega$. A korai (1920-as évek) rádiófrekvenciás alkalmazásokban a források teljesítménye alacsony volt, ezért a 77 Ω -os kábelek terjedtek el, hiszen a minél kisebb veszteség volt a cél. Mivel nem léteztek jó és rugalmas dielektrikumok, ezért a vezetékek két egymásba helyezett koaxiális csőből álltak, amelyek között levegő volt.

Több alternatív elképzelés is létezik arra vonatkozóan, hogy miért pont az 50 Ω -os koaxiális kábelek lettek a modern mérés technika standardjai.

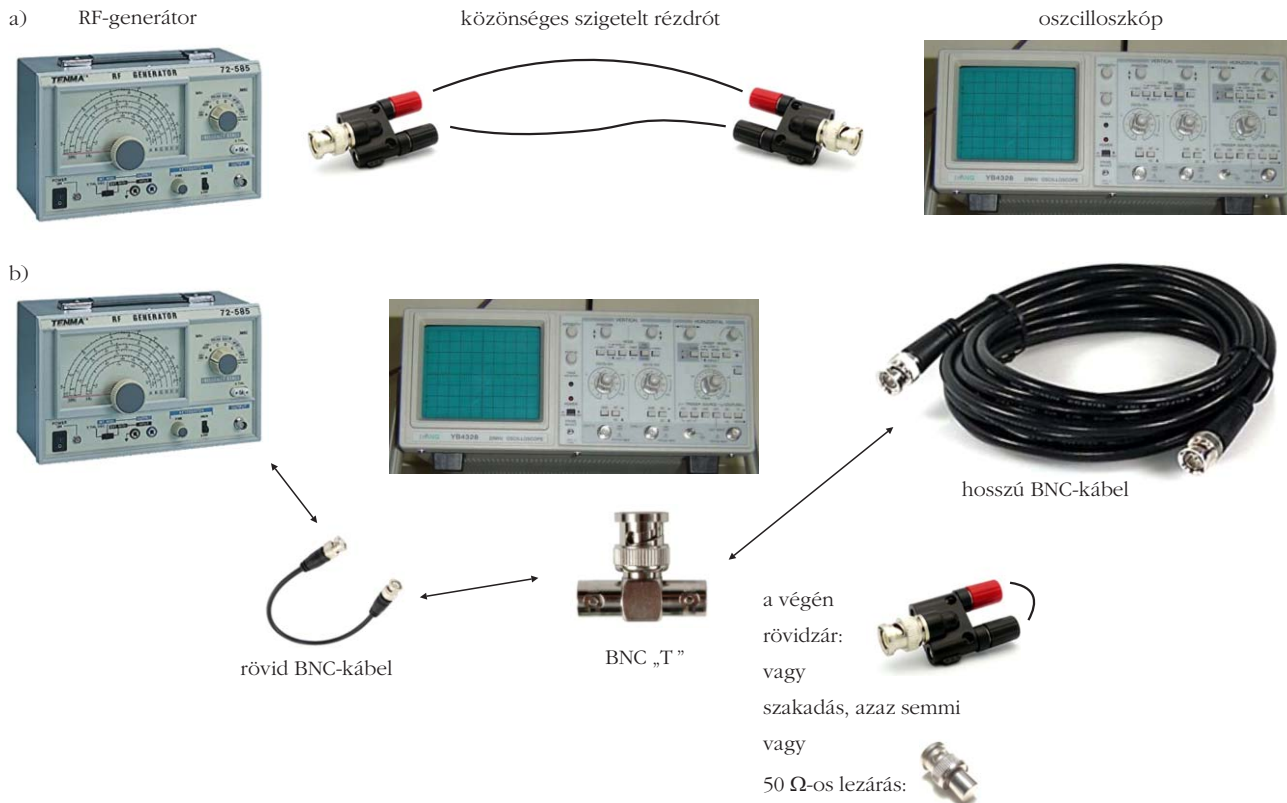
Közel 50 Ω hullámimpedanciájú vezetéket kapunk, ha egy 3/4 colos rézcsövet egy 2 colos rézcsőbe helyezünk (mindkettő elterjedt méret az USA-ban) és belül levegő található. Ez az egyszerű és olcsó megoldás az 1930-as évektől kezdve elterjedt a nagyteljesítményű rádiófrekvenciás adások kisugárzásánál. Egy másik elképzelés szerint, amikor egy levegővel töltött 77 Ω -os vezetéket polietilénnel töltünk fel ($\epsilon_r = 2,3$), akkor impedanciája 51 Ω lesz, ami szintén az 50 Ω felé mutat. A legvalószínűbb mégis az az elképzelés, hogy az 50 Ω a veszteség és teljesítményátvitel közötti kompromisszum következménye. A két fent említett érték (30 és 77 Ω) számtani közepe 53,5 Ω , mértani közepe 48 Ω , ebből adódik az 50 Ω . Ez azt jelenti, hogy ugyanazzal a kábellel tudunk nagyenergiájú jelet kiadni és egy kis jelet kis veszteséggel venni. Tehát az 50 Ω -os hullámimpedancia használata nagyban egyszerűsítette a nagyfrekvenciás híradástechnikát és az ilyen áramkörök kialakítását.

Végül egy érdekes javaslat az 50 Ω esetleges hátterére az, hogy egy koaxiális kábel, amire a belső vezető és külső árnyékolás átmérőjének aránya ránézésre „szép” (hasonlóan mint az aranymetszés az építészetben), körülbelül 50 Ω -os hullámimpedanciával rendelkezik.

Az 50 Ω elterjedtsége ellenére gyenge videójelek átvitelénél még találunk 75 Ω -os kábelt, ami a veszteségre optimális, illetve 93 Ω -os kábelt például számítógép és monitorok összekötésére. A 93 Ω -os hullámimpedanciájú kábelnél a hosszegységre eső kapacitás a legalacsonyabb, ezért nagyfrekvenciás levágási frekvenciája a legnagyobb. Emiatt a négyszögjelek is jobban, torzításmentesen kerülnek átvitelre. Még külön érdemes megvizsgálnunk, hogy miért 100 Ω -mal találkozunk az UTP kábeleknél: a probléma az, hogy egymás mellett, kis méretben, több párhuzamos kábelben, nagy távolságra szeretnénk információt továbbítani. Ebben az esetben a helyhiány miatt nem praktikus a több párhuzamosan futó koaxiális kábel használata, azonban nagy távolságok esetén az egyes vezetékdarabok áthallásával is kezdeni kell valamit. Ezért mintegy újra felfedezték az analóg telefonoknál korábban már használt sodort érpárt, hiszen erre a kiszóródó mágneses tér (és ezért az áthallás is) minimális. Erre utal az UTP elnevezése is: *Unshielded Twisted Pair*. Fentebb említettük, hogy a telefonok esetén 150 Ω volt a használt hullámimpedancia, a modern UTP vezetékekben ezt tudatosan kisebb értékre szorítják le, azért, hogy értéke az optimális 77 Ω -hoz közelebb legyen.

A fizika más területén is találkozunk impedanciaillesztéssel. Hanghullámok esetén például a fűvóshangszerek tölcseire és a vonóshangszerek „teste” gondoskodik arról, hogy a rezgő síp vagy húr hatékonyan gerjesszen hanghullámokat. Hasonlóan, a hangszórók, hangosbeszélők kialakítása is hangot keltő rezgő membrán és a levegő közötti energiaátadást szolgálja. Az orvosi célú ultrahangvizsgálatoknál alkalmazott zselé azt a célt szolgálja, hogy az ultrahangos készülék adóvevője és az emberi test között ne legyen a

¹ http://www.highfrequencyelectronics.com/Archives/Jun07/HFE0607_Editorial.pdf
<http://www.rfcafe.com/references/electrical/history-of-50-ohms.htm>
<http://www.microwaves101.com/encyclopedia/why50ohms.cfm>
http://en.wikipedia.org/wiki/Coaxial_cable



4. ábra. A szövegben leírt mérési feladatokhoz tartozó elrendezések. a) Annak bemutatása, hogy miért szükséges koaxiális kábelt használni, b) a kábelvégi reflexió bemutatására szolgáló elrendezés.

levegő jelenléte miatti impedanciaillesztetlenség. Az emberi középfül csontjai pedig a dobhártya és a folyadékkal töltött belső fül között látnak el impedanciaillesztő szerepet.

Optikában a közönséges üveg vagy szemüvegek felületéről fellépő visszaverődés közismert jelenség. Ezt úgynevezett antireflexiós rétegekkel meg lehet szüntetni, ami szintén egy példa az impedanciaillesztésre. A visszaverődés oka, hogy a levegő-üveg határon a törésmutató ugrásszerűen változik, a visszavert hullám r amplitúdóját a jól ismert Fresnel-formula írja le, ami merőleges beesésre a következő alakot ölti:

$$r = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}, \quad (9)$$

ahol n_1 és n_2 a két határos közeg törésmutatója. Nem véletlen, hogy ez nagyfokú hasonlóságot mutat cikünk második részében bemutatandó kábelvégijel-reflexiók kifejezéssel.

Mechanikában az impedanciaillesztés problémájával analóg az a jelenség, hogy testek rugalmas ütközésekor az energiaátadás egyenlő tömegű testek között a maximális, amit jól szemléltet a *Newton-bölcső*. A mechanikai hullámok visszaverődésének szerepe van még robbanóanyagok alkalmazásánál és a különösen nagy rezgésnek kitett eszközök csillapítása esetében is.

Még egyenáramú hálózatok esetén is találkozhatunk impedanciaillesztéssel: jól ismert tény, hogy egy

adott belső ellenállású telepből egy terhelő ellenálláson akkor vehetjük ki a maximális teljesítményt, ha a terhelés ellenállása megegyezik a telep belső ellenállásával.

Kísérletek a kábelbeni hullámjelenségek bemutatására

A kísérletekhez egy 10 MHz-es jelgenerátorra, 10 MHz-es oszcilloszkópra és 10-20 méter BNC-csatlakozós, 50 Ω -os kábelre lesz szükségünk (legelterjedtebb az RG58 típus). Az ilyen frekvenciára képes jelgenerátorok kimeneti impedanciája 50 Ω , amit a kimeneti felirat jelez általában. A legtöbb oszcilloszkóp bemeneti impedanciája 1-10 M Ω , ami a mérésre megfelelő, tehát nem szükséges 50 Ω -os bemenetű nagyfrekvenciás oszcilloszkóp.

Első lépésként mutassuk be, hogy a koaxiális kábelek miért szükségesek a nagyfrekvenciás jelek továbbításához! Az összeállítást a 4.a ábra mutatja. Ehhez 10 MHz-et állítunk be a jelgenerátoron, és az ábrán látható módon kössük össze az oszcilloszkóppal, azaz két közönséges szigetelt rézdróttal, amelyeket banán BNC-csatlakozó segítségével csatlakoztatunk. Azt fogjuk tapasztalni, hogy az oszcilloszkóp által mért jel erősen függ attól, hogy a rézdrótok egymáshoz képest miként helyezkednek el. A kezünket közel mozgatva is hatást fogunk találni, és a rézdrótok közepét vízbe (még inkább sós vízbe) merítve is komoly változást találunk az átvitt jelben. Ügyeljünk

arra, hogy a víz ne teremtsen galvanikus kapcsolatot a két rézdrót között, mert a kísérlet lényege, hogy a víz, mint dielektrikum is befolyásolja a drótok körüli elektromágneses tér eloszlását és ezen keresztül az átvitt jelet. Ez a kísérletsorozat jól szemlélteti, hogy miért is van szükség koaxiális kábelekre, amelyeket alkalmazva az átvitt jel nagysága nem függ a külső környezettől.

A következőkben a kábel végéről történő visszaverődést szemléltetjük, egyben megmérjük a kábelbeni jelterjedés sebességét, azaz a kábelbeni fénysebességet. A mérési elrendezést a 4.b ábra mutatja. Az oszcilloszkópon a jelgenerátor kimenő frekvenciájának függvényében vizsgáljuk a mért feszültséget, miközben egy hosszabb BNC-kábel is rá van csatlakoztatva, aminek végét különbözőképpen zárjuk le. A jelgenerátor kimenő feszültségét jelölje V_{gen} , a kábel hosszát l . Azt fogjuk találni, hogy amikor a kábel végén szakadás vagy rövidzár van, az oszcilloszkópon mért jel frekvenciafüggő lesz. Amennyiben $50\ \Omega$ -mal zárjuk le, úgy frekvenciafüggetlen jelet találunk. A másik két esetben a 3. ábrán bemutatottakat figyelhetjük meg. A kábelbeni hullámhossz $\lambda_k = c_k/f$, ahol c_k a kábelbeni fénysebesség (a szokásos kábelekre $c_k \approx 0,65\ c_0$).

Amennyiben a kábel végén szakadás van, az oszcilloszkópon (közel) 0, ha a kábel hossza a $\lambda_k/4$ páratlan, illetve V_{gen} feszültséget találunk, ha a negyedhul-

lámhossz páros (a 0-t is beleértve) számú többszöröse. Ha a kábel végén rövidzár van, akkor pont fordítva, azaz az oszcilloszkópon V_{gen} , illetve (közel) 0 feszültséget találunk, ha a kábel hossza $\lambda_k/4$ páratlan, illetve páros számú többszöröse.

Ez a feladat több mindenre felhasználható: például ismert hosszúságú kábel esetén segítségével a kábelbeni fénysebesség mérhető, majd ezután ismeretlen kábel hosszának meghatározására is használható. A feladat során – amennyiben rendelkezésre áll – célszerű a jelgenerátor triggerkimenetéről triggerelni az oszcilloszkópot azért, hogy stabil jelalakokat figyelhessünk meg, még akkor is, amikor az oszcilloszkópon kis jeleket mérünk. Ha 10 MHz-es jelgenerátorunk van, az első minimum méréséhez legalább 5 m-es kábel szükséges.

A következő részben bemutatjuk a kábel végéről történő visszaverődések egzakt tárgyalását, valamint példát mutatunk a gyakorlatban is alkalmazott, nem rezisztív, kábelvégi lezárásra, amit többek között mágnesesrezonancia-spektroszkópiában használunk.

Ajánlott és felhasznált irodalom

Budó Ágoston: *Kísérleti fizika II. – Elektromosságtan és mágnességtan*. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest (1997)

Simonyi Károly: *Elméleti villamosságtan*. Tankönyvkiadó, Budapest (1967)

David M. Pozar: *Microwave Engineering*. (4th ed.) Wiley (2011)

A CSAPBÓL IS RÉSZECSCHEFIZIKA FOLYIK?

Oláh Éva Mária – Bálint Márton Általános és Középiskola, Törökbálint
Fülöp Csilla – Madách Imre Gimnázium, Budapest

Középiskolás fizikatanárként azt szeretnénk körüljárni, hogy a mai 14–18 éves diákoknak milyen lehetőségei vannak részecskefizikát tanulni tanórai, vagy bármilyen más keretek között. Először megvizsgáljuk, hogy napjainkban mi a helyzet a keret-, illetve a helyi tantervek terén.

Köszönjük Horváth Dezsőnek, Lévai Péternek és Varga Dezsőnek, valamint iskoláink igazgatóinak, hogy segítettek és támogatták munkánkat, lehetőséget nyújtottak a programok szervezésében, lebonyolításában. A tanulmány elkészítését a Magyar Tudományos Akadémia Tantárgy-pedagógiai Kutatási Programja támogatta.



Oláh Éva Mária a Bálint Márton Általános és Középiskola fizikatanára és a MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont dolgozója. Az ELTE Fizika Doktori Iskolájában szerzett PhD fokozatot, kutatási területe a részecskefizika tanítása középiskolában. A CERN-i fizikatanár-továbbképzés szervezője és előadója, tagja az ELFT elnökségének és a Szilárd Leó fizikaverseny versenybizottságának. Elismerései: 2015-ben MTA Pedagógus Kutatói Pályadíj; 2016-ban EMMI Bonus Bona, A nemzet tehetségeiért díj.

Részecskefizika a tantervekben és az érdeklődés középpontjában

Az Oktatási Hivatal kétféle tantervet ajánl. A felmérések szerint az iskolák többsége a „B” kerettantervet választja. Ebben a tantervben konkrét részecskefizikai fogalmak egyáltalán nem szerepelnek, csak általánosságban írja le azt, hogy ismertessük a diákokkal az atommag szerkezetét. Az „A” kerettantervben ugyan szerepel a kvark kifejezés, de csak így, önmagában.



Fülöp Csilla az ELTE TTK-n szerzett matematika-fizika-angol szaktanári szakos diplomát. A közoktatás széles skáláján szerzett tanári tapasztalatot: egy angliai magániskolában, főiskolai vezetőtanárként, reál hatosztályos és humán elitgimnáziumban, valamint szakközépiskolában. Érdeklődési területe az informális fizikaoktatás és a „hands-on, minds-on” didaktika. Doktori értekezését 2018-ban védte meg az ELTE-n.

A Maxim tankönyvkiadó tanmenetében találtuk a legtöbb részecskefizikához köthető fogalmat. Itt az alapvető kölcsönhatásokon túl szerepel a kiegészítő tananyagban a standard modell, a mikrorészecskékről és a jelenleg működő gyorsítókról, azok gyakorlati felhasználásáról is lehet beszélgetni a tanulókkal. Néhány helyi tantervben ugyancsak szerepel a kvarkok, illetve az elemi részecskék világa, de azt gondoljuk, hogy ez inkább azon fizikatanároknál fordul elő, akik maguk is jártak már a CERN-ben, az Európai Nukleáris Kutatási Szervezet részecskefizikai laboratóriumában.

Összességében azt állapíthatjuk meg, hogy hiába ismertek csaknem 100 éve a részecskefizika kutatási eredményei, a tananyagban kötelező szinten egyáltalán nem, kiegészítő szinten is csak nagyon érintőlegesen szerepelnek.

Viszont mindig azt tapasztaljuk, hogy a modern fizika fejezetei iránt óriási diákok érdeklődése, ezen belül a mikrorészecskék fizikája – az LHC indítása óta – is nagyon népszerű. A média egyre többet foglalkozik vele, internetes hírportálokon, ismeretterjesztő tévéműsorokban gyakran találkozhatunk az LHC, hadronütköztető, Higgs-bozon kifejezésekkel. Mivel a diákjaink is kedvelik ezen műsorokat, illetve olvassák a szenzációhajász címmel ellátott cikkeket, természetes, hogy velük kapcsolatban kérdésekkel fordulnak hozzánk, így a kielégítő válaszok megadásához nekünk is naprakésznek kell lennünk.

A CERN minden év augusztusában egyhetes továbbképzést biztosít a fizikatanárok számára, de ebben az írásban részletesebben a diákok lehetőségeivel fogunk foglalkozni. A teljesség igénye nélkül áttekintjük a lehetőségeket: hazai, középiskolai, illetve a Wigner Fizikai Kutatóközpont által szervezett programokat, végül a CERN 2017-től induló új továbbképzését mutatjuk be.

Részecskefizikai diákműhelyek

2005 óta a CERN az IPPOG (International Particle Physics Outreach Groups) keretében kora tavasszal Nemzetközi Diákműhelyt (Masterclass) szervez. Ennek programja hazánkban az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont (korábban KFKI) szervezésében az ország középiskoláiba járó diákok számára a *Lehetsz Te is kutató egy napra* program. Iskolánként két tanulót tudnak fogadni. Eleinte egy-egy helyszínen 20 fő vehetett részt, viszont a nagy érdeklődésre való tekintettel az utóbbi években már duplájára növekedett a létszám.

A nap folyamán a diákok előadásokat hallgatnak az alapvető kölcsönhatásokról, gyorsítókról, detektorokról. A közös ebédet követően pedig az LHC egyik kísérlete, a CMS adatait számítógépes program segítségével elemzik, sőt maguk is találhatnak olyan eseményeket, amelyek a Higgs-bozon jelenlétére utalnak. A program hivatalos elnevezése Nemzetközi Részecskefizikai Diákműhely, ugyanis adott napon

egyszerre több országban is megrendezésre kerül, és az adatelemzést követően a tanulók a kapott eredményeket angol nyelvű videokonferencia segítségével meg is osztják egymással [1].

Ez a program ugyanolyan nagy sikerrel folyik évek óta Debrecenben is a Debreceni Egyetem, és Székesfehérváron az Óbudai Egyetem Alba Regia Kara szervezésében.

Természettudományos önképzőkör

Több iskolában, többek között a Bálint Márton Általános Iskola és Középiskolában is működik olyan szakkör, ahol az érdeklődő tanulók a középiskolai tananyagban túlmutató tudományos előadásokat hallgathatnak. A biofizikától a kozmológiáig több neves tudós fogadja el a felkérést, tart előadást. De „minden szentnek maga felé hajlik a keze”, a legtöbb előadás a fizika, azon belül is a részecskefizika legújabb eredményeivel foglalkozik.

Az önképzőkörök feladata mindig az volt, hogy felkeltse a gyerekek érdeklődését, majd ezt követően közös projektek kidolgozására is sor kerülhet. Ezek általában havi vagy kéthavi rendszerességgel kerülnek lebonyolításra és alkalmanként több száz tanuló is hallgatja az előadásokat. Óriási öröm, hogy ezt követően a diákok kérdésekkel fordulnak az előadóhoz, vagy maguk is egyéni kutatásokba kezdenek a témakörben [2].

Higgs-projekt

Az alkalmazott fizika, azaz a mérnöki tudományok iránt érdeklődő szakközépiskolás tanulók körében talán még intenzívebb az érdeklődés a kutatások eredményeinek megismerésére. Informatikai és elektrotechnikai, valamint gépésztanulók nem csak fizika, de szakmai órákon is hallottak az LHC-ről. A Higgs-bozon felfedezésének híre hívta életre a Higgs-projektet a Trefort Ágoston Kéttannyelvű Szakközépiskolában. A személyes látogatás anyagi háttérét nem sikerült megteremteni, ezért teljesen más megoldást kellett találnunk. Az érdeklődők egy előadás során átláthatták a témát, *Mi is a részecskefizika?* címmel felvillantak a történelmi háttér, az alkalmazott berendezések, a tudományos elmélet alapjai. A *Particle Zoo* [5] egy túpárnaszerű plüssfigurákból összeállított készlet, amely a részecskék alapvető tulajdonságait tanítja meg. A projektben résztvevő tanárok és diákok egy-egy ilyen plüss elkészítésével, és az adott részecske jellemzésével készültek a második előadásra, amelyet *Horváth Dezső* tartott a Higgs-bozon felfedezéséről *Peter Higgs* születésnapján (ezen különleges alkalmából az előadás végén elfogyasztottunk egy tortát). A tanulók megismerhették a részecskék típusait (bozon, lepton, kvark), és az anyag-antianyag párokat. Az egyéni munkájukhoz elsősorban angol nyelvű szakirodalmat használtak az internetről.



1. kép. Oláh Éva műhelyfoglalkozása és tartós, fából készült részecskekocka-készlete.

Játékos részecskefizika kockákkal

Nincs könnyű feladatunk, ha diákjaink – az érdeklődés felkeltésén túl – többet szeretnének tudni a mikrovilág rejtelméről, hiszen a tananyagban csak a korábban említett mennyiségben szerepel a részecskefizika-témakör, viszont az itt felsorolt programok kapcsán lépten-nyomon olyan kifejezésekkel találkozunk, mint a „bozon”, „hadron”, „lepton” szavak. Memorizálásukhoz fizikatanárként is hosszú idő kellett. Fontos, hogy a szubatomi részecskék mérettartományában (tipikusan 10^{-18} m alatt) szemléletes képet tudjunk alkotni. Gyakorlatból tudjuk, hogy a bevésődés legmagasabb szintje az, amikor a tanulás gyakorlati feladattal is párosul (hands-on, minds-on didaktika). Ehhez egy oktatási segédeszközt – amely a részecskefizika alapvető fogalmainak és törvényeinek játékos tanulását szolgálja – dolgoztunk ki. Az eszköz papírkockákból áll, mert a hat lapján különféle fizikai fogalmakat lehet feltüntetni, mint a kvarkok ízei, a leptonfajták vagy a megmaradó mennyiségek. A diákok – miközben elkészítik saját kockakészletüket – észrevétlenül tanulják a sokszor érthetetlen és nehezen megjegyezhető kifejezéseket. Az elkészült készlet segítségével pedig a hadronok felépítése, a légkör felső rétegeiben lejátszódó bomlási folyamatok, vagy

akár a középszinten is elvárt béta-bomlás mélyebb szerkezete is érhetőbbé válik.

Az ország különböző középiskolái gyakran szerveznek előadásokat, amelyek között az „részecskefizika-építés” is többször szerepelt. Az előadásokat időnként műhelyfoglalkozással is egybekötik, ahol elkészítik a kartonpapírból kivágott részecskekockák. Ezen saját készletek felhasználásával később – szakörök vagy különórák során – a gyerekekkel közösen lehet újabb projekteket kitalálni. A készlet továbbfejleszthető, vele például a kozmikus müonok bomlása is bemutatható, amihez persze újabb kockákat kell gyártani. A különböző megmaradási törvényeket is be lehet mutatni és gyakoroltatni (1. kép). A tartósabb változat akár fakockákból – festéssel, feliratozással, lakkozással – is készülhet, hosszú ideig használható oktatási segédanyagot nyújtva a fizikaszertárak számára [3].

Tanulmányi kirándulások a CERN-be

A világ legnagyobb részecskefizikai kutatóközpontja, a CERN nagy hangsúlyt fektet az oktatásra, minden évben egyhetes, a fizikatanárok anyanyelvén tartott továbbképzéseket szervez (például 2016-ban 39 alkalommal), ezen kívül a nemzetközi tanártovábbképzések során többhetes tanulásra ad lehetőséget, illetve rendszeresen fogad középiskolás diákcsoportokat is. Ennek megszervezése nem is olyan nehéz feladat, de időben kell jelentkezni, mert óriási az érdeklődés. A CERN látogatói központján keresztül kell megadni az időpontot, amikor a csoport érkezni szeretne, és az intézet egy teljes napon keresztül enged bepillantást nyerni a leghíresebb és legnagyobb volumenű kísérletekbe. Ezek közé tartozik a CMS-detektor látogatása, és ha éppen nem működik a gyorsító, akkor közvetlen közelébe is el lehet jutni, 10-15 méter távolságból lehet megtekinteni a mérnöki tudomány egyik csodáját. A diákok az újonnan megépített S’Cool Lab elnevezésű laboratóriumban saját detektorukat, a még ma is nagyon érdekfeszítő eszköznek számító ködkamrárt is megépíthetik (2. kép).

Két ingyenesen látogatható kiállítást is működtet a CERN, a *Microcosmosban* interaktív módon érthetik meg a gyorsítóknak és detektoroknak lejátszódó folyamatokat, a CERN jelképévé váló *Globe*-ban pedig a *Részecskék univerzuma* című kiállítás látható. Mindkét szerző iskolájukba járó diákjai számára több alkalommal szervezett látogatást a CERN-be. Egy-egy alkalommal 20-30 diák ismerkedhetett – ezen nem hagyományos módon – a részecskefizika rejtelmével.

A Science Center pedagógia kutatási eredményei és saját tapasztalataink alapján javasoljuk ezen tanulmányi kirándulásokat egy projekt keretébe ágyazni. A látogatás is érdekesebb lesz, és több, maradandóbb tudás alakul ki tanítványainkban, ha néhány lépésben előkészítjük az utat, majd a projekt lezárásaként, utókövetésként még egy programpontra fejezzük be azt. Például a Madách Imre Gimnáziumban a tanulók há-

rom, egymásra épülő szervezett előadás és műhely keretében készülhetnek fel a látogatásra, valamint egy otthon kitöltendő munkalapot is kaptak, amely a National Geographic ismeretterjesztő filmjéhez készült. A a genfi kirándulást követően pedig virtuális látogatáson vettek részt, ahol a CERN-ben dolgozó magyar fizikusok, mint kedves ismerősök zárták a CERN-MIG 2017 projektet.

A svájci tanulmányi kirándulás – természetesen – nem csupán a fizikát érinti, hanem szerep jut a kultúrának is. A diákok „kincsvadászat” játékkal, kis csoportokban versenyezve fedezhetik fel Genf nevezetességeit, történelmi helyeit.



2. kép. Középiskolások a CERN-ben: balra fönt a szuvenírbolt, alatta ködkamraépítés a S’Cool Lab-ban, jobbra a szétszerelt CMS-detektor.

CERN Open Days a Wigner FK-ban

A Wigner FK-ban minden év szeptemberében nyílt hétvégét rendeznek, amely minden érdeklődő számára szabadon látogatható, de – természetesen – a tanárok és diákok jelenléte a jellemző. Ezen a két napon a résztvevők bepillanthatnak a részecskefizika fellegvárára, a CERN legújabb eredményeibe, az ott dolgozó magyar fizikusok aktuális kutatásaiba.

A csillebérci telephelyen működő Adatközpont is sok érdekességet tartogat az érdeklődők számára. Az egyes laboratóriumokban fejlesztett eszközök különféle tematikájú sátrakban tekinthetők meg, a „Sokszínű Fizikabusz”-ban pedig látványos, interaktív kiállítás várja az érdeklődőket. Újdonságnak, hogy idén azok a középiskolás diákok, akik a CERN által szervezett első kéthetes továbbképzésen vettek részt, bemutatathatják az ott végzett, mini kutatótevékenységüket [4].

Diákok kutatómunkája a Wigner FK-ban

Az MTA Wigner FK több intézete régóta fogad középiskolás diákokat különböző látogatásokra, vagy akár egyhetes nyári táborra is, de folyamatos tevékenységre, diákkutatásra csak egyetemista hallgatónak volt lehetősége. A Részecske és Magfizikai Intézet Nagyenergiás Fizikai osztályán viszont több éve már heti rendszerességgel dolgozhatnak középiskolás diákok, akik bepillantást nyerhetnek a kutatók mindennapi tevékenységébe. Megtehetik mindezt azért, hogy az osztályon működő Detektorfizikai Kutatócsoport felvállalta, hogy a 14–18 éves korosztály számára is lehetőséget biztosít. Ennek keretében megismerhetik, hogy mivel foglalkozik egy fizikus, és így pályaválasztásuknál már tudatosan választhatják a fizika szakirányt.

A kutatócsoport gáztöltésű detektorok fejlesztésével foglalkozik, és – a középiskolás diákok segítségével – évek óta azt is vizsgálja, hogy miként lehet a legmodernebb érzékelő berendezéseket a középiskolai oktatásba is bevenni. Jelenleg a fizikaórákon vagy a szakkörökön különféle sugárzások bemutatására, észlelésére a még mindig népszerű ködkamra, vagy a radioaktív sugárzást bemutató Geiger-Müller-számlálóső van használatban. Előbbi hátránya, hogy működtetéséhez nehezen beszerezhető szárazjég szükséges, utóbbit pedig azért nem szeretjük használni, mert a radioaktív sugárzás káros lehet az egészségre. Ezzel a Nagyenergiás Fizikaosztály laboratóriumában készül detektorok, a sokszálas, proporcionális kamrák az egészségre ártalmatlan, kozmikus müonok vizsgálatára lettek kifejlesztve. A diákok által összeállított mérete tipikusan 20×20 cm (3. kép) – a professzionális változatok lényegesen nagyobb méretben készülnek –, az utóbbi időben, a költséghatékonyság érdekében, még kisebbekkel is próbálkoznak. Az ilyen jelentős detektorépítési munkálatok előtt a diákoknak meg kell ismerkedniük a különböző előkészítő részfeladatokkal is, eközben megtanulják használni a műhely gépeit, eszközeit. Azok, akik jobban értenek az elektronikához, például megtervezhetik és össze is állíthatják azon árammérő műszert, amellyel meg lehet mérni a detektor nagyon kicsiny áramát, és egyben nagyfeszültség mérésére is alkalmasak.

A professzionális detektorokhoz gyakran használnak különleges anyagokat, speciális fóliákat is. Ezek tesztelését is – az úgynevezett szórás kísérletekkel – sokszor a diákok végzik. Ez a lehetőség a középiskolás diákok számára nagy lépést jelent az egyetemi továbbtanulásuk orientációjában, hiszen a Kutatás Alapú Oktatás (Research Based Learning) részesei lehetnek.



3. kép. Ismerkedés az eszközök használatával, és egy működő műonkamra.

CERN HSSIP

A fenti kezdeményezések, lehetőségek Magyarországon adódnak, viszont 2017 májusában fantasztikus kezdeményezéssel állt elő a CERN oktatásért felelős bizottsága. Ne csak fizikatanárok vagy legalább másodévet végzett egyetemisták juthassanak el tanulás céljából Európa legnagyobb részecskefizikai kutatóközpontjába, hanem – még azelőtt, hogy döntést hoznának továbbtanulásukról – középiskolás diákok is. A cél, hogy egy gyakorlati, bentlakásos továbbképzés során tapasztalhassák meg, miért is érdemes a fizikát vagy a műszaki tudományokat választani. 2017-ben összesen öt ország nyerte el a részvétel jogát, és ezek között is Magyarország lehetett az első, és 22 diákkal (4. kép) képviseltethette magát ezen a rendkívüli programon.

4. kép. A világelső, magyar középiskolás csoport a Globe és a „Mágnesgyár” látogatásakor.



A tanulók kettesével csatlakoztak egy-egy kint dolgozó fizikushoz, mérnökhöz vagy informatikushoz, akikkel két héten keresztül mindenben együtt tevékenykedtek. Programokat írtak a szupravezető mágnesek teszteléséhez, részt vettek a CMS-kísérlet éjszakai műszakjában, CNC-gépekkel esztergálhattak, vagy kozmikus műonokat észlelő detektorokat szimulálhattak. Ezen a kísérleti jellegű továbbképzésen Magyarország 19, az ország különböző középiskolájában tanuló diák vehetett részt, többnyire iskolánként egy fővel, kivételt csak a már régebb óta, a Wigner FK-ban kutatómunkát végző tanulók jelentettek. A CERN-nek jelenleg 22 tagországa van, a tervek szerint ehhez a programhoz minden évben csak öt ország csatlakozhat, így hazánkra előreláthatóan csak öt év múlva kerül újra sor [5, 6].

Összegzés

Átlagemberként is azt tapasztaljuk, hogy a részecskefizika korunk egyik legdinamikusabban fejlődő tudományága, és sajnos a középiskolai tananyagban még csak érintőlegesen szerepel. Ezért fontos, hogy a diákoknak a tanórán kívül is adjunk lehetőséget ezzel a nagyon sokrétű, érdekes témakörrel foglalkozni, a mikrovilág mélyebb rejtelmeit megismerni. A tanárkollégák – kezdeményezéseik kidolgozásához – számíthatnak a kutatók támogatására. E munkában – a CERN-nel karöltve – élen jár az MTA Wigner Fizikai Kutatóintézet. Mindkét intézet hatalmas anyagi és emberi ráfordítással dolgozik azért, hogy a középiskolás diákok úgy érezhessék: a „csapból is részecskefizika folyik”.

Irodalom

1. http://www.rmki.kfki.hu/~jancso/Reszecskefizikai_Diakmuhely_Wigner_FK/
2. <http://www.balintsuli.hu>
3. Oláh Éva Mária: Építsünk Részecskefizikát! *Nukleon X.* (2017) 203. ISSN: 1789-9613, Magyar Nukleáris Társaság 2017.
4. <http://cernopendays.wigner.mta.hu>
5. <http://wigner.mta.hu/hu/2-het-22-magyar-kozepiskolas-genfhssip-2017>
6. http://mta.hu/tudomany_hirei/huszonket-magyar-diakot-latott-vendegul-ket-heten-at-a-cern-107900

Daniel Whiteson, Jorge Cham: HALVÁNYLILA GŐZÜNK SINCS – Tutikalauz az ismeretlen Univerzumhoz

Európa Könyvkiadó, Budapest, 2017, 375 oldal

„Szeretnéd tudni, hogyan keletkezett az Univerzum, miből áll, és mi lesz a végső sorsa? Szeretnéd megérteni, hogy mi a tér és mi az idő? Szeretnéd tudni, hogy egyedül vagyunk-e a Világegyetemben? Pech! Ez a könyv ugyanis egyik kérdésre sem ad választ.”

Ezzel a formabontó felütéssel kezdődik a *Halványlila gőzünk sincs* című könyv, és a folytatás is hasonló szellemben tárgyalja az emberiséget régóta foglalkoztató, nagy kérdéseket. Ez persze csak azok számára okoz meglepetést, akik nem ismerik az amerikai szerzőpáros korábbi munkásságát: Daniel O. Whiteson a University of California, Irvine részecskefizikus-professzora és Jorge Cham, a mérnöki tudományokból PhD-fokozattal rendelkező képregényszerző (a hazai kutatói közösség fiatalabb tagjai körében itthon is méltán nagy népszerűségnek örvendő *PhD Comics*¹ weboldal készítője) évek óta küldetésüknek tekintik, hogy a tudomány legújabb eredményeit az új generáció számára a legjobban fogyasztható formában tálalják (több animációjuk és előadásuk többek között a legismertebb videomegosztó portálon is elérhető).

Whiteson és Cham ezúttal arra vállalkozott, hogy egy könyv keretében mutassák meg, mit (nem) tudunk jelenleg a bennünket körülvevő világról – elsősorban a tinédzser, illetve fiatal felnőtt olvasóközönséget megcélózva. A Világegyetem nagy rejtélyeit boncolgató, kifejezetten ismeretterjesztő célú anyag készítése (legyen szó könyvről, filmről, vagy akár képregényről) mindig nagy kihívás, hiszen a bonyolult témákról jellemzően a matematikai és fizikai háttér szelíd „elrejtése” mellett kell beszélni – mindezt lehetőség szerint élvezhető, ugyanakkor hiteles és koherens formában. Ez a szerzői oldalról fellépő nehézségek mellett ráadásul egy olyan nem kívánt mellékhatással is járhat (amivel középiskolai tanár kollégáink közül valószínűleg sokan szembesültek már), hogy egyes diákok nagy adag „virtuális tu-

dást” építenek fel magukban az egyébként komplex háttérű fogalmak és jelenségek (fekete lyukak, téridő, dimenziók, ...) szemléltető bemutatásából, míg az ezek háttérének megértéséhez (is) szükséges fizikai alapismeretek elsajátítását már jóval kevésbé tartják fontosnak – sőt, sokszor unalmasnak. Szintén fontos tényezőnek tűnhet a „piac telítettsége”, hiszen korunk legkiválóbb, ismeretterjesztésben is élen járó elméi után (hogy ezen a helyen is megemlékezzünk a köz-

zelmúltban elhunyt Stephen Hawkingről, ugyanakkor több más, hasonló kvalitású kortársunkra is gondolva) nehéznek tűnik „újat” mondani a világról – ráadásul a látványos, de sajnos nem feltétlenül egységesen magas színvonalú tematikus TV-műsorok és internetes adások „özönében” könnyen elsikkadhat egy $n+1$ -edik, az érintett témákkal foglalkozó, nyomtatott mű.

Mindezek mellett – ezen sorok írója szerint – a kérdéses könyvet mindenképpen megérte kiadni, és mindannyian jó szívvel ajánlhatjuk a tudomány világa iránt érdeklődő ismerőseinknek (azoknak legalábbis mindenképpen, akiktől az abszurd humor sem áll nagyon távol). Whiteson és Cham csaknem 400 oldalon keresztül kalandozik az anyaggal, a térrel és az idővel

kapcsolatos (nem)ismereteink tengerén, s mindezt magabiztosan kormányozva teszik – közben rekeszizmainkat, illetve szó- és képi viccek feldolgozását szolgáló agykapacitásunkat is erősen próbára téve :). A 16 fejezet során – a 13. fejezet „természetesen” hiányzik :) – az elemi részecskék és kölcsönhatások világából indulva a Világegyetem kialakulásának, fejlődésének és felépítésének taglalásán keresztül eljutunk annak elképzelt végkifejleté(i)g, közben olyan kérdéseket is felvetve – és (nem) megválaszolva –, mint a fény véges határsebessége, a nagy energiájú kozmikus sugárzás eredete,² vagy éppen a földönkívüli civilizációk megtalálásának esélye.



A könyv eredeti címe *We have no idea*. Fordította: Kovács József, szakértő: Szabados László.

¹ <http://phdcomics.com>

² Említésre kerül például a CRAYFIS nevű kezdeményezés is, amelynek révén egy okostelefonra letölthető alkalmazás segítségével kapcsolódhatunk be a kozmikus részecskék vadászatába: <http://crayfis.io>

A könyv egyik kiemelkedő pozitívuma, hogy az elvont fogalmak többségét igyekszik a mindennapi tapasztalatokhoz köthetően bevezetni, s mindezt kellően didaktikusan teszi. Ezen a téren néha talán kicsit túl tömény az abszurd humor (ami néhány kockányi képregényként jól működik, oldalakon keresztül egy idő után sokak számára fárasztóvá válhat), illetve néhány poén valószínűleg kevésbé jön át a mostani tizenévesek számára (mint például az *X-akták* vagy a *Star Trek* tévésorozatokra való többszöri utalás) – ugyanakkor várhatóan igen sikeressé teszi majd a könyvet az egyetemisták, fiatal kutatók és pályakezdő tanárok körében. Külön kiemelendő a fordítást végző *Kovács József* és a szakértőként felkért, egyben „szójátékos kedvében a fordító tetteitársaként” is közremű-

ködő *Szabados László* kollégáink munkája, akik számos „komolyabb” hangvételi mű magyar nyelvre való, magas szintű átültetése után az abszurd humorral fűszerezett ismeretterjesztés területén is maradandót alkottak, több helyen érezhető módon saját nyelvi leleményeikkel is gazdagítva a kötetet.

Összefoglalva: a *Halványlila gőzünk sincs* stílusa, felépítése és a nem-tudás irányából közelítő nézőpontja okán is újszerű kísérlet egy nehéz műfajban, amelynek jellemző buktatóinak többségén sikeresen lendül át – s még ha a könyv minden része nem is feltétlenül érinti meg a fő célközönségnek számító tizenéves korosztályt, a tudomány világa iránti érdeklődés erősítésére mindenképpen alkalmas és ajánlott.

Szalai Tamás

HÍREK – ESEMÉNYEK

ÖTVEN ÉVVEL EZELŐTT HUNYT EL GYULAI ZOLTÁN, A HAZAI KÍSÉRLETI SZILÁRDTEST-FIZIKA ÚTTÖRŐJE

Gyulai Zoltán akadémikus, a Budapesti Műszaki Egyetem Kísérleti Fizika Tanszék egykori vezetője, az Eötvös Loránd Fizikai Társulat egykori elnöke halálának ötvenedik évfordulóján, 2018. július 13-án, egykori munkatársai kezdeményezésére az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, a BME Fizikai Intézete és a Magyar Tudományos Akadémia Fizikai Tudományok Osztálya koszorúzással egybekötött megemlékezést tartott Gyulai Zoltán BME kertjében lévő mellszobránál. Az alkalmon az egykori munkatársak és diákok, valamint a BME

Fizikai Intézete mai munkatársai mellett szép számban vettek részt Gyulai Zoltán leszármazottai és családtagjai is. Életéről és munkásságáról korábban már jelentek meg cikkek a folyóirat hasábjain, mégis – bár nevét az ELFT a mai napig is őrzi egy díjjal – személye ma már kevésbé ismert a szélesebb magyar fizikus közönség előtt. Ezért illő ebből az alkalomból a *Fizikai Szemlében* is újra megemlékeznünk róla. *Sólyom Jenő*, az ELFT elnöke koszorúzáson elmondott beszédét *Hartmann Ervin* Gyulai-iskoláról szóló írása követi.

EMLÉKBESZÉD GYULAI ZOLTÁN MELLSZOBORÁNÁL

Sólyom Jenő

MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont
ELTE, Fizikai Intézet

Gyulai Zoltán a „boldog békeidőkben”, egy látszólag nyugodt korban, 1887-ben született egy csendes erdélyi, döntő többségében magyarok lakta faluban, a Kisküküllő vármegyei Pipén. Innen indulva egy rendkívül mozgalmas, a két világháború által súlyosan befolyásolt, végül mégis magasba ívelő életutat futott be. Az első világháború az alig kezdődő tudományos pályát megtörve hosszú szibériai hadifogságba juttatta, a második miatt pedig kétszer is egyetemet kellett váltania, Debrecenből Kolozsvárra, majd onnan Budapestre, és mindig újra kellett kezdenie az oktatói és

kutatói elképzeléseinek megfelelő tanszék megszervezését, tudományos munkáját, amelyet azután Kosuth- és Állami díjjal is elismertek.

A szülőfalujában végzett elemi iskola után előbb Tordára, majd Kolozsvárra került. Ott érettségizett az unitárius gimnáziumban, majd matematika–fizika szakos tanári oklevelet szerzett a kolozsvári egyetemen. Ezután székely honvédők leszármazottjaként egyéves önkéntes katonai szolgálatra vonult be. Így csak 1912 őszétől kezdhetett tanársegédként dolgozni *Tangl Károly* mellett, aki *Eötvös Lorándnál* töltött tanárse-

gédség után a fizika tanára volt Kolozsvárt. Mindössze két év adatott neki, mert az első világháború kitörése után szinte azonnal bevonult katonának, és kikerült az orosz frontra. Egy év múlva orosz fogságba esett, és több mint hat évet töltött hadifogolytáborokban, többek között Novonyikolajevszkben, a mai Novoszibirszkben.

Amikor 1922 elején hazatérhetett, egykori egyeteme, ahol fenntartottak számára egy tanársegédi állást, már Szegeden működött. Így itt fejezhette be közel nyolc évnyi kényszerű szünet után a Kolozsvárt megkezdett doktori munkáját. Ezután nősült meg, vette el *Grátz Mártát*, a korábbi kolozsvári evangélikus lelkész egyik leányát, akit valószínűleg még Kolozsvárról ismert, hiszen az evangélikus paplak és az unitárius gimnázium alig száz méterre van egymástól.

1924-ben ösztöndíjjal Göttingenbe került, ahol két éven keresztül *Robert Wichard Pohl* mellett dolgozott. Hazajövele után előbb magántanárként, majd rendkívüli tanárként tartott Szegeden előadásokat, és végzett kutatómunkát. Ezek elismeréseként 1935-ben egyetemi tanári kinevezést kapott a debreceni egyetem orvosi kara fizikai intézetébe. Elődje égi mechanikával foglalkozott, ezért az általa elképzelt, a kísérleti fizikára alapozott tanszéket szinte a semmiből kellett felépítenie. Ő hívta meg akkor oda tanársegédnek *Szalay Sándort*, aki azután utóda lett, miután 1940-ben, Észak-Erdély visszatérte után a kolozsvári egyetem kísérleti fizika tanszékére nevezték ki.

A kolozsvári tanszék és az oktatás megszervezése ismét csak rövid időt hagytak a külső körülmények. A Budapesti Műszaki Egyetem tanácsulése már 1944 tavaszán döntött arról, hogy pályázati kiírás nélkül Gyulai Zoltánt hívják meg a kísérleti fizika tanszékre egyetemi tanárnak. A háborús front közeledte, majd a háború vége azonban közbeszólt. Bár egy időre elhagyta Kolozsvárt, a harcok befejezése után visszatért oda, és két évig még az akkor Bolyai Tudományegyetem nevet viselő magyar egyetemen tanított. Ezután foglalhatta el az állást a Budapesti Műszaki Egyetemen, és 1947-től nyugdíjba vonulásáig vezette a BME Kísérleti Fizika Tanszéket.

Miért emlékezünk ötven év után is Gyulai Zoltánra? Egykori mesteréről, Pohlról a Nobel-díjas *Sir Nevill Mott* így nyilatkozott: „véleményem szerint a göttingeni R. W. Pohl a szilárdtest-fizika igazi atyja”. Ezt továbbbővíve Gyulai Zoltánról azt mondhatjuk, hogy ő a magyar kísérleti szilárdtest-fizika úttörője volt.

Még egyetemi hallgatóként kezdett foglalkozni az akkor Hallwachs-effektusként emlegetett fényelektromos jelenséggel, pontosabban a belső fényelektromos vezetéssel. Fény hatására szigetelők vagy félvezetők belsejében az elektronok egy része magasabb energiájú, korábban üres sávba gerjesztődhet, ami által jelentősen megváltozhat az anyag vezetőképessége. Ez különösen markánsan jelenik meg szelénben. Gyulai Zol-



A Gyulai-család az ünnepségen.

tán a szelén fényelektromos vezetésével kapcsolatos vizsgálatairól írta első cikkeit 1912-ben. Hasonló témákkal foglalkozott göttingeni tartózkodása idején is. Ezután jött az ötlete, hogy vezetésre képes elektronokat nemcsak fénnel lehet ionkristályokban kelteni, hanem mechanikai deformációval is. Ezt ma is Gyulai–Hartly-jelenségként emlegetik a szakirodalomban.

Mielőtt 1935-ben a debreceni egyetemre kinevezték volna, a vallás- és közoktatásügyi miniszter a felterjesztésben többek között a következőket írta: „Gyulai Zoltán ... kutatásainak tárgyai a modern, kísérleti fizikának olyan területein mozognak, amelyek egyre fokozódó mértékben állnak az érdeklődés középpontjában. Dolgozataiból megállapítható, hogy igen jó kísérletező, világosan meglátja a maga elé tűzött problémát, nagy kísérleti készséggel és gyakorlati érzéssel vizsgálja azt, és viszi a megoldás felé. Kiemelkedő kísérletezői leleményessége, amellyel egyszerű eszközökkel és aránylag kis pénzen is elő tudja állítani az intenzív és eredményes kutatói munkához szükséges berendezéseket és műszereket. Nemcsak hazai, hanem külföldi szakkörök is elismerik és nagyra értékelik Gyulait mint kísérletező és kutató szakembert.”

Debreceni professzorsága idején kezdett a kristályok növekedésével foglalkozni. Vezetése mellett ekkor készítette doktori értekezését *Tarján Imre*. Az akkor kezdett munka kiteljesedéséből született meg a Gyulai–Tarján-féle kristályfizikai iskola. Míg a Tarján-iskola az alkalmazás, az ipar számára fontos kristályok növesztése felé ment el, Gyulait inkább a növekedés mechanizmusa érdekelt. Innen fakadt érdeklődése a tűkristályok iránt, amelyekről megmutatta, hogy szakítószilárdságuk majdnem eléri az ideális kristályokra elméletileg meghatározott értéket.

Gyulai Zoltán aktív részese volt a magyar fizikus közéletnek. A Magyar Tudományos Akadémia már 1932-ben levelező tagjává választotta, 1954-ben lett rendes tag. Az ELFT 1952-ben választotta elnökének, s ezt a tisztséget haláláig betöltötte.

Tisztelettel emlékezünk rá halála 50. évfordulóján.

Gyulai Zoltán tudományos munkássága a kristályok növekedése és a kristályhibák vizsgálatának területére esik. Világhírű cikkei (NaCl-kristályok elektromos vezetésének megváltozása plasztikus deformációkor, tűkristályok „whiskerek” szakítószilárdságának méretfüggősége) mellett [1], legnagyobb érdemének az tartható, hogy egy tudományos iskola alakult ki körülötte [2], amelynek hatása napjainkig nyomon követhető. Az első tanítványok egyike *Tarján Imre* [3], aki Gyulai tanársegéde volt Debrecenben, és nála is doktorált 1939-ben. Tarján Imrét 1970-ben az MTA levelező, 1976-ban rendes tagjává választotta. Míg Gyulait főleg elvi jelentőségű témák (vannak-e kristályhibák, vannak-e „tökéletes kristályok”), addig Tarját inkább a gyakorlatiasabb témák (kristálynövekedés helyett a kristálynövesztés) érdekelték. Legtöbbször idézett cikke az extrém tisztaságú alkálihalogenid-kristályok előállításával foglalkozott. Gyulainak voltak még tanítványai Kolozsvárról, majd életének utolsó évtizedeiben a BME-n. Gyulai közvetlen tanítványai körül tanítványok újabb sora jelent meg. Szinte szimbolikus jelentőségű, hogy Gyulai Zoltán halálát követő évben a Tarján Imre vezette *MTA Kristályfizikai Kutatólaboratórium* munkatársa lett *Janszky József* (1943–2018), aki első cikkét a töltött diszlokációkról Tarján Imrével közösen írta. Janszkyt 2007-ben az MTA rendes tagjává választották. Mind Tarján, mind Janszky mellett kristályfizikához nem kötődő iskolák is kialakultak. Gyulai egyik utolsó cikkét velem közösen írta. Húsz évvel később nálam kezdte tudományos munkáját a kristályfizikai csoport jelenlegi vezetője. Neki van olyan tanítványa, aki már Gyulai Zoltán halála után született. Röviden: a tanítványok között négy-öt generációt lehet megkülönböztetni.

Gyulairól nem lehet mondani, hogy sem utódja, sem boldog őse. Gyulai először a pesti egyetemre iratkozott be, de hosszantartó tüdőgyulladás miatt haza kellett mennie Erdélybe, és tanulmányait Kolozsváron folytatta. Itt a kísérleti fizika tanára *Tangl Károly* [4] akadémikus volt. Elméleti fizikát, abban az időben matematikai fizikát, a szintén akadémikus *Farkas Gyulá-*

tól tanult [4]. Gyulai egész életében döntő jelentősége volt *Ortvay Rudolfnak* [4] (levelező tag 1925-től), akit először mint fizikai gyakorlatokat vezető tanársegédet ismert meg. A hétéves szibériai hadifogság után Ortvaytól kezdett el újra fizikát tanulni. Többek között Ortvay ajánlotta Gyulainak Göttingent. Itt a nála csak három évvel idősebb *Robert Wichard Pohl* professzor fogadta maga mellé ösztöndíjasként. Pohl a modern szilárdtest-fizika megalapozója. Maga a szilárdtest-fizika elnevezés is Pohl lakásának teraszán, poharazgatás közben született. Addig tréfásan „piszkos fizika”-ként volt az élcéldések tárgya.

Gyulai Zoltán emlékének megőrzésére az első lépést az ELFT tette 1969-ben a Gyulai-díj megalapításával. A díjat eddig 34-en kapták meg. (A díjhoz járó emléklapok Gyulai születési éve hibásan szerepel, 1888 a helyes 1887 helyett.) A BME Könyvtára 1987-ben „Gyulai Zoltán” emlékkiállítás rendezett. Az MTESZ ugyanabban az évben emléktáblát helyezett el az egyik szegedi gimnázium falán. Gyulai így ír első szegedi éveiről: „Lakni az intézetben laktam, mert az intézet üres volt. Egy szegedi gimnáziumban helyezték el a fizikai és vegytani intézeteket.” Gyulai szülőfalujában, az erdélyi Pipén az MTA, az *Unitárius Egyház* és a *Babeş-Bolyai Egyetem* 1998-ban helyezett el emléktáblát. Gyulai Zoltán mellszobrát a Műegyetem kertjében 2012-ben avatták fel. Az egyetem rektora, egykori építőmérnök-kari diák, ünnepi beszédében nemcsak a kísérletekkel gazdagon demonstrált előadásokra, hanem Gyulai „ugye-bár” szavajárására is visszaemlékezett.

Nemcsak tanítványaiban él tovább a tanár, hanem tanítványai tanítványaiban is, ezért halhatatlan ő.

Irodalom

1. Hartmann E.: Magyar ötletek és hazai megvalósításuk. *Magyar Tudomány* (2003/12) 1559–1565.
2. http://real.mtak.hu/74/1/35044_ZJ1.pdf
3. Hartmann E.: Tarján Imre a magyar kristályfizikában. *Fizikai Szemle* 62/7–8 (2012) 230–233.
4. *A Magyar Tudományos Akadémia Tagjai 1825–2002.* (főszerk.: Glatz F.), MTA Társadalomkutató Központ, Budapest 2003.

BÚCSÚ: BONIFERT DOMONKOSNÉ BOTTYÁN KATALIN

A Szegedi Tudományegyetem Juhász Gyula Pedagógusképző Kar Általános és Környezetfizikai Tanszéke megrendülten tudatja, hogy 2018. május 26-án elhunyt *Bonifert Domonkosné Bottyán Katalin*, a tanszék nyugalmazott főiskolai docense, intézményünk 1989–1994 közötti főigazgató-helyettese. Személyében nemcsak egy nagyszerű kollégát, kiváló oktatót, nagyra becsült pedagógust veszítettünk el, hanem távozott közülünk a tanszék szak módszertani csoportját több évtizeden át vezető oktatója, a hallgatók sze-

retett Kati néni. Szárnyai alatt fizikatanár-szakos hallgatók százai ismerkedtek meg a fizika tanításának alapvető módszertani fogalmaival, az oktatás ezernyi titkával, kaptak útmutatót a tanítás hétköznapi tennivalói megszervezéséhez. A Tanárnő diákjai nemcsak olyan szakmai és módszertani ismeretek birtokában léptek ki intézményünk kapuján, amely már másnap hiteles és katedraképes teljesítményt garantált, hanem azt is megtanulták, hogy becsülettel és hűséggel kell helytállni a tanári pályán.

Docendo discimus. A „tanítva tanulunk” elv vezérelte a munkájában, s ezt is sikeresen adta tovább tanítványainak, nemcsak szóban, írásban is. Számos tudományos közlemény fűződik nevéhez. 1992–2014 között a *Fizika Tanítása* folyóirat főszerkesztője és rendszeres szerzője is volt.

Sok tankönyv, segédkönyv őrizte nevét, mint szerzőt vagy szerkesztőt. A jogelőd Fizika Tanszéken 1975-ben – a Tanárnő aktív részvételével – egy kutatócsoport alakult azzal a céllal, hogy az alapfokú oktatáshoz tankönyveket és egyéb oktatási segédanyagokat készítsenek. Az igen erős és elismert módszertani csoport kutatómunkája 2013-ig azzal a céllal folyt, hogy a 10–14 éves korosztály számára a NAT-nak, illetve a kerettantervi előírásoknak megfelelő, a tanulók életkori sajátosságait messzemenően figyelembe vevő, szakmailag és módszertanilag magas színvonalú tankönyvek íródjanak. A tantervi reformok újabb és újabb tankönyvcsalád megjelenését, majd átdolgozását tették szükségessé. Az átdolgozás mellett – az eredményesebb fizika-tanítás érdekében – feladatgyűjtemények, tudásszintmérő feladatlapok is készültek. A tankönyvek és oktatási segédanyagok, amelyek mind a mai napig hasz-



nálatosak a magyarországi általános iskolákban, a Mozaik Kiadó gondozásában jelentek meg.

A Juhász Gyula Tanárképző Főiskola az 1990-es évektől a hagyományos főiskolai képzési mellé új képzési formákat vezetett be. 1998-ban a Főiskolai Tanács létrehozta a Szakképzési, Továbbképzési és Távoktatási Intézetét, amely a kor kihívásainak megfelelő, színvonalas szakképzési, továbbképzési munkát végzett/végez. Az intézet igazgatói feladatát – nyugdíjba vonulásáig – 2007-ig, a Tanárnő látta el.

Férjével, *Bonifert Domonkossal* együtt széleskörűen ismertek voltak, mint az általános iskolai matematika- és fizikaoktatás zászlóvivői – határainkon belül és túl is. Végtelenül sokat tett a fizika és a matematika népszerűsítése és a tehetségek gondozása érdekében. Évtizedeken keresztül szervezte és segítette a 10–14 éves tanulók helyi és megyei szintű fizika- és matematikaversenyeit, ez utóbbit a Bonifert Domonkos Alapítványon keresztül még nyugdíjas éveiben is nagy örömmel tette.

A Tanárnő emlékét kegyelettel megőrizzük.

Az Általános és Környezetfizikai Tanszék munkatársai

HUMBOLDT-DÍJBAN RÉSZESÜLT LEGEZA ÖRS

2018 június 28-án az Alexander von Humboldt Alapítvány *Humboldt Research Award* díjjal tüntette ki *Legeza Örsöt*, a Magyar Tudományos Akadémia Wigner Fizikai Kutatóközpont tudományos tanácsadóját.

Legeza Örs, a tenzorhálózat-algoritmikus és a kvantuminformáció-elmélet ötvözésének nemzetközileg elismert úttörője számos alapvető, új eredményt ért el a fizika és kémia területén. Kutatásai olyan, a kvantummechanika alaptörvényeire épülő új matematikai algoritmusok kifejlesztésére fókuszálnak, amelyek lehetővé teszik a korábbiaknál jóval komplexebb kvantumrendszerek numerikus szimulációs vizsgálatát, illetve viselkedésük előrejelzését, vagy akár tulajdonságaik tervezését. Az általa fejlesztett számítógépes programokat a világ számos kutatóintézetében és kutatóegyetemén nagy sikerrel alkalmazzák, például anyagi tulajdonságok szimulációira szilárd testekben, molekuláris kvantumkémiai, magfizikában, illetve az információtechnológia kvantum szimulációjában. Számításokkal hatékonyan szimulálják az olyan kísérletileg is megépíthető kvantum rendszereket, az ultra-hideg atomokat, amelyekről a szakma például a kvantumszámítógépek, vagy éppen a magas hőmérsékletű szupravezetők kifejlesztését reméli. Az MTA Wigner FK-ban 2012-ben hozta létre az Erősen korrelált rendszerek „Lendület”

kutatócsoportját, amely számos nemzetközi együttműködésben vesz részt Európában és más kontinensen. Csoportja több olyan eredményt ért el, amelyek a jelenlegi konvencionális módszerekkel nem lettek volna lehetségesek. Többek között mágneses anyagok és korrelált elektronrendszerek viselkedését vizsgálva különféle egzotikus kvantumfázisok létét mutatták ki, illetve olyan átmenetifém-klaszterek molekulapályái között fennálló összefonódottsági képeket határoztak meg, amelyek fontos szerepet játszhatnak biokémiai reakciók során. Másfél éve egy amerikai együttműködés keretében megkezdtek algoritmusaik integrálását a Pacific Northwest National Laboratory-ban fejlesztett NWChem professzionális programcsomagba, ami – várhatóan – a jövőben a kvantumtechnológiai elméleti kutatások meghatározó szoftveres alkalmazása lesz.

A Humboldt-díjat, e kivételes kitüntetést olyan, pályájuk csúcsán álló, nemzetközileg megbecsült, Németországon kívül dolgozó kutatóknak adományozzák, akikről még jelentős eredmények várhatók. Őket egy évig vendégül látják Németországban, hogy az általuk választott területen együtt dolgozzanak német kollégáikkal. Legeza Örs *Ulrich Schollwöck* professzor vendége lesz a Ludwig-Maximilians-Universität München (Lehrstuhl für Theoretische Nanophysik) osztályán.

MAGYAR SCIENCE ON STAGE FESZTIVÁL



SZEGED, 2018. OKTÓBER 5–7.

ÚJ UTAKON A DIGITÁLIS GENERÁCIÓHOZ



Természettudományos fesztivált és kiállítást rendez az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, az Informatika-Számítástechnika Tanárok Egyesülete, a Bolyai János Matematikai Társulat, a Magyar Kémikusok Egyesülete és a Magyar Biológiai Tanárok Országos Egyesülete 2018. október 5–7-ig Szegeden, a Szent-Györgyi Albert Agórában.

SCIENCE  ON STAGE 2018
SZEGED

THE EUROPEAN NETWORK OF SCIENCE TEACHERS

Szervezők:



myDAQ-pályázat a 2018–2019. tanévre

Az ELFT és az NI Hungary Kft. az idén is meghirdeti pályázatát fizikatanároknak.

A pályázat célja, hogy tanórákon, szakkörökön minél több iskolai kísérlet legyen elvégezhető a myDAQ eszköz használatával is.

A pályázati kiírás, a pályázat témája, a pályázati határidők és a jelentkezés feltételei megtalálhatók a <http://sukjaro.eu/ELFT-NI-palyazat> weblapon.

A pályázati regisztráció határideje:

2018. szeptember 16., 24:00 óra.

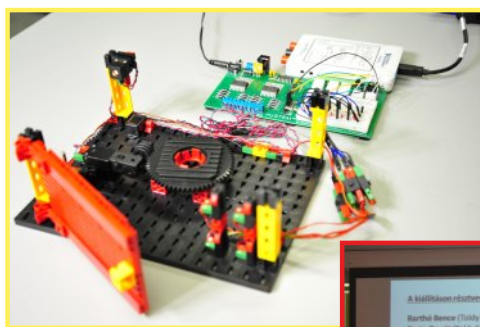
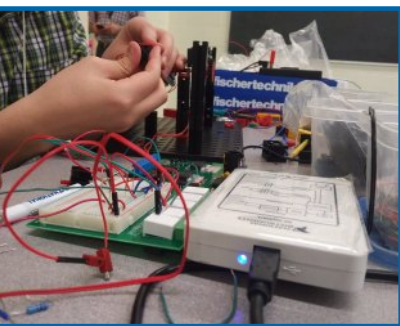
Az elkészült pályamunkák leadási határideje:

2019. január 25., 24:00 óra.

Az idei pályázatban a korábbi évekhez képest változás, hogy a 10 tárgyjutalmat a következőképpen osztják meg a szervezők:

- 5 tárgyjutalmat az öt legjobb **először induló** pályázó kapja,
- a fennmaradó 5 tárgyjutalmat pedig a már **tapasztaltabb**, legalább második éve induló pályázók.

A szervezők fenntartják a jogot, hogy egy 11. helyezettet is díjazzanak, aki a legjobb, **általános iskolásokkal** induló pályázó lesz (amennyiben lesz ilyen induló).



www.ni.com



ISSN 0015325-7



18007