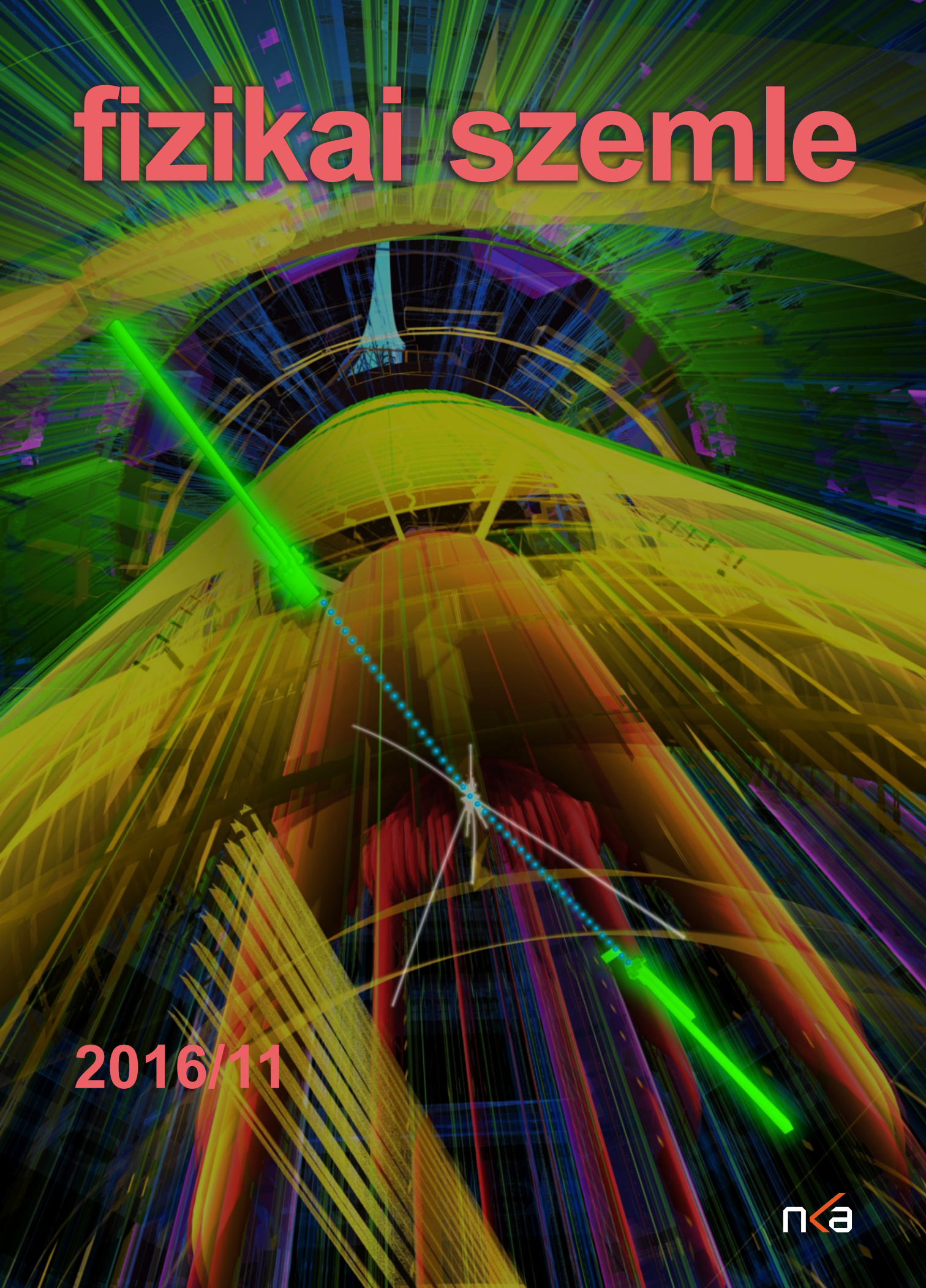


fizikai szemle

The background is a complex, abstract composition of overlapping, semi-transparent geometric shapes and lines. The color palette is dominated by bright green, yellow, and orange, with accents of blue and purple. The lines and shapes create a sense of depth and movement, resembling a stylized, futuristic architectural structure or a complex network of data paths.

2016/11

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat havonta megjelenő folyóirata.

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

Főszerkesztő:
Szatmáry Zoltán

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

Szerkesztő:
Lendvai János

Műszaki szerkesztő:
Kármán Tamás

A folyóirat e-mailcíme:

szerkesztok@fizikaiszemle.hu

A lapba szánt írásokat erre a címre kérjük.

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

A folyóirat honlapja:
<http://www.fizikaiszemle.hu>



A címlapon:

Nagy energiájú fotonpár kibocsátásával járó esemény a CERN ATLAS-kísérletében.

A fotonok észlelt energiáját a keskeny zöld vonalak jelzik. A 2015-ben megfigyelt sok hasonló esemény a CMS- és ATLAS-kísérletben újfajta részecske felfedezését sejtette a Nagy hadronütköztetőnél, azt azonban a 2016-os adatok nem erősítették meg.

TARTALOM

*Asbóth János, Iglói Ferenc: A 2016. évi Fizikai Nobel-díj
Hogyan kerül a topológia a szilárdtest-fizikába?* 358

*Horváth Dezső: A CERN nagy hadronütköztetője, 2016
A bíres LHC múltja, jelene és jövője* 364

*Király Márton, Radnóti Katalin: Az atomerőművek működéséről
egyszerűen, típusaik és jövőjük – 2. rész
A cikk a tanításban is alkalmazható módon dolgozza fel az
atomenergia jelenében és jövőjében felmerülő kérdéseket* 372

IN MEMORIAM...

*Radnai Gyula: Centenáriumi megemlékezések, 2016 – 4. rész
Jogot is végzett mérnök, mérnökből lett atomfizikus,
fizikusból lett tudós tanár – Simonyi Károly* 378

A FIZIKA TANÍTÁSA

*Nagy-Czirok Lászlóné Kiszi Magdolna, Gudmon Olivér, Nagy Norbert,
Szferle Tamás, Horváth Gábor: A talajról köszörülve visszapattanó
labda mechanikája – 2. rész
Mikor pattan föl a labda függőlegesen vagy vissza az eldobó kezébe?
Egy számos labdajátékban megfigyelhető jelenség tudományos
igényű elemzése* 382

*Horváth Norbert: Sokszálas gázdetektor építése a Baár–Madas
Református Gimnáziumban
Sikeres tehetésgondozó tevékenység jutalmaként tanulmányi
kirándulás a CERN-be* 387

KÖNYVESPOLC

*Juhász András, Jenei Péter (szerk.): Elektronikus módszertani jegyzet
a középiskolai fizikatanításhoz (Jávor Márta)* 392

*Horváth Gábor, Farkas Alexandra, Kriska György: A poláros fény
környezetoptikai és biológiai vonatkozásai (Füstöss László)* 395

*J. Asbóth, F. Ferenc: Nobel Prize in Physics, 2016
D. Horváth: The Large Hadron Collider of CERN, 2016
M. Király, K. Radnóti: Types and future of nuclear power plants – Part 2*

IN MEMORIAM...

*Gy. Radnai: Centenary commemorations 2016 – Part 4
Károly Simonyi*

TEACHING PHYSICS

*M. Nagy-Czirok Kiszi, O. Gudmon, N. Nagy, T. Szferle, G. Horváth: Mechanics
of the slipping rebounding ball – Part 2
N. Horváth: Constructing a multiple filament gas detector in the Baár–Madas
Gymnasium*

BOOKS

*A. Juhász, P. Jenei (eds): E-note for methodics of secondary school physics
teaching (M. Jávor)
G. Horváth, A. Farkas, Gy. Kriska: Environment-optical and biological application
of polarized light (L. Füstöss)*



A 2016. ÉVI FIZIKAI NOBEL-DÍJ

– Hogyan kerül a topológia a szilárdtest-fizikába?

Asbóth János – MTA Wigner FK SZFI

Iglói Ferenc – MTA Wigner FK SZFI és SZTE Elm. Fiz. Tsz.

A díjazottak

A Svéd Királyi Tudományos Akadémia a 2016. évi Nobel-díjat *David J. Thouless*-nek, *F. Duncan M. Haldane*-nek és *J. Michael Kosterlitz*-nek ítélte oda „A topológiai fázisátalakulással és az anyag topológiai fázisaival kapcsolatos elméleti felfedezéseiért”. A díjazott eredmények a múlt század 70-es, 80-as éveiben születtek és közvetlenül öt tudományos közleményhez kapcsolhatók [1–3, 5, 6]. Ezen

eredmények közvetve az anyag szerkezetével kapcsolatos alapvető elképzeléseinket tágították ki, amely paradigmaváltáshoz vezetett a szilárdtest-fizikában és az anyagtudományban. A jelenkor hangsúlyozottan fontos kutatási területei közé tartoznak az anyag topologikus fázisainak és az azokkal kapcsolatos fázisátalakulások vizsgálata. A topologikus szigetelők és a topologikus szupravezetők kísérleti és elméleti szempontból is számos fontos kérdést vetettek és vetnek fel, és ezen vizsgálatok – reményeink szerint – közelebb hoznak a kvantumszámítógépek megvalósításához is.

A három nagy-britanniai születésű és később az USA-ban dolgozó díjazott közül ketten korábbi No-



A 2016. évi fizikai Nobel-díjasok: David J. Thouless, F. Duncan M. Haldane és J. Michael Kosterlitz.

bel-díjasok tanítványai voltak. Thouless a Cornell Egyetemen 1958-ban *Hans Albrecht Bethe* (1967-es Nobel-díjas) témavezetésével nyerte el PhD címét, míg Haldane témavezetője Cambridge-ben 1978-ban *Philip Warren Anderson* (1977-es Nobel-díjas) volt. Kosterlitz szintén híres laboratóriumban, Oxfordban lett doktor 1969-ben. A díjazottak korábbi elismerései közül érdemes megemlíteni Thouless Wolf-díját (1990) és Dirac-medállját (1993), Kosterlitz és Thouless Lars Onsager-díját (2000) valamint Haldane Dirac-medállját (2012). Ezek alapján is megállapítható, hogy a díjazottak személyét szakterületükön a legnagyobbak között ismerték el.

A Nobel-díj méltatása három eredményt emel ki, amelyeket a következőkben egy-egy alfejezetben részletesebben ismertetünk. Írásunk végén egy kitekintésben a díjjal kapcsolatos eredményeknek a jelenkor fizikájára gyakorolt hatásáról is szólnunk.

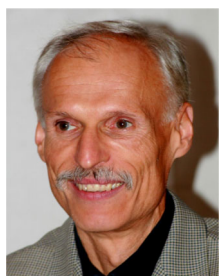
A Kosterlitz–Thouless átalakulás

A későbbiekben Kosterlitz–Thouless (KT) átalakulásnak elnevezett eredmények [1, 2] 1972-ben születtek Birminghamben, ahol Thouless a matematikai fizika professzora volt és Kosterlitz a második posztdoktori alkalmazását töltötte. Ebben az időszakban az elméleti fizikusok érdeklődésének homlokterében a kritikus jelenségek és – a nem sokkal korábban felfedezett – renormálásicsoport-módszer különböző alkalmazásai álltak. A KT-átalakuláshoz kapcsolódó vizs-

A szerzőket munkájukban az NKFIH az OTKA K109577, K115959, és NN109651 sz. pályázatok keretében, A. J.-t a Magyar Tudományos Akadémia a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj keretében támogatta. Köszönetet mondunk *Sólyom Jenő*nek a hasznos diszkusszióért.



Asbóth János fizikus, az MTA Wigner FK SZFI tudományos főmunkatársa, a kvantumos bolyongás topologikus fázisainak kutatója. A topologikus szigetelőről az ELTE-n és a Genfi Egyetemen tartott kurzust, a témáról *Pályi András*s és *Oroszlány László*-val közösen írt egyetemi jegyzete (*A Short Course on Topological Insulators*) a Springer kiadásában jelent meg idén.



Iglói Ferenc fizikus, az MTA Wigner FK SZFI tudományos tanácsadója, az SZTE Elméleti Fizikai Tanszék egyetemi tanára. Kutatási területe a statisztikus fizika és az elméleti szilárdtest-fizika, különös tekintettel a fázisátalakulások és kritikus jelenségek, rendezetlen klasszikus és kvantumos rendszerek, nemegyensúlyi folyamatok vizsgálatára. Több mint 175 tudományos dolgozat szerzője. 2017-től az *Europhysics News Science* Editora.

gálatokhoz kísérleti motivációt a szuperfolyékonyság, illetve a szupravezetés kétdimenziós, vékony rétegekben mutatott lehetséges viselkedése szolgáltatta. Matematikai szempontból a problémát a klasszikus, kétdimenziós XY-modell írja le, amelyet a

$$\mathcal{H}_{XY} = -J \sum_{\langle i,j \rangle} \cos(\theta_i - \theta_j) \quad (1)$$

Hamilton-függvény jellemez, ahol az összegzés az $\langle i,j \rangle$ elsőszomszédpárookra történik. Az itt szereplő $0 \leq \theta_i < 2\pi$ változó jelentheti egy $\vec{S}_i$ síkbeli vektorhoz tartozó szöveget, vagy szuperfolyékonyság esetén a szuperfolyadék

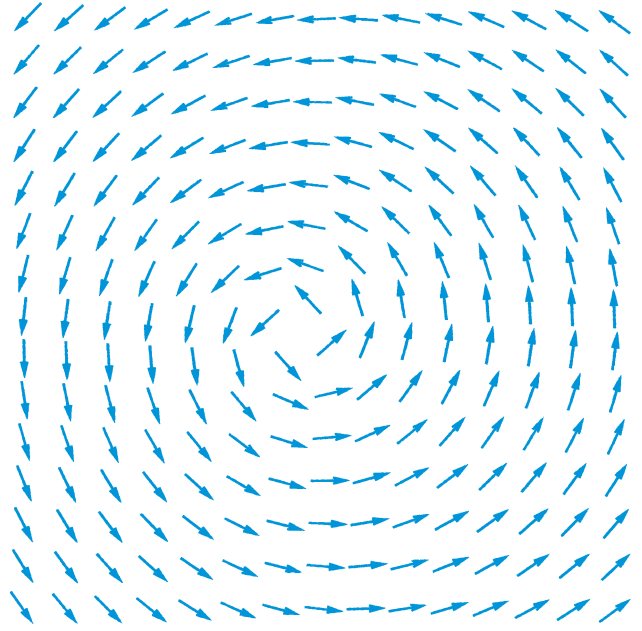
$$\Psi = \sqrt{\rho_s} e^{i\theta} \quad (2)$$

hullámfüggvényének fázisát, ahol ρ_s a szuperfolyadék sűrűségét jelöli. Az univerzalitás elvének megfelelően ezen két rendszer azonos univerzalitási osztályba tartozik. Az XY-modell esetén ismert volt egy egzakt eredmény, az úgynevezett Mermin–Wagner-tétel [7], amely szerint véges $T > 0$ hőmérsékleten nincs hosszútávú rend, mert az $\langle \vec{S}(0) \vec{S}(\vec{r}) \rangle$ korrelációs függvény nagy r esetén nullához tart.¹ Ennek ellentmondani látszottak a rendszeren számolt különböző numerikus eredmények, amelyek valamilyen fázisátalakulás jelenlétét mutatták. Közelítő, analitikus eredmény is ismert volt. Amennyiben az (1) egyenletet folytonos közelítésben írjuk fel:

$$\mathcal{H}_{XY} = \frac{J}{2} \int d^2r (\vec{\nabla} \theta(\vec{r}))^2, \quad (3)$$

továbbá a szögváltozó értelmezési tartományát a $-\infty < \theta < \infty$ módon kiterjesztjük, akkor egy szabad, gauss-

¹ A rendezett fázis hiányát a következő energia-entrópia érveléssel lehet érzékeltetni. Először tekintsük a klasszikus Ising-modellt, amelynek Hamilton-függvénye $\mathcal{H}_I = -J \sum_{\langle i,j \rangle} \sigma_i \sigma_j$ alakú, $J > 0$ és $\sigma_i = \pm 1$ diszkrét spinváltozó. Egydimenzióban, a Landau-nak tulajdonított érvelés szerint, a rendezett fázist (+++...+) megtörő doménfal típusú gerjesztés (+++...+---...-) energiája $\epsilon = 2J$, míg entrópiája $s \approx k_B \ln L$, mivel egy L hosszúságú láncon $\approx L$ helyre lehet a doménfalat elhelyezni. A gerjesztéssel kapcsolatos szabadenergia-változás: $f = \epsilon - Ts \approx 2J - Tk_B \ln L$ minden véges T hőmérsékleten negatív, ezért a termikus fluktuációk doménfalakat keltenek a rendszerben és ezzel megszűnik a ferromágneses rend. Két dimenzióban, Peierls általánosítása szerint, egy ferromágneses (például +++...+) tengerben keltett, L kerületű, ellentétesen (---...-) mágnesezett domén gerjesztési energiája a kerület hosszával arányos: $\epsilon = 2JL$. Az L kerületű doménfalak lehetséges számát egy L lépéses bolyongás lehetséges kimeneteleivel becsüljük meg. Négyzetrácsot tekintve egy bejövő lépés után tipikusan 3 különböző irányban folytatódhat a bolyongás, amely így (nem több mint) $\sim 3^L$ lehetőséget ad. Innen az entrópia $s \approx k_B L \ln 3$, a szabadenergia pedig $f \approx 2JL - Tk_B L \ln 3$. Láthatóan $T < T_c \approx 2J/\ln 3 k_B$ esetén nagy doménfalakat nem lehet termikus fluktuációkkal kelteni és a kétdimenziós Ising-modell a ferromágneses fázisában van. Folytonos szimmetriájú rendparaméter esetén, miként az (1) egyenlettel adott XY-modellnél a hasonló energia-entrópia érvelésnél a doménfal energiája akkor lesz minimális, ha a doménfal kiterjedt, mondjuk $\ell \sim L$ rácshelyet foglal el és két szomszédos rácshely között $\Delta\theta \sim 1/\ell$ szöggel fordul el a spin. Egy spinpár esetén az energiajárulék $\Delta\epsilon \sim (\Delta\theta)^2 \sim 1/\ell^2$, azaz a teljes doménfal esetén az energiasűrűség $\tilde{\epsilon} \sim 1/\ell \sim 1/L$. Két dimenzióban a doménfal keltése $\epsilon = C(1)$ energiával jár és ez minden véges hőmérsékleten kisebb, mint a $\sim Tk_B L$ entrópiájárulék, következésképpen termikus fluktuációkkal szemben a ferromágneses rend instabil.



1. ábra. Vortexgerjesztés az XY-modellben, a vortexparaméter, $v = 1$.

szos ingadozásokat mutató térelméletre jutunk, ahol a korrelációs függvény értéke:

$$\langle \vec{S}(0) \vec{S}(\vec{r}) \rangle \sim \left(\frac{a}{r} \right)^{\frac{k_B T}{2\pi J}}. \quad (4)$$

Itt a a mikroszkopikus hosszúságskálát jelöli. Ez az eredmény összhangban áll a Mermin–Wagner-tétellel, mivel nagy r esetén valóban eltűnik, viszont nem írja le megfelelően a magashőmérsékleti tartományban tapasztalt exponenciális lecsengést.

A fenti probléma megoldásához Kosterlitz és Thouless észrevette, hogy a szögváltozó periodicitását nem lehet elhagyni, mivel ezzel a vortex-jellegű gerjesztések is eltűnnek a rendszerből. Minden egyes vortex-hez egy v vortexparamétert lehet definiálni:

$$v = \frac{1}{2\pi} \oint_C d\vec{r} \cdot \vec{\nabla} \theta(\vec{r}), \quad (5)$$

ahol C egy, a vortex középpontját megkerülő tetszőleges zárt görbét jelöl. v egy egész szám, amely azt adja meg, hogy hányszor végzett teljes fordulatot a spin, miközben megkerülte a vortexet.

A probléma szempontjából releváns $v = \pm 1$ vortexek esetén $|\vec{\nabla} \theta(\vec{r})| = 1/r$ és egy izolált vortex energiája:

$$E_v = \frac{J}{2} \int d^2r \left(\frac{1}{r} \right)^2 = J\pi \ln \left(\frac{L}{a} \right), \quad (6)$$

ahol L a rendszer lineáris mérete és az a mikroszkopikus hosszúság a vortex magjának kiterjedését jelöli. A fentiek szerint egy izolált vortex energiája a rendszer méretével divergál és ezért termikus ingadozások során nem keletkezhet. Viszont lehetőség van vortex-antivortex párok keltésére, ahol az utóbbi

$v = -1$ vortexparaméterrel rendelkezik. Amennyiben ezek magjainak távolsága r , a gerjesztési energiájuk

$$2\pi J \ln\left(\frac{r}{a}\right),$$

amely véges értékű. Ezen topologikus gerjesztések kötött állapotai jelentik a vortex-anti-vortex gázt, amely az XY-modell alacsony hőmérsékletű állapotát jellemzi. Elegendően magas hőmérsékleten azonban a vortex-antivortex párok felszakadnak és a rendszer nem kötött állapotú vortexekből áll. Kosterlitz és Thouless az átalakulás T_{KT} hőmérsékletét energia-entrópia érveléssel becsülte meg. Egy L lineáris méretű rendszerben egy izolált vortex magja L^2/a^2 különböző helyen lehet, innen az entrópiája:

$$S = k_B \ln\left(\frac{L^2}{a^2}\right).$$

Így a vortex szabadenergiája:

$$F = E - TS = J\pi \ln\left(\frac{L}{a}\right) - T k_B 2 \ln\left(\frac{L}{a}\right), \quad (7)$$

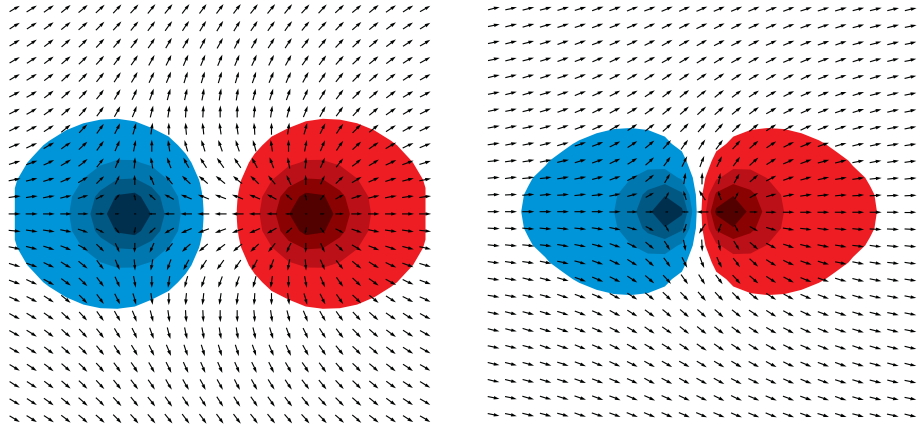
amely a $T_{KT} = J\pi/2k_B$ hőmérséklet felett negatív, azaz a szabad vortexek $T > T_{KT}$ esetén termodinamikailag stabilak.

A KT-átalakulás során az az új jelenség, hogy az átalakulás topologikus gerjesztések következtében lép föl, továbbá, hogy az átalakulás során nincs szimmetriasértés, amely a felfedezés időpontjában teljesen új és nem várt eredmény volt.

A KT-átalakulással kapcsolatban a következő eredményt a renormálási csoport-egyenletek származtatása és azok megoldása jelentette. A Kosterlitz által elvégzett számolásokból [8] következik, hogy az átalakulás során nagyon gyenge, úgynevezett lényeges szingularitás lép föl. A ξ korrelációs hossz a magas hőmérsékleti fázisban T_{KT} -hez közelítve hatványfüggvénynél gyorsabban divergál:

$$\xi \sim \exp\left(-\frac{A}{\sqrt{T - T_{KT}}}\right).$$

Az alacsony hőmérsékleti fázisban a korrelációs hossz divergens, a rendszer egy kiterjedt kritikus fázisban van. Itt a spin-spin korrelációs függvény a (4) szerinti hatványfüggvénnyel jellemzett lecsengést mutatja. A KT-átalakulás kísérletekben is megfigyelhető. Egyik következménye a p_s szuperfolyékony sűrűség átalakulási pontban mutatott univerzális ugrása [9], amelyet kísérletekben is az elmélettel összhangban állónak találtak.



2. ábra. Ellenkező polaritású vortex-antivortex párok az XY-modellben, balra nagyobb, jobbra kisebb távolságra egymástól.

Kvantumos Hall-effektus és a topologikus sávszerkezet-elmélet

Thouless következő nagy hozzájárulása a topologikus fázisok és fázisátalakulások megértéséhez a kvantumos Hall-effektus topológiai leírása volt. Thouless azt mutatta meg, hogy a KT-átalakuláshoz hasonlóan a kvantumos Hall-effektusnál is egy olyan újfajta fázisátalakulásról (átalakulások sorozatáról) van szó, amelyek megértéséhez a Landau-paradigma nem elég: szimmetriasértés nincsen, hanem a topológiára van szükség.

A kvantumos Hall-effektust 1980-ban fedezte fel Klaus von Klitzing, amikor egy félvezető felületén kialakított kétdimenziós elektrongáz tulajdonságait próbálta alacsony hőmérsékleten Hall-méréssel tesztelni. A Hall-mérésben a síkra merőleges B mágneses térben áramot vezetnek a mintán keresztül, és méri a mintának az árammal párhuzamos szélei között ébredő U_H elektromos feszültséget. A kísérlet klasszikus leírása (1879, Hall) egyszerű: az állandósult állapotban a töltéshordozókat eltérítő Lorentz-erőt kompenzálja a minta két szélén felhalmozódott töltések elektromos tere, amiből téglalap alakú mintára

$$U_H = \frac{IB}{nq}$$

adódik, ahol n a töltéshordozók felületi sűrűsége, q pedig a töltésük (ami lehet pozitív is, például lyukvezetésnél). Von Klitzing ehelyett azt tapasztalta, hogy elég tiszta minták, alacsony töltéshordozó-sűrűség, nagy mágneses tér és alacsony hőmérséklet esetén a Hall-vezetőképesség nem egyszerűen folytonosan változik a mágneses térrel, hanem bizonyos élesen meghatározott

$$\sigma_H = \frac{I}{U_H} = \nu \frac{e^2}{b}, \quad \nu \in \mathbb{N} \quad (8)$$

értékeket vesz fel, és ezen platók között viszonylag éles átmenetek vannak. A platókon ν értéke rendkívül stabil, relatív hibája $1:10^9$ -nek adódott, ami sok nagyságrenddel kisebb, mint akár a mintakészítés hibái, vagy a mágneses tér és a hőmérséklet fluktuációi.

A kvantumos Hall-effektus első elméleti értelmezésének alapjául Landau 1930-as munkája szolgált, ami szabad elektronok mágneses térben történő kétdimenziós mozgásának kvantummechanikai leírását adta. Az elektronok energia-sajátértékei itt sokszorososan degeneráltak, úgynevezett Landau-nívókba rendeződnek. Ha a Landau-nívó van betöltve, az anyag tömbi része szigetelő, de a minta szélén áram fog folyni, amihez minden betöltött nívó e^2/h vezetőképességgel ad járulékot. A magyarázat kulcsfontosságú része volt Laughlin érvelése (1981), ami segítette megérteni, hogy a mintában jelenlévő rendezetlenség milyen szerepet játszik. Azonban a Laughlin-érvelés nem segítette megérteni, mi történik, amikor a minta kristályrácsának periodikus potenciálja felhasítja a Landau-szinteket.

Thouless fontos hozzájárulása az volt, hogy 1982-ben, *Kobmotóval*, *Nightingale*-l és *den Nijs*-szel írt (TKNN, [3]) cikkében rámutatott: a kvantumos Hall-effektus kulcsa, hogy a mágneses tér az anyag tömbi részének topológiáját módosítja. Ha a mágneses tér akkora, hogy minden elemi cellára a h/e elemi fluxuskvantum racionális, p/q -ad része esik, a teret és a kristályrács potenciálját egyszerre lehet figyelembe venni egy nagyobb mágneses elemi cella bevezetésével. A nagyobb elemi cella miatt az eredeti energiasávok alsávokra esnek szét, amelyeket al-energiarészek (subgap) választhatnak el egymástól. A mágneses teret hangolva ezek az alrészecskék, mint azt néhány évvel korábban Hofstadter numerikusan felfedezte, fraktálstruktúrájú, úgynevezett Hofstadter-pillangót rajzolnak ki. Ha a kémiai potenciál egy alrészecskébe esik, a Hall-vezetőképesség a lineáris válaszelméletből, mint az áram válasza az U_H perturbációra meghatározható. TKNN eredménye ebből a számolásból:

$$\nu = \frac{i}{2\pi} \sum_{m \in \text{occ}} \int_{\text{BZ}} d^2k \nabla_k \times \langle u_m(k) | \nabla_k | u_m(k) \rangle, \quad (9)$$

ahol az m szerinti összeg a betöltött alsávokra vonatkozik, a k -integrál a mágneses Brillouin-zónán történik, az $|u_m(k)\rangle$ pedig az m -edik energia-sajátállapot. A Stokes-tétel alkalmazásával könnyű belátni, hogy ν valóban egésznek adódik. Matematikusabb nyelven megfogalmazva, TKNN szerint a Hall-vezetőképességet meghatározó ν a betöltött állapotokra való projektor első Chern-száma a mágneses Brillouin-zónában. A TKNN-eredmény akkor lett igazán teljes, amikor társszerzőkkel Thouless 1985-ben megmutatta [4], hogyan lehet az érvelést a rendezetlen, illetve a kölcsönható esetre is átültetni.

A technikai jellegű 1982-es TKNN-számoláshoz Thouless 1983-ban a „Thouless-pumpa” szemléletes képét csatolta. Azt mutatta meg, hogy ha a kvantumos Hall-effektus leírásánál a k , kristályimpulzust $2\pi t/(Ta)$ időre cseréljük (a a rácsállandó, T egy tetszőlegesen megválasztható periódusidő), a kétdimenziós kvantumos kristály problémáját egy periodikusan pumpált egydimenziós kvantumos lánc problémájára képezhetjük le. Ha T elegendően nagy, a pumpálás adiabatikusnak tekinthető, és a ν egész szám ilyenkor az egy ciklus során a lánc

mentén pumpált töltés mennyiségét adja meg. Ez a Thouless-pumpa, ami a Hall-effektus megértéséhez nyújt segítséget, 2015 óta nemcsak elméleti konstrukció: lézerrel csapdázott ultrahideg atomokon ekkor közvetlenül, kísérletileg megvalósították a jelenséget.

Thouless (és különböző társszerzői) munkája azt mutatta meg, hogy a kvantumos Hall-effektusra valóban érdemes egyfajta topologikus fázisátalakulások sorozataként tekintenünk. A fázisokat jellemző topologikus invariáns a Chern-szám, amely, szemben a KT-átalakulással, itt nem a rendszer valós térbeli, hanem az impulzustérbeli topológiáját adja meg.

Rögtön adódik a kérdés: nem lehet-e ezt a topológiát mágneses tér helyett valami mással megváltoztatni, azaz létezik-e kvantumos Hall-effektus Landau-nívók nélkül? A kérdésre Haldane adott pozitív választ 1988-ban, megmutatva, hogy egyrétegű grafitban (amit ma grafénként ismerünk) a másodsomszédhoppingoknak megfelelő komplex fázisokat adva, a Chern-számot, és így a minta Hall-vezetőképességét ugrásszerűen lehet hangolni. Azonban a komplex fázisokat Haldane kénytelen volt „kézzel beírni”, illetve egy játékmódban egy olyan inhomogén mágneses térből származtatni, amely nagy értékeket felvéve az elemi cella közepén kifelé, a szélein befelé mutat, oly módon, hogy az összegzett fluxus az elemi cellára eltűnik. Ebből a játékmódból nőtt ki két évtizeddel később a topologikus szigetelők területe.

Kvantumos spinláncok és az anyag szimmetria által védett topologikus fázisai

Haldane esetén a Nobel-díj Bizottság indoklása a díjazott két 1983-ban írt egyszerűs munkáját emeli ki, amelyek az antiferromágneses Heisenberg (AFH) spinlánc alacsony energiás gerjesztéseinek vizsgálatával foglalkoznak [5, 6]. Mindkét munkát már Los Angeles-ből küldte be publikálásra a szerző, viszont a vizsgálatok még visszanyúlnak a korábbi Grenoble-ban töltött időkre is. Ugyancsak Grenoble-ban született Haldane fontos új eredményei az egydimenziós elektrongáz leírására szolgáló, úgynevezett Luttinger-folyadék témakörében [10].

Ami az AFH-spinláncot illeti, azt a következő Hamilton-operátor definiálja:

$$\mathcal{H}_H = J \sum_i \vec{S}_i \cdot \vec{S}_{i+1}, \quad (10)$$

ahol $J > 0$, $\vec{S}_i$ az i -edik rácshelyen lévő spinoperátor és S egész vagy félegész értékű lehet. Egzakt eredmények szerint az $S = 1/2$ -es modellben a gerjesztésekben az energiárés eltűnik és hasonló igaz a klasszikus határesetet jelentő $S \rightarrow \infty$ modellre is. Tetszőleges S értékre ugyan nem voltak eredmények, mégis a nyolcvanas évek elejéig általánosan elfogadott nézet volt, hogy az energiárés nélküli viselkedés S -től függetlenül teljesül.

Haldane korszakos, új eredményeket hozó munkáiban a fenti problémát nagy S értékekre térelméleti

módszerekkel vizsgálta [5, 6]. Először megmutatta, hogy a modell alacsonyenergiás gerjesztéseit a következő hatásintegrált tartalmazó rendszer szolgáltatja:

$$S_{NLS} = \frac{1}{2g} \int dt dx \left(\frac{1}{v} (\partial_t \vec{n})^2 - v (\partial_x \vec{n})^2 \right), \quad (11)$$

ahol $\vec{n}$ egy háromdimenziós egységvektor, amely az antiferromágneses rendparaméter lassú változását írja le, v a spinhullám sebessége és a g csatolási állandó értéke $1/2S$. Ez a modell az $O(3)$ nemlineáris szigma-modell, amely az akkor már ismert eredmények szerint véges energiával rendelkezik. Ennek minden S -re igaznak kellett volna lennie, de ez nyilvánvaló ellentmondásban állt az $S = 1/2$ esetén ismert egzakt eredménnyel. A probléma feloldásában Haldane rámutatott arra, hogy az erős kvantumos fluktuációk eltérő módon viselkednek egész és félegész spinű láncok esetén. A hatásintegrált tovább analizálva egy, a (11) egyenlethez járuló, úgynevezett topologikus θ tagot származtatott:

$$S_{top} = i \frac{\theta}{4\pi} \int d^2 x \vec{n} (\partial_1 \vec{n} \times \partial_2 \vec{n}), \quad (12)$$

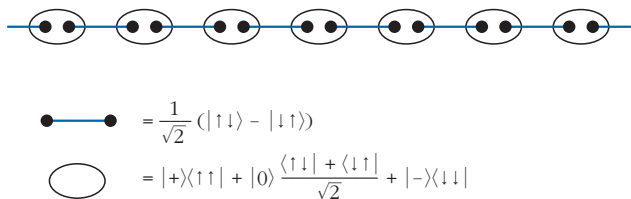
ahol $\theta = 2\pi S$ és euklideszi koordinátákat használt $(x^1, x^2) = (it, x)$. Ez a tag a mozgásegyenlethez ugyan nem ad járulékot, viszont a fázishoz egy $\exp(i2\pi SQ)$ tényezőt szolgáltat, ahol a

$$Q = \frac{1}{4\pi} \int d^2 x \vec{n} (\partial_1 \vec{n} \times \partial_2 \vec{n}), \quad (13)$$

úgynevezett csavarodási szám (angolul winding number) egész értékű. Q értéke az $\vec{n}$ térváltozó konfigurációjától, pontosabban annak topológiájától függ. S egész értéke esetén a fázistényező mindig 1 és ezért a lánc a korábbi állítások szerint energiával rendelkezik. S félegész értékére a fázistényező $(-1)^Q$ különböző előjelű lehet, amely egyes tagok kiesését eredményezi. Haldane azt jósolta, hogy minden félegész spinű lánc energiával rendelkezik, míg az összes egész spinű lánc energiával rendelkezik. A maga idejében ez egy váratlan és meglepő jóslat volt, és az első numerikus eredmények az $S = 1$ lánc esetén még nem szolgáltatottak egyértelmű igazolást.

A probléma megértéséhez nagyban hozzájárultak Affleck, Kennedy, Lieb és Tasaki (AKLT) vizsgálatai [11], akik egy közeli kapcsolatban álló modell esetén egzaktul a Haldane által jósolt véges energiával rendelkező eredményre jutottak. Az AKLT-modell Hamilton-ope-

3. ábra. Az AKLT-modell felírása $S = 1/2$ spinváltozók segítségével (lásd Wikipedia). Az $S = 1/2$ változók állapotai $|\uparrow\rangle$ és $|\downarrow\rangle$, az $S = 1$ változók állapotai $|+\rangle$, $|0\rangle$ és $|-\rangle$.



rátorában az $S = 1$ -re vonatkozó (10) egyenletet egy bikvadratikus taggal egészítik ki:

$$\mathcal{H}_{AKLT} = \sum_i \vec{S}_i \vec{S}_{i+1} + \frac{1}{3} \sum_i (\vec{S}_i \vec{S}_{i+1})^2, \quad (14)$$

amelynek alapállapotát mátrixszorzat-állapottal lehet felírni. Ehhez az $S = 1$ spineket két $S = 1/2$ kompozit spinnel fejezik ki, amelyek szingulett állapotban vannak a mellékelt, 3. ábra szerint. Nyitott határfeltétel esetén a lánc két végén $S = 1/2$ spin szabadsági fokok maradnak, amelyek között a láncmérettel exponenciálisan csökkenő kölcsönhatás van. Ez az egyik első példája a spinfraktálosodásnak.

Megjegyezzük, hogy a CsNiCl_2 rendszerben, amely egy $S = 1$ spinű AFH-láncot ír le, a Haldane-sejtéssel összhangban véges gerjesztési energiát mértek.

Összefoglalva elmondhatjuk, hogy az $S = 1$ spinű AFH-láncban megjósolt Haldane-fázis az anyag szimmetria által védett topologikus fázisainak prototípusát jelenti. Ebben az esetben egy nemlokális, úgynevezett sztring rendparamétert tudunk értelmezni:

$$O^z(r) = -\langle S_l^z \exp[i\pi (S_{l-1}^z + S_{l-2}^z + \dots + S_{l-r+1}^z)] S_{l+r}^z \rangle, \quad (15)$$

amely a Haldane-fázisban véges értéket vesz fel. Az így értelmezett topologikus rend viszonylag gyenge külső perturbációk esetén robusztusan fennmarad. Példaképp említhetjük a kötésrendezetlenség esetét, viszonylag erős rendezetlenség szükséges ahhoz, hogy sztring rendparaméter és vele együtt a Haldane-féle energiával a rendszerben eltűnjön.

Kitekintés

Alfred Nobel végrendelete szerint a nevére elnevezett díjat azon kutatóknak kell odaítélni, akik „a díjat megelőző évben az emberiség javát legjobban szolgálták”. Az évek során a Svéd Királyi Akadémia lazított a kitételeken, és a díjjal legtöbbször – így idén is – évtizedekkel korábban végzett kutatást ismernek el. Az „emberiség javát” pedig sokszor talán csak a tudásvágy csillapításaként értelmezhetjük (lásd a tavalyi, neutrínóoszillációért, vagy a 2013-as, a Higgs-mechanizmusért, vagy akár a 2011-es, a Világegyetem gyorsulva tágulásának felfedezéséért adott díjat). Idén azonban nemcsak az absztrakt tudásvágyról van szó: Kosterlitz, Thouless és Haldane úttörő munkáiból kinőtt a topologikus szigetelők, és az erősen kölcsönható anyagok topologikus rendjének kutatása is, ez utóbbi pedig új, ígéretes utat nyitott a kvantumszámítógép megépítése felé.

A TKNN-invariánshoz hasonló impulzustérbeli topologikus invariánsok, amelyek közvetlenül megjelennek mérhető fizikai mennyiségek robusztusan kvantált értékeiben, a topologikus szigetelők [12] definiáló jellemzői. Az első elméleti jóslatot a külső tér nélküli topologikus szigetelők közvetlenül Haldane

1988-as, a 3. fejezetben tárgyalt munkájára építve, 2005-ben *Fu* és *Kane* adták. Azt mutatták meg, hogy a Haldane által a másodsomszéd-hoppinghoz hozzáadott fázisok ténylegesen megjelennek a grafénben a spin-pálya csatolás miatt. A grafén, *Fu* és *Kane* szerint, megfelelően alacsony hőmérsékleten két Haldane-modellként értelmezhető: kicsit leegyszerűsítve, az egyik spinbeállású vezetési elektronok a +1, a másik spinbeállásúak a -1 Chern-számot valósítják meg. Sajnos hamar kiderült, hogy grafénben a spin-pálya csatolás túl gyenge ahhoz, hogy *Fu* és *Kane* jóslata kísérletileg valaha is észlelhető legyen (a grafén gyűrődései és egyéb fluktuációk még alacsony hőmérsékleten is elmossák). Az ötlet azonban termékenynek bizonyult: 2006-ban *Bernevig*, *Hughes* és *Zhang* megjósolta, és 2007-ben Würzburgban *Molenkamp* csoportjában kimérték, HgTe-vékonyrétegben a spin-pálya csatolás elég erős, és itt valóban külső tér nélkül is kvantált vezetőképesség (és spin Hall-effektus) mérhető. Azóta számos egy-, két-, és háromdimenziós topologikus szigetelőanyagot szintetizáltak, az elmélet pedig a 2000-es évek végére jutott el a topologikus szigetelők univerzalitási osztályainak felírásához. Ez a „topologikus szigetelők és szupravezetők periódusos rendszere”, ami tetszőleges dimenziószám esetén megmutatja, hogy az elemi szimmetriák (időmegfordítási, részecske-lyuk, illetve az ezek kombinációjaként jelentkező királis szimmetria) milyen kombinációja szükséges ahhoz, hogy egy anyag topologikus szigetelő lehessen.

A TKNN-invariánsból kinőtt topologikus szigetelők elméletéből jósolták meg a topologikus szupravezetőkben megjelenő Majorana-fermionokat, amelyekért a 2010-es évek szilárdtest-fizikájának egyik éles versenyfutása zajlik. Ezek a kölcsönható rendszer olyan sajátmódusai, amelyeket „Zen-részecskéknek” is neveznek, mivel az egymástól távoli Majorana-fermionoknak sem energiájuk, sem töltésük, sem spinjük nincs. Mivel ezen módusok így külső terekhez nem csatolódnak, betöltési számaikban kvantuminformációt lehetne elrejtetni a környezet fluktuációi okozta dekoherencia elől. Ráadásul ezen gerjesztések „fonásával” a bennük tárolt információt bizonyos mértékig manipulálni is lehet. A Majorana-fermionokat kísérletileg eddig csak áttételesen sikerült detektálni, elsőként 2012-ben Delftben, *Kouwenhoven* csoportjában, InSb-ből növesztett nanodróton, amit szupravezetővel proximitizáltak. A közvetlen kísérleti jelért folyik a mostani verseny: ez az lesz, ha Majorana-fermionokba beírunk, ott manipulálunk, majd onnan kiolvassuk kvantuminformációt. Sajnos, azonban úgy tűnik, a Majorana-fermionokban elrejtett információn nem lehet minden, a kvantumszámítógéphez szükséges műveletet fonással elvégezni.

A Haldane-lánc tulajdonságainak módszeres vizsgálata vezetett el a topologikus rend fogalmáig. Ez egy-, két-, illetve háromdimenziós erősen kölcsönható spinláncok jellemzője, amelyeknek a termodinamikai határesetben is véges sok degenerált alapállapota van, amiket energiárés választ el a gerjesztett állapo-

toktól. Az alapállapotokat egymástól nem valamilyen lokális, Landau-féle rendparaméter várható értéke különbözteti meg, hanem valamilyen nagyon nemlokális sztring-rendparaméter. Ezért a topologikus rend kéz a kézben jár a hosszú távú kvantumos korrelációk kialakulásával az alapállapotban (szemben a topologikus szigetelőkkel, vagy akár a szimmetriavédett topologikus renddel, ahol a kvantumos korrelációk exponenciálisan lecsengenek). A topologikus rend másik fontos jellemzője, hogy az alapállapot felett részecskeszerű elemi gerjesztések vannak, ezen részecskék fúziós szabályaival lehet karakterizálni egy-egy topologikus rendet. A vizsgálatokat egzaktul megoldható „játékmodellek” segítik, amelyek ősatya *Kitaev* toric-code-modellje: egy négyzetrácson definiált spinmodell, ami négyspin-kölcsönhatásokat tartalmaz. Ha a négyzetrácsot kilyukasztjuk, a rendszer alapállapota degenerálttá válik, az egymásra ortogonális alapállapotok száma a lyukak számával nő.

A manapság legígéretesebbnek tűnő kvantumszámítógép-prototípusokban a dekoherencia elleni védekezést a topologikus rend adja. A cél az úgynevezett surface code megvalósítása, ami a Kitaev-féle toric-code-modell egyfajta implementációja. A módszer hátránya, hogy így egy-egy logikai kvantumbitet többszáz fizikai kvantumbit ábrázol, de előnye, hogy a műveletek megengedett hibája 1% nagyságrendű, ami elérhető a jelenlegi technológiával. Erre épít, szupravezető kvantumbitek segítségével, a Google (UCSB+Google, Martinis-csoport, 9×1 kvantumbit), az IBM (Gambetta csoportja, 2×2 kvantumbit), de vannak ötletek a surface code implementációjára az ausztrál Kane-féle kvantumszámítógépen is (itt a kvantumbiteket szilíciumba ágyazott foszforatomok magspinje tárolja). A vezető technológiai cégek nemcsak a kísérleti, hanem az elméleti fejlesztésbe is becsatlakoztak: a topologikus kvantumszámítás-elmélet egyik vezető csoportját, a Station Q-t, a Microsoft finanszírozza. Ez a pezsgés mutatja, hogy a topologikus fázisok és fázisátalakulások nemcsak az 1970-es és 1980-as évek fizikájának kérdéseit válaszolták meg, de a kvantumfizika jövőbeli alkalmazásának is szerves részei.

Irodalom

1. J. M. Kosterlitz, D. J. Thouless: Long range order and metastability in two dimensional solids and superfluids. (Application of dislocation theory). *Journal of Physics C: Solid State Physics* 5 (1972) L124.
2. J. M. Kosterlitz, D. J. Thouless: Ordering, metastability and phase transitions in two-dimensional systems. *Journal of Physics C: Solid State Physics* 6 (1973) 1181.
3. D. J. Thouless, M. Kohmoto, M. P. Nightingale, M. den Nijs: Quantized Hall conductance in a two-dimensional periodic potential. *Physical Review Letters* 49 (1982) 405.
4. Q. Niu, D. J. Thouless, Y.-S. Wu: Quantized Hall conductance as a topological invariant. *Physical Review B* 31 (1985) 3372.
5. F. D. M. Haldane: Continuum dynamics of the 1-D Heisenberg antiferromagnet: Identification with the O(3) nonlinear sigma model. *Physics Letters A* 93 (1983) 464.
6. F. D. M. Haldane: Nonlinear Field Theory of Large-Spin Heisenberg Antiferromagnets: Semiclassically Quantized Solitons of the One-Dimensional Easy-Axis Néel State. *Physical Review Letters* 50 (1983) 1153.

7. N. D. Mermin, H. Wagner: Absence of ferromagnetism or anti-ferromagnetism in one- or two-dimensional isotropic Heisenberg models. *Physical Review Letters* 17(1966) 1133.
8. J. M. Kosterlitz: The critical properties of the two-dimensional xy model. *Journal of Physics C: Solid State Physics* 7(1974) 1046.
9. D. R. Nelson, J. M. Kosterlitz: Universal jump in the superfluid density of two-dimensional superfluids. *Physical Review Letters* 39(1977) 1201.
10. F. D. M. Haldane: 'Luttinger liquid theory' of one-dimensional quantum fluids. *Journal of Physics C: Solid State Physics* 14 (1981) 2585.
11. I. Affleck, T. Kennedy, E. H. Lieb, H. Tasaki: Rigorous results on valence-bond ground states in antiferromagnets. *Physical Review Letters* 59(1987) 799.
12. M. Z. Hasan, C. L. Kane: Colloquium: Topological insulators. *Review of Modern Physics* 82 (2010) 3045.

A CERN NAGY HADRONÜTKÖZTETŐJE, 2016

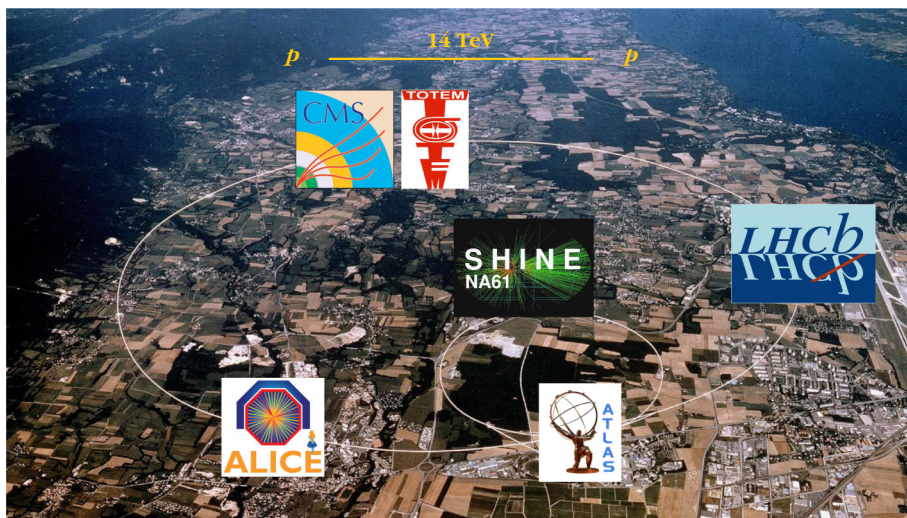
Horváth Dezső

Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest
és Atomki, Debrecen

A világ legnagyobb részecskegyorsítója, a CERN Nagy hadronütköztetője (hivatalos nevén LHC, Large Hadron Collider) 100 m-re a föld alatt, 27 km kerületű alagútban (1. és 2. ábra), 2000-től 2008-ig épült, és két megszakítással (az első kisebb katasztrófától, a második tervezett továbbfejlesztés miatt) azóta sikeresen működik.

Nagyenergiás részecskegyorsítók

A *részecskegyorsító* elnevezés némileg félrevezető, hiszen ezeken az energiákon a részecske sebessége nagyon közel van már a fénysebességhez, tovább nemigen gyorsul, csak az energiája növekszik. A gyorsítók teljesítményét az elért energia, valamint a nyaláb intenzitása és minősége határozza meg. A modern nagyenergiájú részecskegyorsítók egymással szemben mozgó részecskecsomagokat ütköztetnek az észlelőrendszerek közepén, ezzel biztosítva a befektetett energia legjobb kihasználását. Az energiát a részecskefizikában elektronvoltban (eV) mérjük, azzal az energiával, amelyre 1 volt feszültség átszelésekor tesz szert egy egységnyi töltésű részecske, például elektron vagy proton. A nagyenergiájú



1. ábra. A CERN és környéke a Szuper-proton-szinkrotron (SPS) és az LHC gyűrűivel, valamint a Genfi-tóval. Jelentős magyar csoportok dolgoznak a CMS-, ALICE-, NA61- és TOTEM-kísérleteknél.

fizika kedvenc egységei a giga- és teraelektronvolt ($1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$ és $1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$).

Ütköző nyalábok esetén az ütközések gyakoriságát a részecskenyalábok intenzitásán kívül, azok mennél kisebb keresztmetszeten történő átfedése, azaz lehető legjobb fókuszálása és pontosabb összeirányíthatósága határozza meg. A részecskefolyamatok valószínűségét a szóródási kísérletekhez bevezetett *hatáskeresztmetszettel* jellemezzük, amelynek mértékegysége a *barn* ($1 \text{ b} = 10^{-28} \text{ m}^2$). Nem véletlenül kapta az angol *csűr* nevet, hiszen nagyon nagy: a jelenleg tanulmányozott részecskefizikai folyamatok hatáskeresztmetszetét általában *picobarnban* ($1 \text{ pb} = 10^{-12} \text{ b}$) vagy *femto-barnban* ($1 \text{ fb} = 10^{-15} \text{ b}$) mérik. Az ütközési gyakoriságot legkönnyebben azzal lehet szemléltetni, mekkora



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.

A szerző köszönettel tartozik kollégáinak, főleg Siklér Ferencnek és Trócsányi Zoltánnak értékes tanácsaikért, valamint az NKFI Alap kutatási támogatásáért (K-103917 és K-109703. sz. szerződés). Ez a munka a szerző MTA Hírekben 2016 tavaszán és kora nyarán megjelent elektronikus cikkei alapján készült. A *Fizikai Szemlében* többször is publikáltunk a témában, de az általános érthetőségre törekedve szükségszerű ismétlésekkel írtuk ezt az cikket, és ezért elnézést kérünk a rendszeres olvasótól.



2. ábra. Az LHC alagútja a mágnesekkel.

mutatja, 2010 és 2011 között a luminozitás 140-szeresére, 2012-ben az energia növelése mellett még négyszeresére növekedett. Jelenleg ugyanez a folyamat figyelhető meg: 2016-ban, az LHC működésének első hónapja alatt már több adatot gyűjtöttünk, mint 2015 egész évében. Figyelemre méltó, ahogyan a gyorsító-fejlesztéssel összefüggő egy-egy hosszabb vízszintes (tehát a kísérleti luminozitást nem növelő, ütközések nélküli) időszak után a luminozitás növekedése felgyorsult.

hatáskeresztmetszet mérésére nyújt lehetőséget, ennek megfelelően a kísérletezők az ütköztetők intenzitását, amelyet igencsak szerencsés kifejezéssel *luminozitásnak* hívunk, a hatáskeresztmetszet reciprokában szokták kifejezni, tehát $1/\text{pb}$ (pb^{-1}) vagy nagyobb intenzitásnál $1/\text{fb}$ (fb^{-1}) egységben.

LHC, a Nagy hadronütköztető

Átadása (3. ábra) óta az LHC bámulatos fejlődésen ment keresztül. 2009-ben 3,5 TeV protonenergiával, azaz 7 TeV ütközési energiával indult. 2012-ben a protonütközési energiát 8 TeV-re, majd a másfél éves fejlesztés eredményeképpen 2014-ben 13 TeV-re sikerült növelni. A proton összetett részecske, amelyben hemzsegnek az igazán elemi (mondhatni, eddigi tudásunk szerint legegységesebb) részecskék, főként a magerőket hordozó gluonok. Új jelenségek keresésére a nagyobb protonenergia az alkatrészek közötti nagyobb ütközési energiát jelent, tehát nagyobb felfedezési potenciált, nagyobb tömegű esetleges új részecskék keltését.

Még az energiánál is jelentősebb volt az ütközési intenzitás, a luminozitás fejlődése. Amint azt a 4. ábra

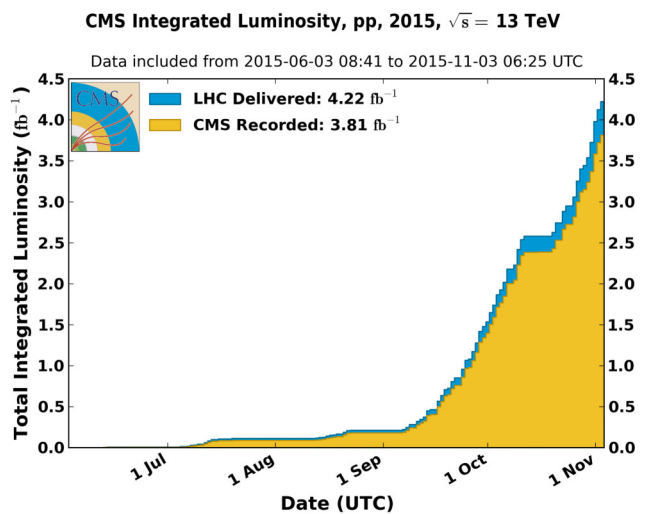
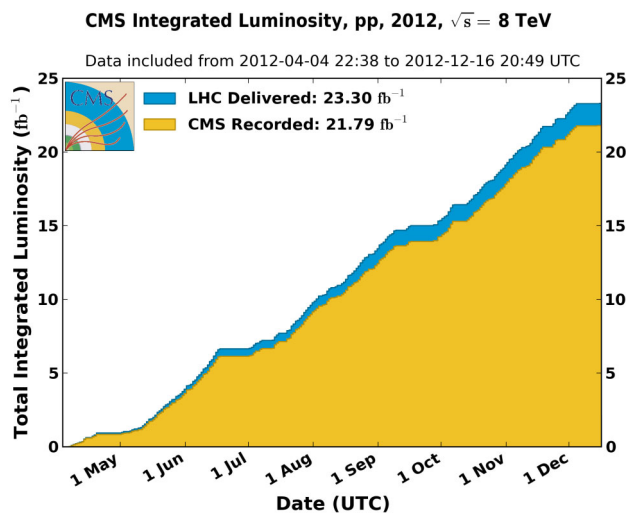
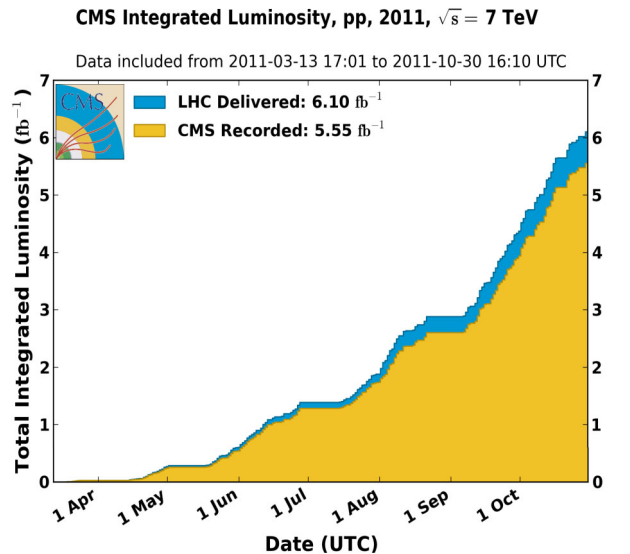
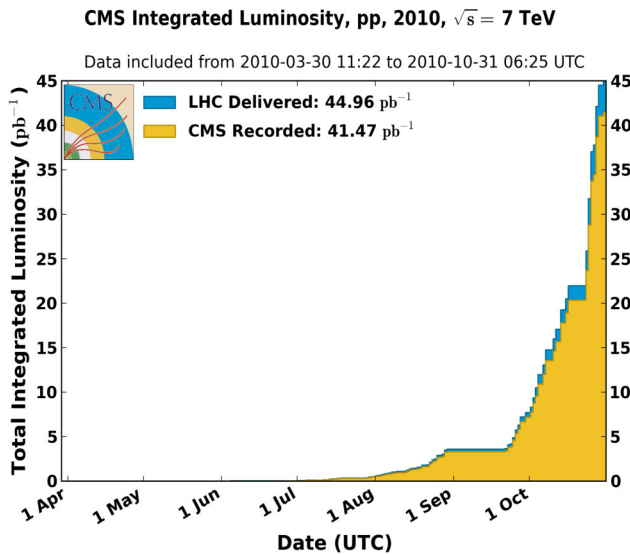
A részecskefizika standard modellje

A részecskefizika matematikai elmélete, amelyet történeti okokból *standard modellnek* hívunk, a világot kétféle elemi részecskéből építi fel, *fermionokból* és *bozonokból* (Enrico Fermi és Satyendra Nath Bose neve után), amelyek szimmetriatulajdonságaikban különböznek. Az elemi fermionok tekinthetők az anyagi részecskéknak, ilyen például az elektron, a bozonok pedig általában a közöttük fellépő kölcsönhatásokat közvetítik: a foton, például, az atomokat összetartó elektromágneses kölcsönhatást. Mindezek a részecskék különböző tulajdonságokkal rendelkeznek, amelyek *kvantumszámokkal* jellemezhetők. Van azonban egy furcsa bozon, a *Peter Higgsről* elnevezett Higgs-bozon, amelynek valamennyi kvantumszáma zérus, a tömege az egyetlen jellegzetes tulajdonsága (a szerzőt kollégái megbírálták, amikor tulajdonságok nélküli részecskének nevezték).

A standard modell a háromféle alapvető részecske-kölcsönhatást, az elektront atomi pályán tartó elektromágneses, az atommagot összetartó erős és a részecskék bomlását vezérlő gyenge kölcsönhatást szimmetriákból származtatja, de azok nem tűrik meg a tömegeket. Az elemi részecskék tömegének bevezetésére ki kellett fejleszteni egy olyan mechanizmust, amely megbontja a vákuum tökéletes szimmetriáját. Ezt a mechanizmust gyakorlatilag egyidejűleg Peter Higgs és két kutatócsoport közölte 1964-ben, az első kettőről Brout–Englert–Higgs (BEH) mechanizmusnak nevezzük (5. ábra). A felfedezés bejelentését követő évben, 2013-ban François Englert és Peter Higgs megkapta a fizikai Nobel-díjat. Robert

3. ábra. Az LHC indulása hatalmas érdeklődés mellett, 2008. szeptember 10-én.





4. ábra. Az LHC ütközési energiájának és luminozításának fejlődése napról napra és évről évre a CMS-kísérlet adatai alapján.

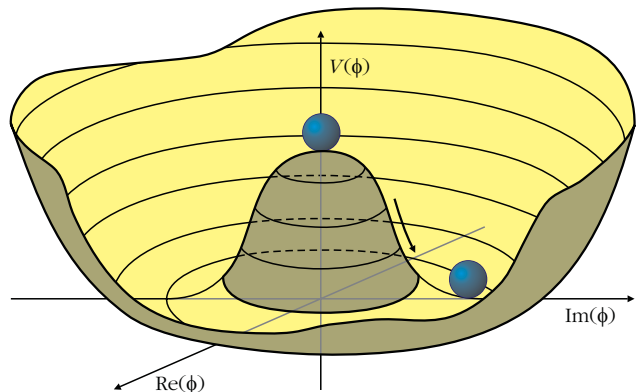
Brout nem érte meg a felfedezést, a második csoport pedig néhány héttel később publikálta a modellt, tehát lekészte a Nobel-díjat.

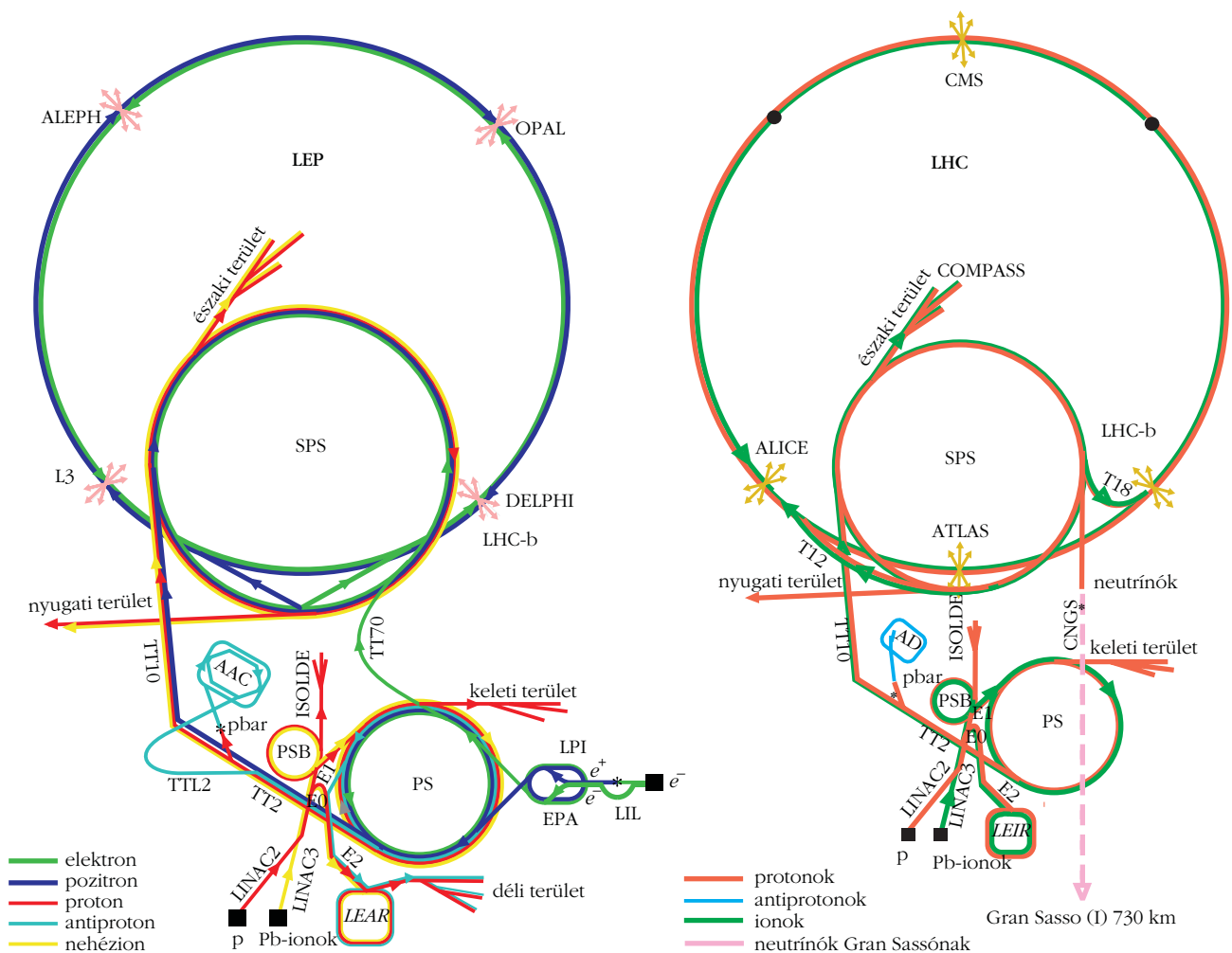
A CERN részecskegyorsítói

Az LHC tervezése már az előző nagy gyorsító, a Nagy elektron-positron ütköztető (LEP) indulása előtt megkezdődött. Amint az a 6. ábrán látható, a gyorsítókomplexum sok részből áll, egyik gyorsítófokozat a másikkal adja át további gyorsításra a részecskéket. A LEP idején a rendszer elektront, pozitront, protont és nehézionokat gyorsított, valamint antiprotonokat lassított antianyag (antihidrogén) előállítására. Az LHC egyszerűsített: csak protont és nehézionokat gyorsít, és az antiprotonprogramra a CERN külön antianyaggyárat (Antimatter Factory) épített. Az 1. ábra mérőberendezései közül a két legnagyobb, az ATLAS (A Toroidal Lhc Apparatus) és a CMS (Compact Muon Solenoid) az LHC áttelnes pontjaiban épült. A szerző

a CMS-kísérlet résztvevője, tehát például abból idézi, de az ATLAS teljesen hasonló eredményeket kapott; a részecskefizikában – a vizsgálatok rendkívüli bonyolultsága miatt – csak más, független kísérletekkel megerősített eredményeket fogadunk el.

5. ábra. A szimmetriasértő BEH-potenciál. A csúcsra tett golyó legurul és megbontja a tökéletes hengerszimmetriát.



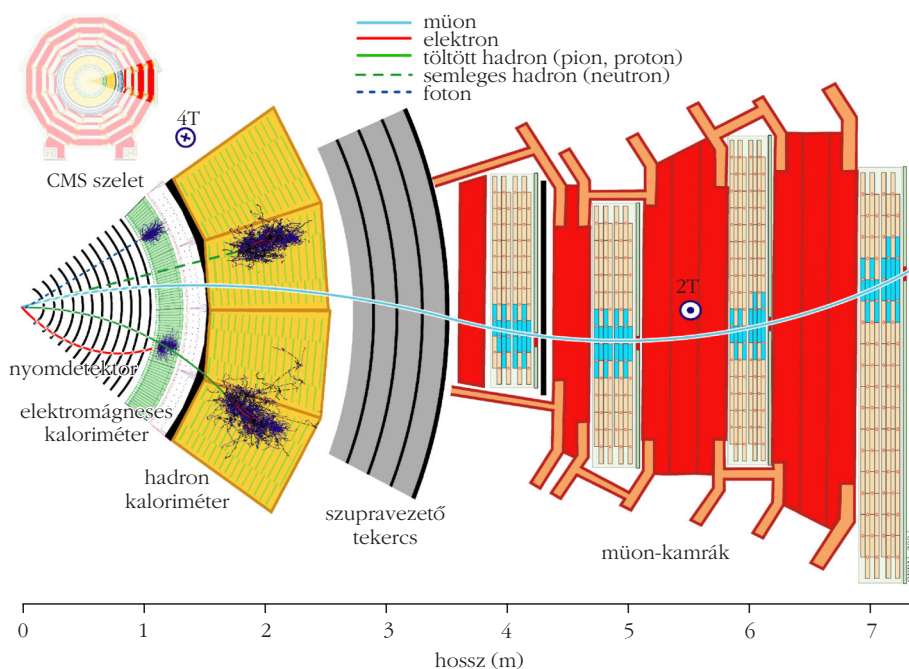


6. ábra. A CERN gyorsítókomplexuma a LEP időszakában (balra) és jelenlegi részecskegyorsítói (jobbra).

A CMS-kísérlet

A CMS-kísérlet észlelőrendszerét a 7. ábrán mutatjuk be. Hagymahéjszerűen egymásra épülő rétegei különböző részecskék azonosítására szolgálnak. Magyar fizikusok és mérnökök a hadron-kaloriméter megépítésében és a müon-kamrák helyzetmeghatározó rendszerének tervezésében,

7. ábra. A 14 000 tonnás CMS-detektor keresztmetszetének szelete. A részecskék a bal oldalt látható közép-pontban ütköznek, a kirepülő részecskéket a felvezető alapú nyomkövető rendszer, a 75 848 ólomwolframát egykristályból álló foton- és elektrondetektor, valamint a mezonokat és nukleonokat befogó hadron-kaloriméter észleli. Mindezt körbeveszi a világ legnagyobb szupravezető szolenoidja, akörül pedig a mágnes vaslemezei vannak a gyors müonokat észlelő kamrákkal.

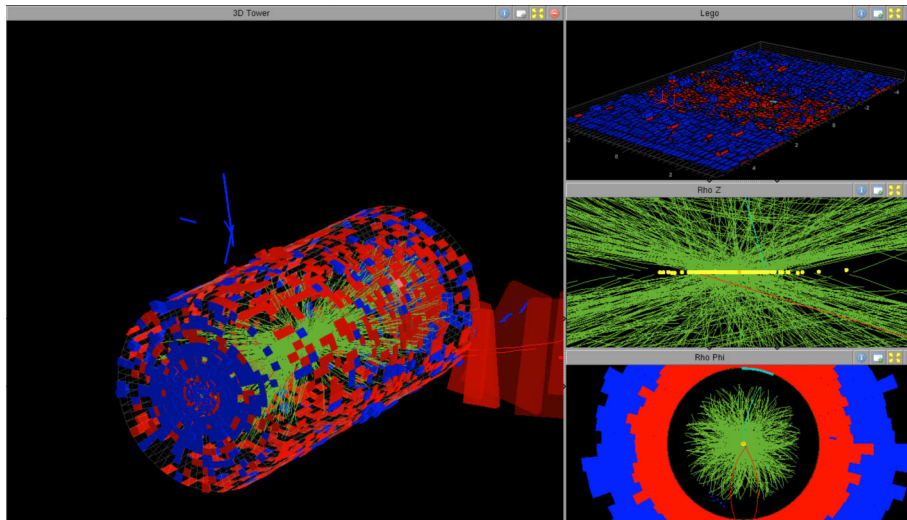


megépítésében vállaltak feladatokat, és jelenleg a müonkamrákon kívül a legbelső nyomkövető rendszer fejlesztésében és üzemeltetésében vesznek részt.

Az LHC fő célja a Higgs-bozon felfedezése, vagy – rosszabb esetben – létezésének teljes kizárása volt. Ez utóbbiban kevesen hittek, hiszen a rá épülő standard modell – kicsit ad-hoc jellege ellenére – évtizedek óta kiválóan működött, pontosan megjósolva minden addig mért adatot. A méltán világhíres *Stephen Hawking* volt a legnevesebb ellenzéke; a Higgs-bozon felfedezésének bejelentésekor közölte: „Úgy látszik, vesztettem 100 dollárt”. Amint az a 4. ábrán jól látszik, az LHC 2012-ben elérte a 2013–14-re tervezett nagy leállás előtti csúcsteljesítményét. A nagy luminozítás jelentősen növeli a felfedező munka hatékonyságát, de ugyanakkor nehezíti az adatok elemzését. A nagyenergiás fizika *eseményekkel* dolgozik: így hívjuk a detektorban történtek rögzítését, amikor valami érdekesnek gondolt ütközési folyamat történik. Tekintettel arra, hogy az LHC protoncsomagjai másodpercenként 40 milliószor ütköznek, igencsak intelligens módszerekre van szükségünk, hogy kiválasszuk belőlük azt az ezret vagy legfeljebb néhány ezret, amelyet kezelni és tárolni tudunk. A 8. ábrán olyan CMS-esemény látszik, amelyben két protoncsomag ütközésekor 78 egyidejű proton-ütközés következett be; az eseményt a két nagy energiájú müon megjelenése tette rögzítésre érdemessé, egyébként természetesen nem megy át a szűrőn.

A Higgs-bozon felfedezése

A CERN vezetése 2012 elején közölte, hogy addig nem állítják le az LHC-t, amíg meg nem figyelik a Higgs-bozont, az addig gyűjtött adatokból ugyanis már látszott, hogy az küszöbön áll. A szerző 2012 májusában, nem sokkal az LHC az évi indulása után előadást tartott az Akadémián, amelynek ezt a címet adta: *Higgs-bozon: felfedezésre ítélve?* A felfedezést azonban már a 2012-es adatok egynegyedének elemzése után, 2012. július 4-én bejelentették: mindkét nagy kísérlet, az ATLAS és a CMS észlelt $125 \text{ GeV}/c^2$ tömegnél (az Einstein-féle $E = mc^2$ összefüggés alapján) a részecskefizikában a tömegeket energiában mérjük) egy új részecskét a Higgs-bozonnak megfelelő tulajdonságokkal. Mivel a CERN erre az előadásra meghívta a világsajtót és azokat az elméleti tudósokat, akik a Higgs-bozont eredményező mechanizmust 40 évvel korábban megjósolták, a bejelentés nem lepte meg a közvéleményt. *Benjamin Franklin*nak tulajdo-

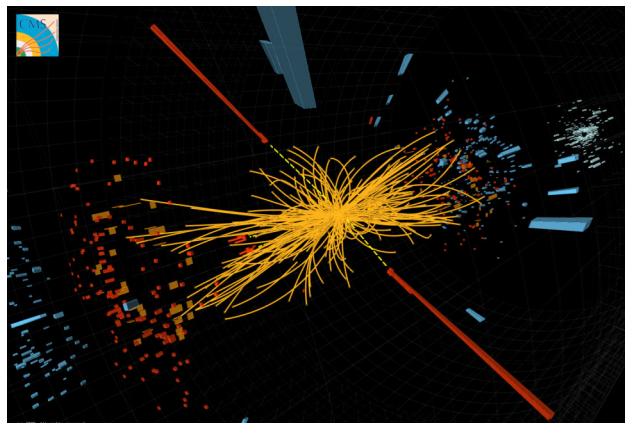


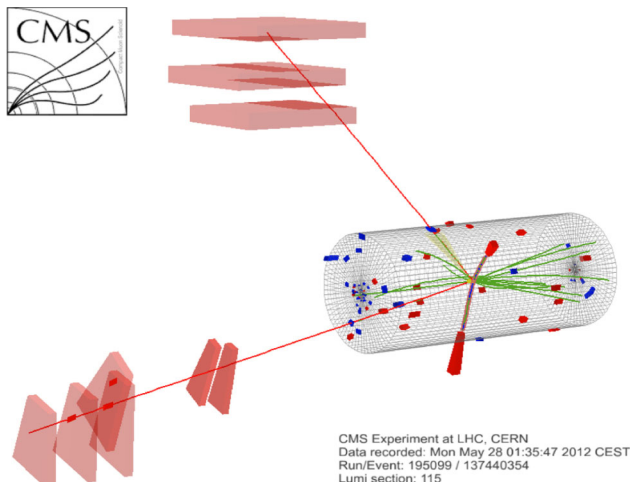
8. ábra. CMS-esemény két protoncsomag ütköztetésével, amely 78 egyidejű proton-proton reakcióhoz vezetett.

nítják azt a mondást, hogy három ember akkor tud titkot tartani, ha közülük kettő halott, a Higgs-bozon megfigyeléséről pedig már 4000 fizikus tudott, ha az ellenőrzés és bejelentés előtt nem is szabadott róla beszélnünk. Ennek megfelelően a *Nature Online* elektronikus folyóirat két nappal az előadások előtt már publikálta a pontos adatokat, és azt a hazai hírközlés is azonnal átvette.

Protonok nagyenergiás ütközésekor rengeteg részecske, főként a legkönnyebb mezon, pion keletkezik, amint az a 8. és 9. ábrán jól látszik. A Higgs-bozont legjobban két jellegzetes bomlási folyamata segítségével tudtuk azonosítani: amikor két fotonra (9. ábra) és 4 töltött leptonra, elektronra vagy müonra (10. ábra) bomlik. 2012. július 4-én ezekben az eseményekben sikerült a két nagy LHC-kísérletnek hitelt érdemlően megmutatnia a Higgs-bozon megfigyelését. Valamennyi 2012-es adat értékelése után ezt messzemenően pontosították: a Higgs-bozon tömege $125 \text{ GeV}/c^2$ -nek bizonyult, és valamennyi keletkezési és bomlási tulajdonsága igazolta a standard modell előrejelzéseit.

9. ábra. Higgs-bozonnak tulajdonítható CMS-esemény. A sok más részecske között keletkező Higgs-bozon két nagy energiájú fotonra bomlik.





10. ábra. Higgs-bozon bomlása egy elektron- és egy müonpárra.

További felfedezések?

Jogos a kérdés, minek tovább működtetni az LHC-t, ha egyszer fő célját, a Higgs-bozon felfedezését már elérte. Egyáltalán, mire jó a részecskefizika, ha egyszer a standard modell olyan csodálatosan leír mindent? Nem csinálhatna az a rengeteg részecskefizikus valami értelmesebb dolgot? A standard modell, nyilvánvaló sikerei ellenére, több sebből vérzik. Nem ad számot a Világegyetem 26 százalékát megtöltő *sötét anyagról* és 68%-át adó *sötét energiáról*. Nem magyarázza meg, hova lett az Ősrobbanás után az anti-anyag, amelynek az anyaggal azonos mennyiségben kellett keletkeznie. Van benne néhány matematikai bomba is: óriási mennyiségek jelennek meg az egyenletekben, amelyeket csak trükközéssel lehet eltüntetni. A BEH-mechanizmusba – sikere ellenére – nem fér bele a neutrínók nemrégiben felfedezett tömege és egymásba alakulása, az *ízrezgés* (ezért adtak fizikai Nobel-díjat tavaly). Nem tudjuk elhelyezni a gravitációt a szimmetria-generálta három kölcsönhatás rendszerében, hiszen *Einstein* általános relativitáselmélete a tömegvonzást nem bozon közvetítésével, hanem a tér-idő négydimenziós geometriájának változásával írja le. Komoly elméleti munka fekszik a standard modell különböző kiterjesztéseiben, amelyek próbálnak számot adni a fenti hiányosságokra, és azokat a kísérleti adatoknak kell igazolniuk vagy elvetniük (eddig inkább az utóbbi eset állt fenn). A részecskefizikusok kedvenc ilyen kiterjesztése a *szuperszimmetrikus standard modell*, annak ellenőrzésén is dolgoznak magyar fizikusok.

Egy ideig még reménykedtünk benne, hogy találgatunk eltéréseket a megfigyelt Higgs-bozon tulajdonságai és a standard modell jóslata között, de a remény hiúnak bizonyult: ahogyan az adatok gyűjtésével a mérések pontosodtak, úgy lett egyre jobb az egyezés. A standard modell elméleti kiterjesztései többféle Higgs-bozont jósnak, de eddig másmilyen nem találtunk, sem kisebb, sem nagyobb tömegértéknél. Az LHC megfigyelései között egyetlen biztató eltérést

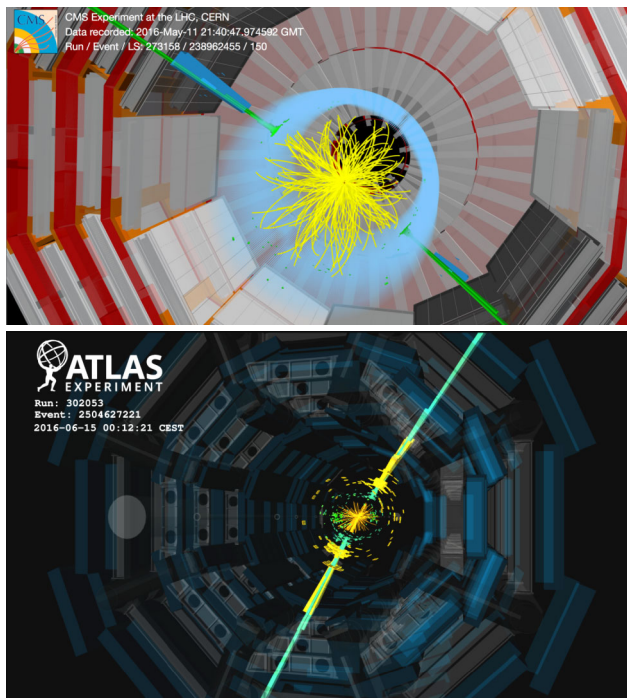
találtunk a standard modelltől: egy olyan új részecske halvány nyomát a Higgs-bozon tömegének hatszorosa, 750 GeV/ c^2 környékén, amely hasonló tulajdonságokkal rendelkezik, mint a Higgs-bozon, de egészen másképpen bomlik. Az LHC 2016-os adatgyűjtésének egyik fő célja e részecske létezésének ellenőrzése volt, és ha tényleg létezik (a 2015-ös észlelések nem voltak teljesen meggyőzőek), további tanulmányozása. A megfigyelés bejelentése óriási izgalmat váltott ki a nagyenergiás közösségben, mert kilépést jelentene a standard modell keretei közül.

X-részecske?

Az új jelenség egy olyan Higgs-bozonhoz hasonló X-részecskére utalt, amely annál sokkal nehezebb. Mindkét nagy kísérlet, az ATLAS és a CMS is megfigyelte a nyomát, de egyik sem teljesen meggyőzően. Ugyanakkor felkeltette a reményt arra, hogy valami újat fedezünk fel, hiszen a megfigyelés erőssége, amelyet azzal fejezünk ki, a σ (szigma) mérési bizonytalanság hányszorosával emelkedik ki az új jelenség a zajból, közel ugyanakkora volt, mint a Higgs-bozon megfigyeléséé 2011 végén (3σ körüli). A Higgs-bozon esetén ezt diadalmas bejelentés követte 2012 nyarán, amikor az újabb adatokkal mindkét kísérletnél elérte a megállapodás szerinti felfedezési küszöböt, az 5σ többször. Izgatottan vártuk tehát a 2016-os LHC-adatokat, megerősíti-e az X-részecske létezését.

Jogos a kérdés, miért az izgalom, új részecske, na bumm! Csakhogy az X-részecske rettenetesen *kilóg* a standard modell keretei közül. Egy 750 GeV tömegű Higgs-bozonhoz hasonló X-részecske nagyon sokféleképpen elbomolhat. Ez már a sokkal könnyebb Higgs-bozonra is igaz volt, és nagyobb tömegű részecske bomlásánál sokkal több lehetőség nyílik más bomlási módusok megnyilvánulására. A Higgs-bozon megfigyelésére is először három, majd később még több bomlási módozatot vizsgáltunk. Az X-részecske azonban látszólag csak a legvalószínűbb, két nagyenergiás gamma-fotonra akart bomlani, a sokkal nagyobb valószínűségű bomlási csatornák nagyobb tömegű részecskékké üresen maradtak. Ez tette a 2015-ös halvány megfigyelést annyira izgalmassá, hogy közzététele után néhány hónapon belül többszáz elméleti fizikai publikáció fejtette, vajon mi lehet.

A vizsgálat módszere a következő. Feltételezünk egy részecsketömeget és bomlási élettartamot, szimuláljuk a különböző lehetséges bomlásokat, a keletkező részecskéket átengedve a detektorszimuláción, és az eredményt összehasonlítjuk az észleléssel. Két gamma-fotonra csak $S = 0$ vagy $S = 2$ -es sajátperdületű (spinű), elektromosan semleges részecske tud bomlani. A 2015-ben gyűjtött teljes adathalmaz elemzése után 2016. június 16-án az ATLAS-kísérlet azt közölte egy 2861 szerzős (!) cikkben, hogy a kétfotonos csatornában 750 GeV körüli tömeggel $3,8\sigma$ többször lát-

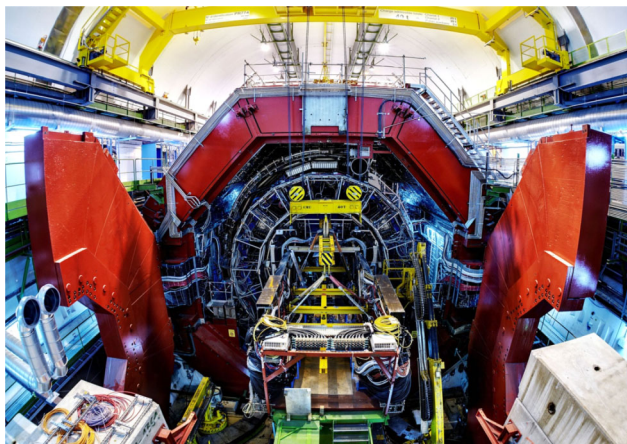


11. ábra. Óriási (6 TeV/c² feletti) tömegű új részecskék jelei a CMS- (föül) és ATLAS-detektorban (alul), 2016-ban. A részecskék hatalmas tömege és a belőlük felszabaduló energia mennyisége a bomlásnál létrejövő hadronzárporokat nagy mértékben fókuszálja.

nak $S = 0$ és $3,9\sigma$ többletet $S = 2$ feltételezésével. A CMS-kísérlet is látott többletet a 2016-os adatokban (egyesítve az összes korábban mérttel) egészen közel, 760 GeV-nél, de valamivel kisebb jelentőséggel, csak $3,4\sigma$ -val. A megdöbbenő az volt, hogy mint már említettük, a többi lehetséges és sokkal valószínűbb bomlási csatorna semmit nem mutatott.

Nagy izgalommal vártuk tehát az LHC 2016-os indulását, amely a 2015-ösnél sokkal nagyobb adathalmazt ígért, és július végére már a tavalyi adatmennyiség ötszörösével szolgált. Ilyenkor az egymással versengő csoportok adatelemzését a korábbi adatokon és szimulációkon szabad csak finomítani, az új adatokhoz egy bizonyos időpontig nem szabad nyúlni, és csak a már előre elfogadott módszerek eredményeit

12. ábra. Szerelik az ALICE-kísérlet észlelőrendszerének belsejét.



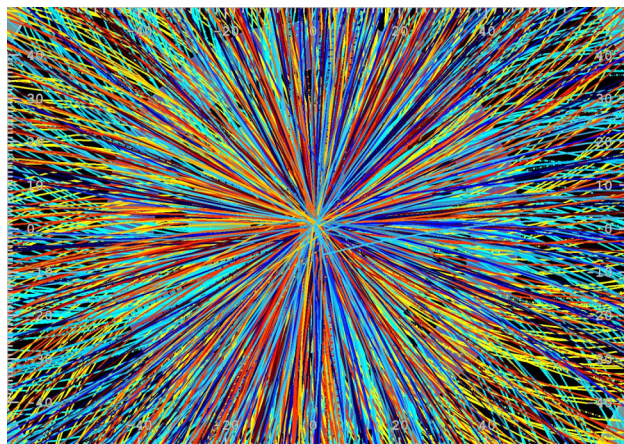
vesszük figyelembe (ezt *vak elemzésnek* hívjuk). Mindkét kísérlet 2016 legnagyobb részecskefizikai konferenciájára, a Chicagóban lezajlott, sokezer résztvevős ICHEP-re időzítette legújabb eredményeit. Azok egyrészt némileg lehangolóak, másrészt igencsak biztatók voltak. Az új CMS-adatok csökkentették az X-részecske megfigyelésének jelentőségét: a 2015-ös adathalmaz sokszorosának analízisével a 750 GeV-es többlet lecsúszott az észlelhetőségi szint alá, 2σ környékére. Ez egyrészt lehangoló, hiszen szinte az évszázad részecskefizikai felfedezése lett volna, ha a standard modellnek ennyire ellentmondó jelenséget találunk. Ugyanakkor megnyugtató, hogy mégis jól ismerjük világunkat, és a standard modell továbbra is időt állónak bizonyult. Az ATLAS-kísérlet teljesen azonos eredményre jutott: statisztikus ingadozás volt a 750 GeV-es többlet, semmi más. Ilyen jelenséget már többször láttunk, és ez egyáltalán nem jelent mérési hibát. Újabb adalék ahhoz, hogy óvatosan kell kezelnünk a megrázó új felfedezéseket.

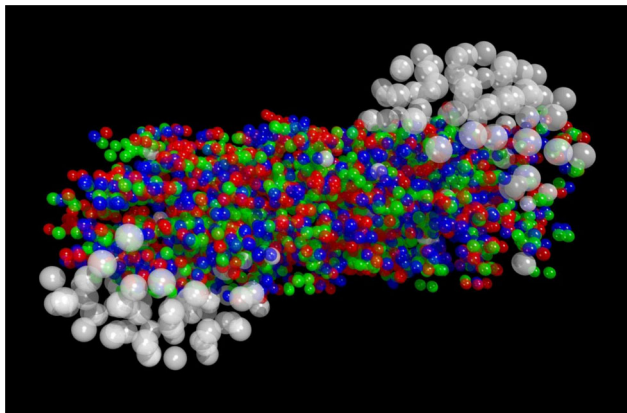
Az ICHEP konferencia ugyanakkor hihetetlen mennyiségű új adatot közöl: a négy nagy LHC-kísérlet többszáz új eredményt küldött be előadásra. Kedvcsinálónak felvillantunk egy-egy óriási tömegű új részecske eseményét (11. ábra) a 2016-os protonütközésekből a CMS-től és az ATLAS-tól: mindkét esetben 6 TeV feletti a részecskék tömege, amelyek hatalmas energiájú hadronzárporokra (kvarkpár) bomlanak.

Nehézion-fizika és az ALICE-kísérlet

Az LHC nemcsak protonokat ütköztet: minden év végén ólom ionokkal töltik fel, és az észlelőrendszerek nehézion-ütközéseket tanulmányoznak. Erre épült az ALICE (A Large Ion Collider Experiment) kísérlet (12. ábra), de a CMS-nek és az ATLAS-nak is komoly nehézion-programja van. A nehézion-fizika hazánkban igen fontos, egészen jelentős elméleti és kísérleti háttere van Magyarországon, és nemcsak az LHC kísérleteiben vesznek részt hazai nehézion-fizikusok, a Szuper-proton-szinkrotron NA61 jelű kísérle-

13. ábra. Ólomionok ütközése az ALICE detektorban 2,76 TeV/nukleon energián.





14. ábra. Nehézion-ütközéskor az átfedési térfogatban feloldódnak a nukleonok és erősen kölcsönható színes közeg keletkezik.

tében és az amerikai Brookhaven Nemzeti Laboratórium PHENIX-kísérletében is dolgozik magyar csoport, bár a legnagyobb magyar nehézionos csoport az ALICE-ban működik.

A nehézion-ütközéseket azzal jellemezzük, hogy nukleonpáronként mekkora energiát helyezünk el bennük. Az LHC nyalábonként 4 TeV-es működésekor a 82 protont tartalmazó, elektronjaitól teljesen megfosztott ólomion 328 TeV energiát nyer, 238 nukleonja mindegyikére 1,38 TeV energia jut. A nukleonpárokra jutó átlagos ütközési energia tehát 2,76 TeV lesz: ilyen esemény látszik a 13. ábrán. Az ALICE-detektor belsejében található óriási idővetítő kamra (Time Projection Chamber) lehetővé teszi a nehézion-ütközésekben keletkező sokezer részecske pontos azonosítását; annak üzemeltetésében és fejlesztésében vesznek részt a Wigner FK kutatói.

Az amerikai Brookhaven Nemzeti Laboratóriumban működő RHIC (Relativisztikus nehézion-ütköztető) kísérletei már az LHC előtt megmutatták, hogy nagyenergiás arany-arany ütközésekben az atommagokban feloldódnak a nukleonok, szabad kvarkokból és gluonokból álló közeg, kvark-gluon-plazma keletkezik. Ezt megerősítette az LHC nehézion-programja. Nagyon gyakori ugyanis gluonok ütközésekor kvark-antikvark részecske-párok keletkezése, és a két kvark által keltett hadronzárporok ellenkező irányban hagyják el az ütközési pontot. Ilyen események vizsgálatából kiderül, hogy centrális ütközések esetén, amikor a két atommag frontálisan ütközik, a két hadronzárpor közül az egyik nagyon meggyengül, mert a hozzá tartozó kvarknak nagy mennyiségű, erősen kölcsön-

ható kvarkanyagon kell keresztülverekednie magát (14. ábra). Perifériális ütközéseknél, amikor az atommagok átfedése sokkal kisebb, ez a hatás gyakorlatilag eltűnik, a két hadronzárpor közel azonos. A nehézionreakciók rendszeres tanulmányozásához az LHC-kísérletek referenciaméréseket végeznek 2,76 TeV-es proton-proton és 5,02 TeV-es proton-ólom ütközések tanulmányozásával. Az utóbbi arra a meglepő eredményre vezetett, hogy az ólom+ólom ütközésekben, sok részecske keltésekor megfigyelhető korrelációk, azaz a kirepülő részecskék közötti összehangoltság megfigyelhető proton+ólom ütközésekben is.

Az ALICE-kísérlet számára a Wigner FK csoportja új, rendkívül gyors és strapabíró adatgyűjtő eszközt fejlesztett ki, amely annyira sikeres lett, hogy azóta az ALICE-on kívül tucatnyi más kísérlet is használja szerete a világon.

Az LHC további fejlesztése

Látjuk, hogy a nagyenergiás fizika kísérletei hosszú időre szólnak: az LHC és kísérletei csaknem 20 évig épültek és legalább 20 évig működni fognak. A fejlődés természetesen nem állhat le. Egyrészt az észlelőrendszerek élettartama véges, erkölcsileg elavulnak és fizikailag előregednek, nem utolsósorban a jelentős sugárzási károsodás következtében. A CERN távlatilag az LHC luminozitásának nagyságrendi növelését tervezi, annak kezelésére pedig az észlelőrendszereket képessé kell tennünk, tehát a belső elemeket újra kell terveznünk és építenünk. Az adatrögzítést is egyre hatékonyabbá tesszük: az LHC indulásakor a CMS-kí-

15. ábra. Az LHC működési terve 2016-ban. Májustól novemberig proton+proton ütközésekkel, utána proton+ólom programmal. Az adatgyűjtési periódusokat fejlesztési leállások szakítják meg.

Apr				May				June							
Wk	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26		
Mo	4	31	30	29	28	27	Whet	26	25	24	23	22	21		
Tu							VdM								
We		Injector TS (8 hours)								TS1					
Th					Academy		beta* 2.5 km dev.								
Fr					May Day comp				MD 1						
Sa	Recommissioning with beam														
Su				1st May		Intensity ramp-up Scrubbing as required									

July				Aug				Sep							
Wk	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39		
Mo	4	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20		
Tu															
We				MD 2						MD 3	TS2	beta* = 2.5 km distraining			
Th							MD			June 6					
Fr															
Sa				beta* 2.5 km dev.											
Su															

Oct				Nov				Dec				End of run			
Wk	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52		
Mo	3	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19		
Tu							Ion setup				Extended year end technical stop				
We						TS3									
Th															
Fr					MD 4				Ion run (p-Pb)			Lab closed			
Sa															
Su												Xmas	New Year		

sérlet mintegy 400 eseményt tudott másodpercenként rögzíteni, ez azóta 1000-re nőtt. Az adatok kezelésére a CERN létrehozta a Nemzetközi LHC gridhálózatot, amelynek központi egysége (T0 központja) ugyan a CERN-ben van, de annak egy része a Wigner FK-ba költözött. A CMS elsődleges adattároló (T1) helyei a Chicago melletti Fermilabban, Barcelonában, Oxfordban, Lyonban, Karlsruheban, Bolognában és Tajpejben vannak, a T2 adatelemző központok pedig gyakorlatilag minden résztvevő országban. A Wigner FK T2 központjában pillanatnyilag 600 processzor és 250 TB-nyi tároló működik, hatékonysága évek óta az első helyeken található a CMS 55 T2 központja között.

Az LHC tehát áprilisban újra elindult, 2016-os működési terve, amelyet eddig bámulatossággal sikerült tartania, a 15. ábrán látható. Májustól novemberig proton+proton ütközéseket tanulmányoz, utána karácsonyig proton+ólom ütközéseket fog. Általában havonta egyszer egy-egy hétre leáll az adatgyűjtés, és a rendszert fejlesztik. Ezek a fejlesztési időszakok rendkívül fontosak, nemcsak a gyorsítós mérnököknek, hanem a kísérletező fizikusoknak is, olyankor ugyanis gyakran kiderülnek működési rendellenességek és azokat a fejlesztéssel párhuzamosan kijavítják, és utánuk a komplexum megbízhatóbban és hatékonyabban működik.

AZ ATOMERŐMŰVEK MŰKÖDÉSÉRŐL EGYSZERŰEN, TÍPUSAIK ÉS JÖVŐJÜK – 2. RÉSZ

Király Márton – MTA Energiatudományi Kutatóközpont
Radnóti Katalin – ELTE TTK Fizikai Intézet

Írásunk első részében vázlatosan ismertettük az atomerőművek működésének fizikai alapjait. Ebben a részben a termikus reaktorok különböző típusairól adunk áttekintést.

Az atomerőművek „generációi”

Az atomerőművekben is – több erőműhöz hasonlóan – úgy állítják elő az elektromos energiát, hogy a fel szabaduló termikus energiát gőzfejlesztésre fordítják, a gőz megforgatja a turbinákat, majd ezt a mechanikai energiát egy generátor segítségével, az elektromágneses indukciót alkalmazva elektromos energiává alakítják.

Az elektromosenergia-termelés alapelve sok erőmű esetében azonos, az erőművek közötti különbség csupán annyi, hogy a folyamathoz szükséges hőt hogyan állítjuk elő.¹

Egy atomerőmű esetén az atomreaktorban lejátszódó maghasadás az elsődleges energiaátalakulás, a termikus energia a magenergiából származik. Az atomenergia helyett célszerűbb a nukleáris energia kifejezés használata, hiszen a folyamatban nem az atom elektronszerkezetének átrendezéséről van szó, mint a kémiai reakciók esetében, hanem az atommagban történnek a változások. Ez milliószor nagyobb energiaváltozást jelent egy szokványos kémiai reakcióban felszabaduló energiához képest.

Különböző szempontok, elsősorban koruk, biztonságos és gazdaságos üzemeltetési lehetőségeik alapján az atomerőműveket a kétezres évektől kezdődően úgynevezett generációkba sorolják. Ezek között nincsenek egyértelmű határvonalak, csak átmeneteket jelentenek az atomerőművek építésének egyes szakamai között [12].

Első generációs atomerőművek közé tartoznak az első erőművek, amelyeket az ötvenes és hatvanas években, illetve a hetvenes évek elején helyeztek üzembe. Ezek a jelenleginél kevésbé szigorú biztonsági előírások figyelembevételével épültek, részben kutatási céllal, és ma már jórészt nem üzemelnek.

A második generációs atomerőművek alkotják a ma üzemelő atomerőművek döntő többségét. Ezek a hetvenes és a kétezres évek között épültek, és már



Király Márton a BME-n végzett vegyészmérnökként. Munkahelye az MTA Energiatudományi Kutatóközpont, Fűtőelem és Reaktoranyagok Laboratórium. Kutatási területe a fűtőelem-pálca-burkolatok mechanikai vizsgálata, amelyből a BME Nukleáris Technikai Intézetében készíti PhD dolgozatát. Publikációi az előbbi területen kívül kiterjednek a nukleáris energia történetére és a témával kapcsolatos ismeretterjesztésre.



Radnóti Katalin az ELTE-n végzett kémiafizika szakos tanárként. A budapesti Kölcsey Ferenc Gimnáziumban nyolc éven keresztül tanított. Jelenleg az ELTE Fizikai Intézetében főiskolai tanár. Kutatási területe a fizika és a természettudományok tanításának módszertana. Publikációs tevékenysége is e témához kapcsolódik, tanári segédletek, tanulmányok, könyvek, könyvfejezetek. A *Nukleon*, a Magyar Nukleáris Társaság internetes folyóirata főszerkesztője.

¹ A fotovoltaikus erőmű, a vízerőmű és a szél erőmű esetében „kimarad” a hővé alakulás, a villamos energiát közvetlenül állítjuk elő mechanikai energiából (víz- és szél erőmű), illetve fényenergiából (fotovoltaikus).

tervezésük során is szigorúbb biztonsági elveket alkalmaztak, például szinte mindegyiket ellátták olyan nyomásálló burkolattal (konténment), amely baleseti helyzetekben megakadályozza a radioaktív anyagok környezetbe jutását. A jelenleg üzemelő második generációs erőművek az egyre szigorodó előírások folytán több biztonságnövelő átalakításon estek át. A második generációhoz tartoznak a paksi atomerőmű blokkjai is.

A *harmadik generációs* atomerőművek jelentik a jelenleg és az elkövetkező évtizedekben épülő erőműveket. Ezek tökéletesebbek a második generáció erőműveinél, mind a gazdaságosság (üzemanyag-hasznosítás és átalakítási hatásfok), mind a biztonság (fejlett biztonságtechnika, passzív biztonsági rendszerek) tekintetében. Azonban lényegileg (működési elv, felépítés, üzemanyagciklus) nem különböznek elődeiktől, ugyanazon tervezési és üzemeltetési alapelveket követik. Ezeket hosszabb üzemidőre (60 év) tervezik, jobb üzemanyag-hasznosítást céloznak meg, szabványosítottak a tervek és hosszabbak az üzemanyagok átrakása közötti idők (18-24 hónapos ciklusidő). Bár ezekből még nem sok üzemel, de már több országban (Franciaország, Finnország, India, Kína, Oroszország) épülnek ilyen új típusú atomerőművek. A Paksra tervezett új blokkok is ebbe a kategóriába fognak tartozni.

A 2000-ben a *negyedik generációs* atomerőművek közé sorolt elképzelések a nukleáris technológiák újragondolását jelentik a hatékonyabb és biztonságosabb üzemeltetés jegyében, bár jelenleg még csak papíron vagy kísérleti erőművek formájában léteznek. Ezek között az elképzelések között nem csak termikus, hanem gyorsreaktorok is találhatók. Az alkalmazandó magas hőmérsékletű hűtőközegek nagyobb termodinamikai hatásfok elérésére és *kapcsolt energiatermelésre is alkalmassá teszik ezeket a reaktorokat*. A kapcsolt műveletek alatt általában hidrogéntermelést és széndioxid-semleges (a levegőből kivont CO₂-ot használó) üzemanyagok (metanol, dimetil-éter, metán) gyártását értjük. Ez azért is fontos, mert a megtermelt nagy mennyiségű villamos energia gazdaságosan nem tárolható, azonban az üzemanyagokat el tudjuk raktározni, és más módon (motor, üzemanyagcella) is fel tudjuk ezeket használni, és így ezek az erőművek a közlekedés energiaigényeit is ki tudnák szolgálni [13].

A neutronok lassítása

Amint azt az első rész végén leírtuk, az atomreaktorban egy maghasadás során 2-3 neutron keletkezik, több neutron kelt, mint amennyit elhasznál, láncreakció mehet végbe, vagyis az egész folyamat önfenntartó lehet. A keletkező neutronok gyorsak (néhány MeV energiájúak), a hasadás fenntartásához viszont (természetes vagy kis dúsítású urán esetén) lassú (termikus) neutronokra van szükség, ezért a maghasadás során keletkező neutronokat moderátorok segítségével le kell lassítani. A termikus atomreaktorokban a *láncreakciót termikus neutronok tartják fenn*. Mode-

rátorként (lassítóként) kis tömegszámú izotópokat tartalmazó anyagok jöhetnek szóba. Egy ütközésben ugyanis annál több energiát veszíthet a neutron, minél kisebb tömegű atommaggal ütközik. A gyakorlatban háromféle moderátoranyagot használnak: könnyűvíz (H₂O), nehézvíz (D₂O) és grafit (C).

A tömegét tekintve a könnyűvíz a leghatékonyabb moderátor, de hátránya, hogy a hidrogén kis mértékben elnyeli a termikus neutronokat. Ez éppen elég ahhoz, hogy könnyűvíz-moderátorral és természetes uránnal önfenntartó láncreakció ne jöjjön létre. Ezért a könnyűvízzel moderált reaktorokban kissé (néhány százalékban) az urán hasadó, 235-ös tömegszámú izotópjában dúsított uránt kell alkalmazni. A többi moderátor esetében a láncreakció természetes uránnal is megvalósul. A maghasadás során nagy mennyiségű hő keletkezik, amelyet az aktív zónából el kell vezetni. A termikus reaktorok hűtőközege többféle lehet. Szilárd moderátor (grafit) esetében lehet gáz (szén-dioxid vagy hélium) vagy víz, folyékony moderátor (H₂O, D₂O) esetében a hűtőközeg lehet vagy maga a moderátor, vagy egy külön hűtővízrendszer.

A termikus reaktorok üzemanyaga ma a reaktorok többségében enyhén (2-5%-ban) dúsított vagy természetes izotóp-összetételű (0,71% ²³⁵U) urán-dioxid (UO₂), amelyet általában valamilyen cirkóniumötvözetből készült burkolatcsövekben helyeznek el a reaktorban. Ezeket a rudakat fűtőlempálcáknak nevezik, e pálcákat kazettákba rendezik. Indítás előtt a minimális kritikus tömegnél (az önfenntartó láncreakcióhoz minimális szükséges uránmennyiségnél) lényegesen több hasadóanyagot tesznek a reaktorba. Pakson 42 tonna, átlagosan 4,2%-ban dúsított urán-dioxid van egyszerre jelen egy reaktorban, ennek harmadát évente új üzemanyagra cserélik.

A maghasadások útján történő energiatermelés miatt egyrészt fogy a hasadóanyag, másrészt halmozódnak a hasadási és neutronaktivációs termékek. Mindkét folyamat csökkenti a sokszorozási tényezőt.² Ezeket a folyamatokat együtt *kiégésnek* nevezzük.³ A paksi atomerőműben a kiegészi szint 28 MWnap/kg U, vagyis 2,42 TJ energia szabadul fel 1 kg uránból a reaktorban töltött ideje alatt. Ennek ellensúlyozására az *abszorbens (neutronelnyelő) anyagok mennyiségét folyamatosan csökkentik*, éppen olyan mértékben, ahogyan a kritikus állapot fenntartása megköveteli. Az üzemidő első szakaszában az oldott bórsav koncentrációját csökkentik, majd amikor az már szinte nullára csökkent, a szabályozó rudakat kezdik kifelé húzni. Amikor már így sem tudják kritikusan tartani a reaktort, akkor le kell állítani és új üzemanyagra kell cserélni a legrégebbi, kiégett kazettákat. A hasadási termékek azonban leállítást után is tovább bomlanak, hőt termelnek (remanens hő) és ezért az

² Van egy ellenkező irányú hatás is, a plutónium, mint hasadóanyag termelődése, de ez általában nem képes az előbbi két hatást ellensúlyozni.

³ Ennek a kémiai égési folyamathoz természetesen semmi köze sincs.

aktív zónát továbbra is hűteni kell, keringetni kell a primer köri hűtőközeget. A reaktor üzemét úgy tervezik, hogy két átrakás között meghatározott idő (körülbelül egy év) teljen el. Átrakáskor a töltetnek körülbelül 1/3-át cserélik ki friss üzemanyagra, a többit pedig úgy rendezik át, hogy az új töltetből az elkövetkező 1 év alatt maximális energiát lehessen kivenni. Egy-egy fűtőelemrúd tehát átlagosan 3 évet tölt a reaktorban.

A termikus reaktorok típusai

A termikus atomreaktorok között megkülönböztetjük a nyomottvizes (PWR), a forralóvizes (BWR), a nehézvizes (CANDU), valamint a grafitos vízű (RBMK) és gázű (AGR) reaktor típusokat. Ezek az atomerőmű-konstrukciók a legelterjedtebbek és ezek adják a ma működő atomreaktorok nagy részét is.

Folyadékmoderátoros reaktorok

A legtöbb atomreaktorban moderátorként *könnyűvíz*-et használnak, ezeket gyűjtőnéven könnyűvízes reaktornak (LWR = Light Water Reactor) nevezik. A vízzel moderált reaktoroknak igen nagy előnyük, hogy túlhevülés esetén a víz – ami hűtőközeg és egyben moderátor is – forni kezd, buborékok képződnek benne. Ezáltal a reaktor moderátort veszít, a neutronok pedig nem lassulnak le eléggé, hanem az uránban maghasadás nélkül befogódnak, ezért ilyenkor a láncreakció magától leáll. Ez a folyamat lehetetlenné teszi a reaktor megszabadását, ezt inherens biztonság-nak nevezik.

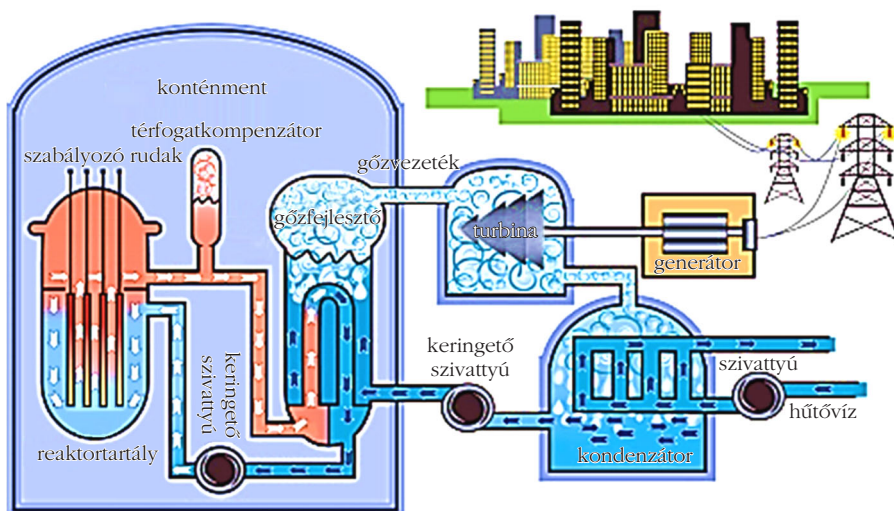
A nyomottvízes (PWR = Pressurized Water Reactor) atomreaktorok moderátora és hűtőközege könnyűvíz, üzemanyaguk alacsony, 3-4,2% dúsítású urán. Kétköri (primer és szekunder kör), azaz a reaktorban felszabadított hőt a primer körű hűtőközeg egy hőcserélőben adja át a térben elválasztott szekunder körű víznek, ahol az elforr és a turbinák meghajtásához használt gőz keletkezik. A világon ez a legelterjedtebb reaktortípus, amelyet az Egyesült Államokban és a volt Szovjetunióban, később pedig Franciaországban és Németországban is kifejlesztettek. Több ország, köztük Japán az amerikai típusok alapján gyárt (illetve gyártott) atomerőműveket. A Szovjetunióban kifejlesztett típusok egyike a Pakson működő négy reaktor, típusjele VVER-440/213 (Vodo-Vodjanoj Energeticseszkiy Reaktor, vízzel moderált, vízűtésű energetikai reaktor). Működé-

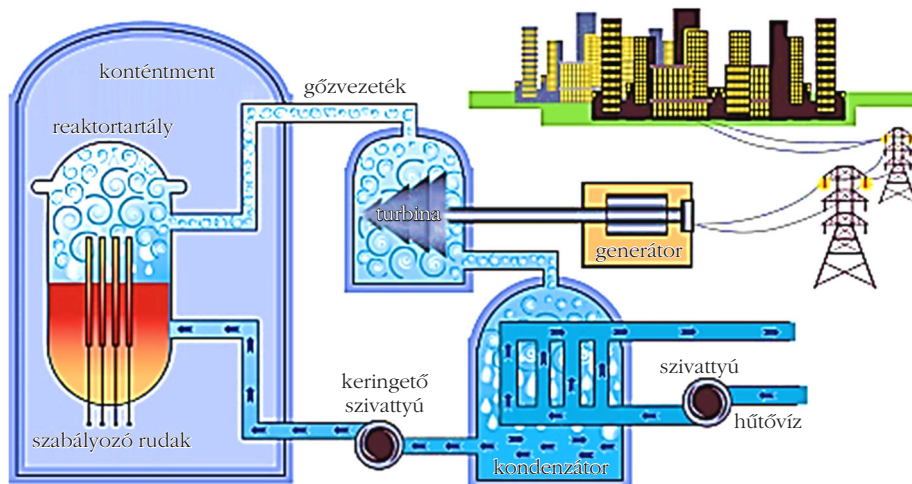
si alapelveit tekintve ebbe a típusba tartoznak a tervezés alatt álló új paksi blokkok is [3, 4, 14].

Példaként nézzük végig, milyen energiaátalakulások történnek egy nyomott vizes típusú atomerőműben, amilyen Pakson is található (5. ábra)! Az üzemanyag ebben az esetben a ^{235}U , amely két kisebb rendszámú atommagra hasad, miközben 2-3 neutron keletkezik. Egy hasadás során 32 pJ energia szabadul fel, amely milliószorosa a kémiai reakciók során felszabaduló energiáknak. De mit kell ezen az energia-felszabaduláson érteni? Hogyan jelenik ez meg? Legfőképp a hasadásványok mozgási energiájaként. A fűtőanyag kicsiny (rendszerint urán-dioxid) üzemanyag-tablettákban van jelen, amelynek részecskéi ütközni fognak a nagy mozgási energiával rendelkező hasadásványokkal és neutronokkal. Sok-sok ütközés zajlik le, míg ezek lelassulnak, amelynek során sok részecske gyorsabban fog mozogni, tehát a tablettá hőmérséklete növekszik. A fellemegetett tablettá cirkóniummal (burkolattal) és a tablettákat tartalmazó pálca vízzel van körülvéve (primer kör), ezek hőmérséklete szintén növekszik.

A primer köri vizet nagyon nagy nyomáson tartják (12,3 MPa), emiatt az még a magas üzemi hőmérsékleten (300-330 °C) sem forr fel. A primer kör nagy nyomásáról kapta ez a típus a nevét. A primer köri víz a gőzfejlesztő csőveiben futva átadja hőjét a szekunder kör vizének, visszahűl, majd egy szivattyúval keringetve visszajut a reaktorba. A szekunder körben levő víz nyomása (4,3 MPa) sokkal alacsonyabb, mint a primer körben lévőé, emiatt a gőzfejlesztőben a felmelegedett víz el tud forrni. Innen kerül (cseppleválasztás után) a gőz a nagynyomású, majd onnan a kisnyomású turbinára. A turbina megforgatja a generátort, az pedig villamos áramot termel. A turbinából kilépő gőz a kondenzátorban (a Duna vizét melegítve) lecsapódik, onnan egy szivattyú az előmelegítőbe, majd újra a gőzfejlesztőbe nyomja. Mind a primer, mind a szekunder köri víz zárt rendszerben mozog, nem keveredik egymással és nem érintkezik a kör-

5. *ábra.* Egy nyomottvizes atomerőmű szerkezete. Forrás: <http://www.nap.edu/openbook/18294/xhtml/images/p-54.jpg>





6. ábra. Egy forralóvízes atomerőmű szerkezete. Forrás: <http://www.nap.edu/openbook/18294/xhtml/images/p-54.jpg>

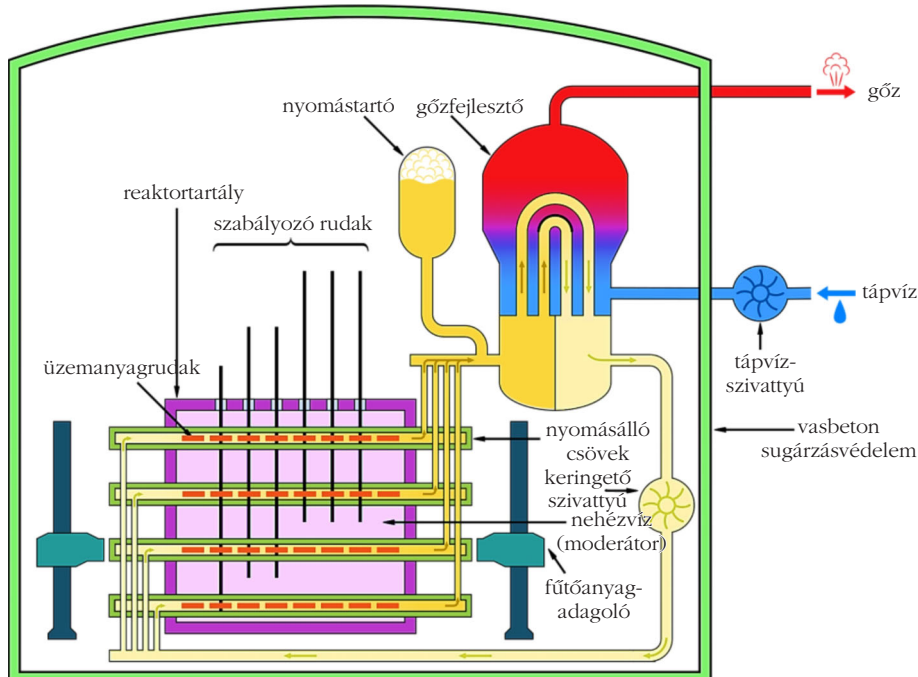
nyezettel. Így elérhető, hogy a hűtőközegbe kerül radioaktív anyagok a primer körben maradjanak, és ne kerülhessenek a turbinába és a kondenzátorba, vagy adott esetben a környezetbe.

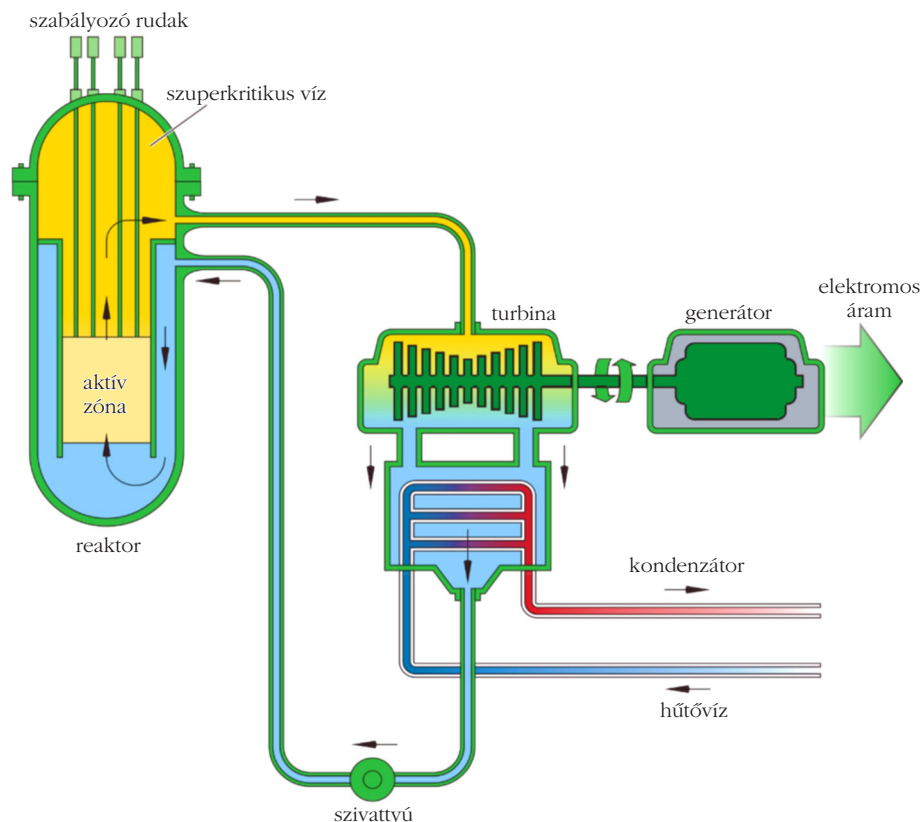
A *forralóvízes* (BWR = Boiling Water Reactor) atomreaktorok egykörűek, az aktív zónán való áthaladás közben a hűtőközeg (könnyűvíz) 10-20%-a elforr, azt leválasztják, majd a telített gőzt közvetlenül a turbinába vezetik. Hátrányuk, hogy a turbinára is az enyhén radioaktív hűtőközeg kerül, és a szennyezések miatt az is enyhén radioaktívvá válik. Érdekes a szabályozó rudak mozgása. Míg a többi reaktortípus esetében ezek a zónában lefelé esve állítják meg a láncreakciót, addig ennél a típusnál a reaktor leállításához a rudakat lentől felfelé kell nyomni (6. ábra). Ilyen reaktorok

ban, hanem egyesével felnyitható, nyomásálló csövekben helyezkedik. Ezek a csövek egy nagy tartályon, úgynevezett kalandrián haladnak keresztül, amely tele van nehézvízzel. Ezzel szemben a könnyűvízes reaktorokat átrakáskor le kell állítani, hogy megszüntethessék a túlnyomást és leemelhessék a reaktor fedelét, ezáltal évente 3-4 hét üzemidő mindenképpen kiesik. A típus eddig egyetlen megvalósítását a kanadai CANDU (CANadian Deuterium Uranium) reaktorok jelentik. Ilyen reaktortípusok működnek Kanadában, Romániában, Indiában és Pakisztánban (7. ábra).

A legújabb vízű hűtésű reaktortípus a *szuperkritikus vízű hűtésű reaktor* (SCWR), ami a negyedik generációs elképzelések közé tartozik, amelyek a jövő új atomreaktor-fajtáit jelentik. Ezek a reaktorok még csak a tervezőasztalon léteznek, de az elkövetkező évtizedekben fontos szerep juthat nekik a nukleáris energiatermelésben. E típus kritikus pontja a 374 °C, 22 MPa felett tartott könnyűvíz, amely egyben moderátor és hűtőközeg. A könnyűvíz magas hőmérséklete és jobb hővezetése miatt nagyobb átalakítási hatásfok érhető el, a jelenlegi 35% helyett akár 45%. A forralóvízes típushoz hasonlóan ez is egykörű, vagyis a hűtővíz egyből a turbinára kerül (8. ábra). A szuperkritikus víz sűrűsége kisebb a folyékony vízénél, így kevésbé moderál, viszont nő a reaktor egységtemperaturája, továbbá a radioaktív hulladékok jobb hasznosítását és a tenyésztést teszi lehetővé. Mivel a cirkónium ilyen környezetben korrodálódna, ezért rozsdamentes acél üzemanyag-

7. ábra. A nehézvízes CANDU típusú reaktor vázlata. Forrás: <http://www.mvmpaks2.hu/hu/Atomenergia/AtomeromuTipusok/PublishingImages/4.%C3%A1bra.png>





A grafitos reaktorok szovjet változata az *RBMK* (Reaktor Bolsoj Mozsnoztj Kipjascsj, nagyteljesítményű vízforraló csatornarendszerű reaktor) típus (9. ábra). Ezek a reaktorok „másfél” körök, működésüket tekintve a forraló-vizes típushoz hasonlítanak, a hűtőközeg könnyűvíz. Az RBMK-1000-es egy hatalmas szerkezet, amely 1700 darab függőleges grafitoszlopból áll, ezek összesen 2500 tonna grafitot tartalmaznak. A grafitoszlopokban fűtőelem-csatornák vannak, ezekben helyezkednek el a hengeres üzemanyag-kazetták.

A reaktorban összesen 180 tonna urán-dioxid van, amelynek ^{235}U tartalma 1,8%. A hűtővíz számára csatorna vezet végig minden grafitoszlopon. A víz 6,5 MPa nyomás alatt van, ennek hatására forráspontja 280 °C-ra emelkedik. Mintegy harmada a reaktorban elforr, a gőz egy gőzdobban elválik a folyadéktól és

8. ábra. A szuperkritikus vízhűtésű reaktor vázlata. Forrás: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/59/Supercritical-Water-Cooled_Reactor.svg

burkolatra van szükség, amelynek neutronelnyelése miatt nagyobb dúsítású üzemanyagot kell alkalmazni. A terveknek magyar vonatkozása is van, a fűtőelemek csomkjainak áramlási jellemzőit a BME Nukleáris Technika Intézetében modellezték [16].

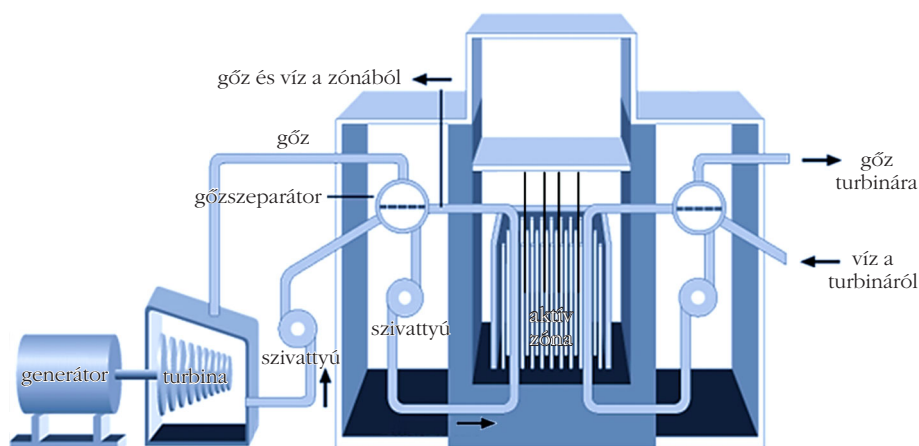
Szilárd moderátoros reaktorok

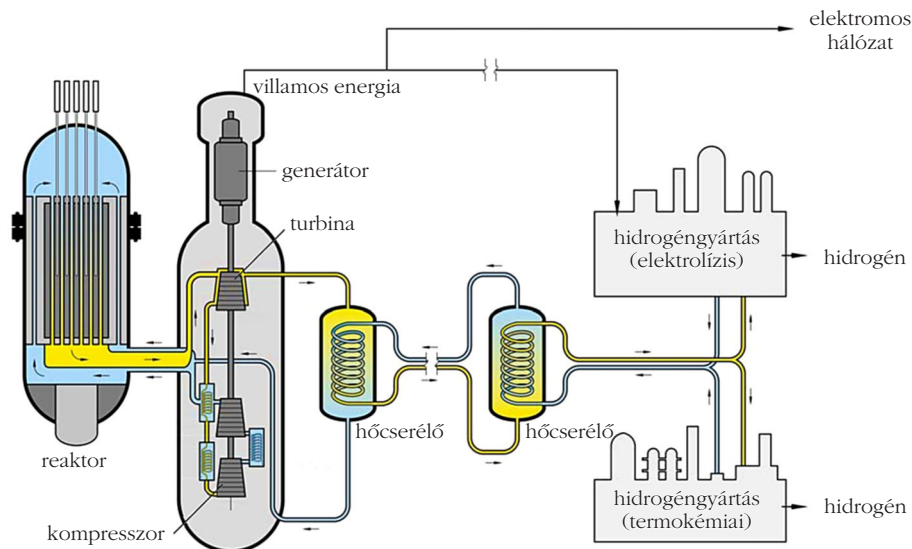
Grafitmoderátort használó atomreaktorokat – elsősorban az atomfegyverekhez szükséges plutónium termelésére, majd később villamos energia előállítására – az Egyesült Államok, Franciaország, Nagy-Britannia és a Szovjetunió is kifejlesztett. A hűtőközeg szén-dioxid (CO_2), hélium vagy könnyűvíz lehet, bár kezdetben lég-hűtést is alkalmaztak. A gáz-hűtés alkalmazása egyre jobban visszaszorul, Angliában még üzemelnek ilyen erőművek (AGR = Advanced Gas-cooled Reactor), de új reaktorok építését nem tervezik. A grafitos reaktorok előnye, hogy természetes uránnal is működtethetők, a gazdaságos üzemvitelhez szükséges műszaki paraméterek azonban csak enyhén (1,5-2%) dúsított uránnal biztosíthatók.

két hatalmas gőzturbinát hajt meg, amelyek 1000 MW elektromos teljesítményt generálnak.

Az RBMK típusú reaktorokat 1986 óta csernobili típusnak is nevezik, mivel egy ilyen típusú blokk szenvedett súlyos balesetet. RBMK reaktorok csak Oroszországban, Ukrajnában és Litvániában működtek. Hátrányuk, hogy túlhevülés esetén a neutronelnyelő hűtővíz elforrhat, a grafitmoderátor viszont visszamarad, így a láncreakció tovább folyhat, ami a reaktor megszaladásához vezethet. Mivel e típusnak nincs meg a láncreakció megszaladása esetén az önleállító képessége, ezért ez a típus inherensen nem biztonságos.

9. ábra. Az RBMK-típusú reaktor felépítése. Forrás: <http://www.globalsecurity.org/wmd/world/russia/images/rbm-k-design.gif>





Ugyanakkor ez jelentős akadályt jelent a felhasználható anyagok tekintetében, a pálcaburkolatokkal szemben a TRISO üzemanyag-borítása képes elviselni ilyen magas hőmérsékletet is. Régebben Németországban épültek ehhez hasonló reaktorok és a Dél-Afrikai Köztársaság érdeklődött iránta, jelenleg Oroszország és Kína fejleszti.

Jelen írásunkban a termikus reaktorok működését és legfontosabb típusait ismertettük. A következő, befejező részben a tenyésztőreaktorok működését és legfontosabb típusait mutatjuk be.

10. ábra. A nagyon magas hőmérsékletű reaktor felépítése. Forrás: http://www.tuumaenergia.ee/fileadmin/user_upload/pics/VHTR_large.png

A negyedik generációs tervek között szerepel a *nagyon magas hőmérsékletű reaktor* (VHTR = Very High Temperature Reactor) is, egy grafitmoderátoros héliumhűtésű reaktor. Üzemanyaga állhat hagyományos kazettákból (10. ábra), vagy úgynevezett TRISO gömbökből, amelyek urán- és tórium-dioxid vagy -karbid golyókat tartalmaznak, pirolitikus szénrel és szilíciumkarbiddal több rétegben körülvéve. Ezt az elképzelést több golyós reaktor is alkalmazta már, azokban a gömbök a reaktor aktív zónáján lassan áthaladva „kiégnek” és távozva feldolgozhatók. A nagyon magas hőmérséklet 1000 °C-ot jelent, amely ideális a termokémiai hidrogéngyártáshoz, ami a reaktor egyik fő célkitűzése [17].

Irodalom

- Vidovszky István: A jövő atomerőművei. *Fizikai Szemle* 55/4 (2005) 118–122, <http://www.fizikaiszemle.hu/archivum/fsz0504/VidovszkyI.pdf>
- <http://www.world-nuclear.org/info/inf02.html>
- Csom Gyula: *Atomerőművek üzemtana, II/1–2*. Műegyetemi kiadó, Budapest, 2005.
- Papp Sándor: Milyen erőművet építsünk? Atomerőmű létesítési ajánlatok. *Fizikai Szemle* 42/4 (1992) 144, <http://fizikaiszemle.hu/archivum/fsz9204/papp9204.html>
- Kiss Attila, Vágó Tamás, Aszódi Attila: Az SCWR-FQT tesztszakasz be- és kilépő részének CFD analízise. *Nukleon VII* (2014) 169, http://nuklearis.hu/sites/default/files/nukleon/7_3_169_KissA.pdf
- A IV. generációs atomerőművek fóruma (GIF): https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_59461/generation-iv-systems

Ez is a Kanári-szigetek!

Nézzed meg!
Töltsd le!
Mutasd meg másoknak!
Tanítsd meg diákjaidnak!

VAN ÚJ A FÖLD FELETT

Keresd a fizikaiszemle.hu mellékletek menüpontjában!



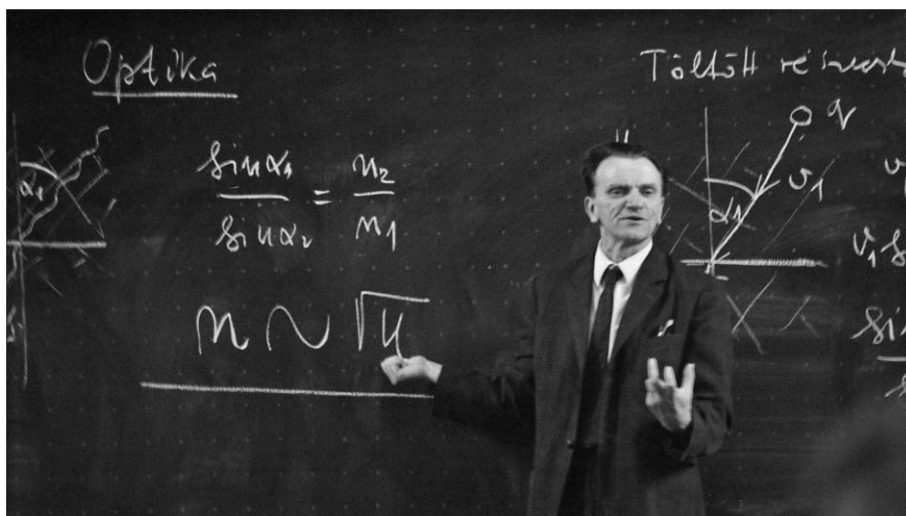
CENTENÁRIUMI MEGEMLÉKEZÉSEK 2016 – 4. RÉSZ

Jogot is végzett mérnök, mérnökből lett atomfizikus,
fizikusból lett tudós tanár – Simonyi Károly

Radnai Gyula
ELTE Fizikai Intézet

„A nómenklatúrával kapcsolatban még meg kell emlétenünk, hogy a gerjesztés szót két értelemben is használtuk az eddigiekben: egy mikrorendszer magasabb energiaállapotba való hozása, illetve a külső tér hatása a magasabb szinten levő mikrorendszerre, amely hatás emisszióval jár. A gerjesztett abszorpció, illetve gerjesztett emisszió már egyértelműen, és a két folyamat hasonló jellege miatt, elvben helyesen jelölik meg a jelenségeket. A gyakorlatban sokszor célszerű a gerjesztés szót a magasabb szintre való hozás (tehát a szivattyúzás) megjelölésére fenntartani, a gerjesztett emissziót pedig indukált emisszióknak nevezni.”

A fenti sorok *Simonyi Károly* 1965-ben megjelent *Elektronfizika* című könyvében, a *Kvantumelektronika* rész bevezetésében olvashatók. Közvetlenül ezt megelőzően a Cserenkov-sugárzásról volt szó, az utána következő Kvantumelektronika rész pedig három nagy fejezetre tagolódik: *A spontán és indukált emisszió*, a *Különböző MASER-típusok* és a *Lézertípusok* követik egymást. Csupa Nobel-díjas téma. Érdemes felfigyelni arra, hogy a könyvet Simonyi Károly 1964-ben fejezte be, s a könyvben tárgyalt kvantumelektronikai kutatásokért *Prohorov*, *Bászov* és *Townes* az év decemberében kaptak Nobel-díjat! Egy-egy fejezetben belül is teljesen átgondolt és világos a könyv szerkezete, nagyban megkönnyíti az olvasó tájékozódását az adott témában. Simonyi Károly nem elégszik meg az-
al, hogy a maga számára tisztázza a dolgokat, leg-



alább ilyen fontosnak tartja, hogy a minden részletében megértett témát úgy adja tovább, hogy az az olvasó számára is világos és érthető legyen. Érthető és nem félreérthető! Ezért fontosak a szavak, amelyek az új fogalmakat jelölik, és ezért fontos, hogy a mondatok egyértelműek legyenek. Azt a szakembert nevezhetjük eötvösi értelemben tudós tanárnak, aki ezeket a követelményeket saját gyakorlatában meg tudja valósítani.

Ha valakire, akkor Simonyi Károlyra ezért is illik a „tudós tanár” meghatározás.

Az alábbiakban áttekintjük Simonyi Károly életpályáját. Ki tudna erről autentikusabban nyilatkozni, mint maga Simonyi Károly? Többször is fogjuk idézni szavait, még pedig *Staar Gyula De mi az igazság...* című interjúkötetéből, amely 1979 és 1996 között lezajlott hat beszélgetést tartalmaz. Ahol tehát a következőkben idézőjelet látunk, ott mindig ebből a könyvből vett Simonyi-idézet következik. Íme az első:

„Sopron vármegyében, Egyházasközluban, szegény-paraszt, földműves családba születtem hetedik gyermekként, 1916-ban. Már nem ismertem édesapámat, aki fiatalon, születésem előtt meghalt. Édesanyám másodszor is férjhez ment, mert egészen természetes, hogy hét gyermekkel nem lehetett özvegyen maradni. Csodálatos második házassága volt, az utánam született három testvérem pontosan beleillett a családba, a mai napig édestestvérként szeretjük egymást... Édesanyám egészen jól beszélt németül, ami ugyan nem volt meglepő, mivel a Fertő-tó körül a történelmi Ma-



Radnai Gyula ny. egyetemi docens, a fizikai tudományok kandidátusa, matematika-fizika tanári szakon végzett 1962-ben. Az ELTE Kísérleti Fizika tanszékén kapcsolódott be a tanárképzésbe, a fizika hazai kultúrtörténetének kutatásába pedig *Simonyi Károly* ösztönzésére fogott a '70-es években. *Physics in Budapest* című – *Kunfalvi Rezső*vel közös – könyve, valamint a *Fizikai Szemlében* és a *Természet Világában* megjelent számos, ma már az interneten is elérhető publikációja hitelesíti ezt a tevékenységét.



Simonyi Károly és Ernő nevelőszüleikkel, Mayer Miksával és Simonyi-Semadam Erzsébettel.

A nevelőapja, Mayer Miksa Ganz-gyári mérnök volt, annak idején ő is a *Lapok* szorgalmas megoldója, aki még országos versenyeken is ért el jó helyezést. Ő hívta fel a fiúk figyelmét a *Lapokra*, majd néhány év múlva ő beszélt le Károlyt arról, hogy matematika-fizika tanári szakra jelentkezzen az egyetemre, mivel „A középiskolai tanár eljegyzí magát a szegénységgel”. Helyette a Műegyetemet ajánlotta: „Mérnökként akármi lehetsz – mondta.”

Nevelőapja tanácsát részben meg is fogadta, azonban egyszerre két egyetemre iratkozott be: a budapesti Mű-

gyarországon több német anyanyelvű falu is volt, s akkori szokás szerint cseregyerekként rövid időt más családnál töltött. Így sajátította el a német nyelvet, bár az iskolában soha nem tanulta. Édesapám sem volt mindennapi ember. Korai halála után még sokáig meséltek legendákat okosságáról, reformtörekvéseiről...”

Tízéves koráig a falu két tanterme, római katolikus népiskolájába járt, ahol felfigyelt rá a helybéli plébános, és felkutatta a család távoli rokonát, a keleti nyelvekkel foglalkozó *Simonyi-Semadam Sándor* budapesti ügyvédet, aki rövid ideig még az ország miniszterelnöke is volt. Az ő révén kezdhette meg azután gimnáziumi tanulmányait az óbudai Árpádvezér Reál-gimnáziumban. Itt már felismerték matematikában és a nyelvtanulásban mutatkozó tehetségét. Ami a nyelveket illeti, az iskolában tanult latin, német és angol mellett magánúton tanult franciául, sőt még szerbül és oroszul is elkezdett tanulni.

Matematikai és fizikai érdeklődését ilyen témájú könyvek (*Beke Manó: Bevezetés a differenciál- és integrálszámításba*, *Mikola Sándor: A fizikai megismerés alapjai*, *Strasser V. Benő: Középiskolás fizika*) olvasásával, valamint kezdetben a *Faragó Andor* szerkesztette *Középiskolai Matematikai és Fizikai Lapok* feladatainak megoldásával igyekezett kielégíteni. A *Lapok* 1931. szeptemberi számában szerepelnek az előző, 1930/31-es tanév legjobb megoldóinak fényképei, itt látható a VI. osztályos *Semadam Károly* és *Semadam Ernő* fotója. Ernő a bátyja volt, de mindkettőjüket Simonyi-Semadam Sándor lánya és annak férje, *Mayer Miksa* nevelte Budapesten. Ők lettek a Semadam-fiúk nevelőszülei. A Semadam vezetéknév mindketten megtartották egészen VIII. osztályos korukig, csak az 1933/34-es tanévben, érettségi évükben vették fel a Simonyi vezetéknévét. Ez a névmagyarosítás általános irányzat volt ebben az időben, *Klebsberg Kunó* halála után, *Gömbs Gyula* miniszterelnöksége idején. Az 59 diák közül, akik 1934-ben érettségiztek az Árpádban, 13-an magyarosítottak az utolsó tanévben. Még az igazgató is megváltoztatta nevét *Gajda Béláról Gáldy Bélára*...

egyetem Gépészeti Karára, és a pécsi Tudományegyetem Jog- és Államtudományi Karára. Ez utóbbira azután a bátyjával együtt járt. Mindkettőt elvégezte, és végül államtudományi doktorátust szerzett. Bent maradt a Műegyetemen, a Villamos Gépek és Mérések tanszékén, majd 1942-ben átment kedvenc egyetemi professzora, *Bay Zoltán* tanszékére, Magyarország első Atomfizika tanszékére. Bay Zoltán akkor az Egyesült Izzó kutatólaborjának is vezetője volt, érthető módon őt jelölte ki a Honvédelmi Minisztérium a hazai (titkosított) radarkutatás megszervezésére és irányítására. Akit Bay Zoltán beválasztott ebbe a titkos csoportba, katonai felmentést kapott. A huszonéves Simonyi Károly lett az elméleti kutató a csoportban. Teljesen magukra voltak utalva, hiába mentek ki Németországba tanulmányozni a német radarkutatást – az ellenséges országok szóba se jöhettek – a németek is elzárkóztak attól, hogy megosszák tudományos eredményeiket a magyar kutatókkal.

„A háború vége felé beöltöztettek minket is, egy páncéljávító műhellyel vonultunk vissza, ahogy a front haladt. Csehszlovákia területén estünk amerikai hadifogságba... Az amerikaiak azután átadtak bennünket a szövetségesüknek, akik vagonokba tereltek. Elindultunk a Szovjetunió felé... Nagyon lefogytam. Negyven kilom és a látványos bordaműtétből származó sebhelyem segített. A halni készülők közé raktak, hazaküldtek. Rövid idő múlva Németországban találunk magunkat, az Odera menti Frankfurtban. Itt volt egy úgynevezett »átjártzó« tábora a hadifoglyoknak... Sok, otthonról menekült civil is volt ott családtagjaikkal. Itt ismerkedtem meg egy budapesti lánnyal... Az a lány ma a feleségem.”

A háború után, hazatérve a hadifogságból, visszament az Atomfizika tanszékre és újra rátalált a Bay Zoltán-csoportra. A csoport élve maradt tagjai tudományos kísérletre készültek az Egyesült Izzó nagyrészt kiürített és fűtetlen laboratóriumában: megrázni a Holdat, észlelni az onnan visszaverődő, a zajnál több nagyságrenddel gyengébb jeleket! Ma már jól

ismert tény, hogy az amerikaiak után nem sokkal, a világon másodikként jelentette be Bay Zoltán a magyarországi sikeres kísérletet.

1947-ben Bay Zoltán izgalmas körülmények között emigrált az országból, miután elkészítette és átadta egy központi fizikai kutatóintézet tervét az illetékes párt-embereknek. A Műegyetemen Simonyi folytatta Bay elméleti villamosságtan előadását, közben pályázott az akkor a Műegyetemhez tartozó soproni kar Elektrotechnikai tanszékére. Kinevezése után Sopronban megépítette Van de Graaff rendszerű gyorsítóját, amellyel elvégezte Magyarország első mesterséges atommag-átalakítását: 700 kV-os feszültséggel gyorsított protonokkal bombáztak lítiumot, amely héliummá és berilliummá alakult át. Családi örömök is érték: 1948-ban megszületett *Károly*, 1951-ben pedig *Tamás* fia.

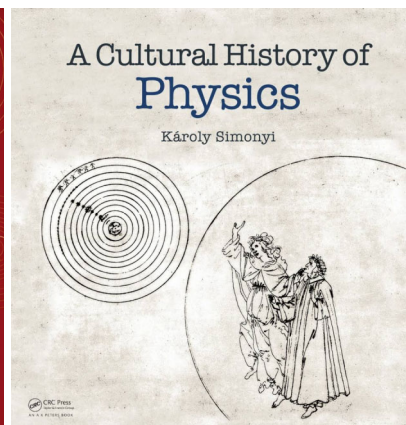
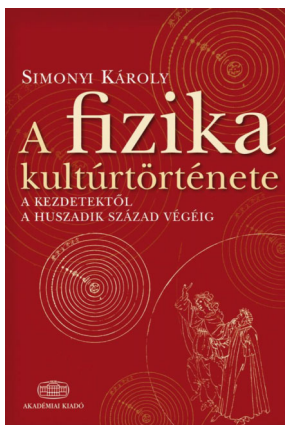
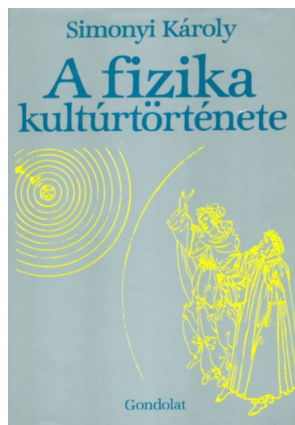
1952-ben Kossuth-díjat kapott, és rövidített eljárás keretében elnyerte a fizikai tudományok kandidátusa fokozatot. Ekkor már újra Budapesten volt: a Műegyetem 1951-ben alapított Elméleti Villamosságtan tanszékének vezetőjeként. Megfeszített munkával, hihetetlen iramban dolgozva elkészítette a több száz oldalas *Elméleti villamosságtan* egyetemi tankönyvet. Ez is 1952-ben jelent meg először, azóta már többször, több nyelven kiadták. 1952-től a műegyetemi tanszék-vezetés mellett még az akkoriban kiépülő KFKI Atomfizika osztályának vezetését is elvállalta – felállásban.

Sztálin 1953-ban bekövetkezett váratlan halála megingatta az addig stabilnak látszó politikai rendszert. „A Szovjetunió, hogy nyitási szándékait ezzel is bizonyítsa, 1955-ben a világ előtt feltárta az atomenergia békés felhasználása terén elért eredményeit. Megnyitotta kutatóintézeteit, laboratóriumait. Több külföldi delegáció látogatott oda atomreaktor, kísérleti reaktor vásárlásának szándékával. Mentünk mi magyarok is. A delegációnk fizikus tagjai voltak *Jánossy Lajos*, *Pál Lénárd*, jómagam és velünk jött egy miniszterhelyettes. Mindenhová elvittek, mindent megmutattak, Moszkva, Leningrád, Kijev, Harkov legnevezetesebb kutatóintézeteit láthattuk, tervrajzokat tanulmányozhattunk, közvetlen közelről vizsgálhattuk, megtapogathattuk a kísérleti reaktort, turbinát, mindent. Nagy élmény volt.” Talán ez a nagy élmény volt az oka, hogy Simonyi Károly túlságosan is bízni kezdett a dolgok jobbra fordulásában és lelkiismeretére hall-



gatva még ugyanebben az évben visszautasította, hogy részt vegyen egy álságos „békekonferencián”. Így emlékezett erre sok évvel később: „Amikor 1955-ben hat hét távollét után Genfből hazajöttünk, a repülőtéren lelkesen várt rám a család, feleségem, gyerekeim... és az Akadémia pártmegbízottja. Kezében az új útlevél, vízummal, repülőjeggyel, mely egy másnapi járatra szólt. Közölte velem, engem küldenek Helsinki-be a békekonferenciára, melynek *Joliot-Curie* az elnöke, *Simone de Beauvoir* az egyik alelnöke... Az Akadémia pártemberével nagyon határozott voltam. Kategorikusan megmondtam neki, hogy erre a békekonferenciára én bizony nem megyek el... Attól kezdve éreztem, hogy megtűrt ellenzéki lettem...”

1956. október 23-án óriási többséggel megválasztották a KFKI forradalmi bizottsága elnökének. „Hittem abban, hogy tekintélyemmel, tudásommal képes leszek megvédeni az Intézetet, az értékeket, mindenféle kilengéssel szemben. Jánossyval is beszélünk erről, biztosítottam, abban a pillanatban, amint itt rend lesz, az én szerepem megszűnik, és újból övé a kormánybot.” Hiába. A forradalom bukása után arra kérték, önként mondjon le az Intézet igazgatóhelyettesi tisztéről. „1957-ben megindult ellenem a harc. Rá kellett jönnöm, ilyen körülmények között képtelen vagyok dolgozni, vezetni... 1957. december 31-én végleg becsuktam magam mögött az ajtót a KFKI-ban.” Soha többé nem lépett be a KFKI ajtaján. „A



KFKI-ból azzal a tudattal távoztam, hogy a Műegyetem Elméleti Villamosságtan tanszékének vezetői állása biztos háttér számomra. Rá kellett döbbernem, inog alattam az is... 1970. december 31-én az Elméleti Villamosságtan tanszék ajtajáról lecsavaroztam a névtáblámat, és annak hangsúlyozására, hogy a folyamatot irreverzibilisnek tartom, az üveglapot leejtettem a kőre...”

Pedig a 60-as években igazán sokat dolgozott az egyetem érdekében. Igyekezett mindig a legújabb információkkal bővíteni az újra és újra kiadott *Villamosságtan* és *Elméleti villamosságtan* köteteket és megírta e könyvsorozat harmadik kötetét, a szintén az ő egyetemi előadásaihoz kapcsolódó *Elektronfizika* tankönyvet. Figyelemmel kísérte tanszéke munkatársainak szakmai fejlődését, segítette előre jutásukat. Velük közösen írta meg a negyedik tankönyvet, az *Elméleti villamosságtan példatárát*. Vállalta a legnehezebb fejezet, az *Általános bálózatanalízis* elkészítését több mint 200 oldalon, és szerkesztette az egész, több mint 75 ívnyi kiadványt. Miközben ez készült, Károly fia harmadikos gimnazista korában miniszteri engedéllyel leérettségizett, majd programozói, programtervezői állást vállalt egy dániai vállalatnál. Dániából azonban nem hazajött, hanem az Egyesült Államokba távozott, kockáztatva azt is, hogy újabb politikai támadásoknak teszi ki ezzel édesapját.

A tanszékvezetésről történt lemondása után, az 1971/72-es tanévben engedélyt kapott arra, hogy Nyugat-Németországban, Braunschweig műszaki egyetemén lehessen meghívott előadó. (Talán tehetséges fia visszacsábításában, hazahozatalában reménykedtek az engedélyt megadó funkcionáriusok, vagy abban bíztak, hogy a professzor is kint marad, s ez visszamenőleg igazolhatja gyanújukat, megalapozatlan ellenszenvüket.) Mondanunk se kell, hamarosan ott is az ő előadásai lettek a legnépszerűbbek a német mérnökhallgatók között. Utána természetesen hazajött. Fia, a későbbi Charles, pedig természetesen kint maradt. Magyarország vonzása nem egyenlően hatott apára és fiára. „Hit, meggyőződés, erős érzelmi kötődés kellett ahhoz, hogy itt maradjak. Ez a meggyőződésem azonban soha nem volt annyira erős,

hogy másokat erőszakkal rávegyek az itthon maradásra. Még a fiamat se. Ő a tehetségével és az ahhoz mért igényeivel idehaza csak boldogtalan lehetett volna. Ugyanakkor meggyőződésem, hogy az én speciális képességeimet sehol másutt nem tudtam volna így kibontani, mint Magyarországon.”

1973 és 1978 között a minisztériumi Országos Fizika Felvételi Bizottság elnöke volt.

1975-ben és 1976-ban az ELTE-n tartotta meg *A fizika kultúrtörténete* című egyetemi kollokviumot, amelyből országos sikerű könyve született. A könyv azóta német és angol kiadásban is megjelent.

1985-ben Állami Díjban részesült e könyv megírásért.

A rendszerváltozás után egymást követték az addig elmaradt szakmai elismerések, díjak, jutalmak:

1991-ben *Teller Edével* egyidejűleg lett a Budapesti Műszaki Egyetem díszdoktora.

1993-ban levelező, majd 1994-ben rendes tagja lett a Magyar Tudományos Akadémiának.

1998-ban Magyar Örökség díjban, 2000-ben Akadémiai Aranyéremben részesült.

2001-ben hunyt el Budapesten, családjá körében.

Ha össze kellene foglalni személyiségének három legfontosabb oldalát, amelyet a címben is kifejeztünk, ismét öt idézhetjük.

A jogász: „Nyelvgyakorlás céljából elolvastam az emberi jogok deklarációját angolul, németül, oroszul, kínaiul, arabul, minden nyelven közzétéve. Milyen meglepő! Sehol egy szó sincs benne az emberi kötelességről. Pedig, nincs emberi jog emberi kötelesség nélkül! A személyiségjognak, az emberi jognak iker-testvére a kötelességtudat... Én az Emberi Jogok Chartájához mellékelném az Emberi Kötelességek Chartáját (Human Rights – Human Duties)... Magamnak is, másoknak is ezt, a kötelességteljesítés által nagyon határozottan körülírt egyéni szabadságot igénylem...”

A fizikus: Simonyi Károly: Az atomenergia hasznosításának lehetősége. *KFKI Közlemények* 4/1 (1956) 83. Simonyi Károly: Egy fúziós reaktor vázlata. *KFKI Közlemények* 5 (1957) 99. 1957 után már nem dolgozott a KFKI-ban, nem volt lehetősége tovább kutatni ezt a témát. Ide illik azonban a *Fizikai Szemlében* tanítványával, Pócs Lajossal közösen jegyzett cikkük az 1957/2–3. számban: *A szabályozható fúziós energiatermelés megvalósításának lehetőségéről*. Ez volt az egyetlen cikk, amelyet Simonyi közölt a *Fizikai Szemlében*.

A tanár: „Amikor az ember visszatekint életére, és azt vizsgálja, miben volt sikere, miben nem, akkor csak a vágyaihoz mérhet... És ha most visszatekintek, azt mondhatom, mint tudós kudarcot vallottam, e téren vágyaimat távolról sem értem el. Ellenben a pedagógiában nem álmodtam ilyen eredménnyről. Azért merek így fogalmazni, hogy lássák, az előző megállapítást nem álszerénység mondatta velem. Eredményeim nagyon eltolódtak a pedagógia javára... A fizika kultúrtörténete... betetőzése pedagógiai munkámnak.”



A TALAJRÓL KÖSZÖRÜLVE VISSZAPATTANÓ LABDA MECHANIKÁJA – 2. RÉSZ

A visszapattanási módok tornatermi előállítás és filmdokumentációja

Nagy-Czirok Lászlóné Kiszi Magdolna, Gudmon Olivér, Nagy Norbert
Kiskunhalasi Fazekas Mihály Általános Iskola
Szferle Tamás, Horváth Gábor
ELTE, Biológiai Fizika Tanszék

Cikksorozatunk első részében – Fizikai Szemle 66/10 (2016) 340–346. – részletesen tárgyaltuk a talajról köszörülve-gördülve visszapattanó, gömb alakú, pörgő labda mechanikáját. E második részben az elméletileg levezetett speciális visszapattanási irányokat állítjuk elő egy tornateremben kosár-, valamint pingponglabdákkal, és mindezt filmfelvételekkel, illetve a belőlük készült képsorozatokkal szemléltetjük. Írásunkkal – e sportmechanikai példával – a labdajátékokat kedvelő és űző diákok érdeklődését szeretnénk fölkelteni a mindenhol jelen lévő fizika iránt.



Nagy-Czirok Lászlóné Kiszi Magdolna mesterpedagógus, a Kiskunhalasi Fazekas Mihály Általános Iskola matematika-fizika szakos tanára és igazgatója. A hatásos tanulási-tanítási eljárások alkalmazása mellett azok fejlesztésével és kutatásával is foglalkozik. A tudástérképek tanulás- és gondolkodásfejlesztő módszeréről könyvet és folyóiratcikket írt. Tapasztalatait pedagógus szakvizsgát adó képzésben a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem oktatójaként is továbbadja.



Gudmon Olivér az iskola tehetségprogramjának tagja, informatika és média eszközök s eljárások alkalmazásával, kreatív ötleteivel járult hozzá az előző tanévben, 8. osztályos tanulóként a projektek sikeréhez.



Nagy Norbert 8. osztályos tanulónk volt a projekt idején, több területen tehetséggon-
dozott. A Kárpát-medencei prózafelolvasó versenyen különdíjban részesült. Az iskola Bozsik-programban részt vevő focicsapatának egyik erőssége.

Didaktikai gondolatok

Egyre nagyobb kihívást jelent az általános iskolás korú tanulók figyelmét az egzakt tudományokra, köztük a fizikára irányítani. A természettudományos nevelés mellett a gondolkodás fejlesztése is tudatos pedagógiai tervezést igényel, ahogyan az ok-okozati összefüggések keresésének és a mindennapokban észlelt jelenségek magyarázatának igénye se alakul ki minden gyermekben spontán módon. A kevésbé motivált, a fizika iránt az átlagosnál kisebb érdeklődést mutató gyerekekben is ki kell alakítani azt az attitűdöt, ami az eredményes tanuláshoz szükséges.

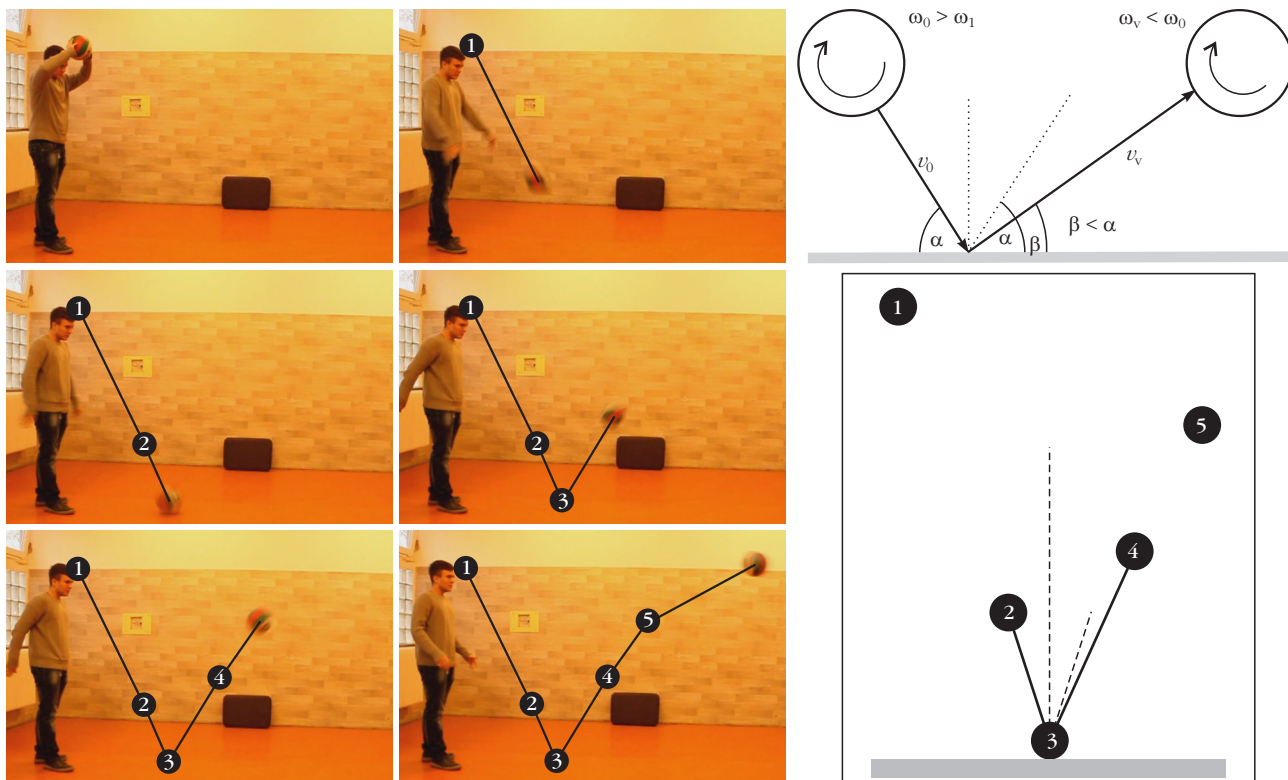
Ehhez változatos oktatásszervezési módokra, érdeklődést felkeltő és fenntartó módszerekre kell építeni, a fizikát nem mint önmagáért valót tanítani. Érdemes a gyakorlatban megfigyelhető történések, jelenségek magyarázatát keresni, a kortárs csoportok hatására építeni, rövidebb-hosszabb projekteket tervezni, egyszerű kutatásokat együtt végezni. Mindezt a más tantárgyakkal, tudományágakkal való kapcsolatot erősítve, komplex módon.



Szferle Tamás az ELTE fizika-földrajz tanár-
szakos hallgatója, amatőr rögbijátékos. BSc
szakdolgozatát a rögbi fizikájáról írta.



Horváth Gábor fizikus, az MTA doktora, az
ELTE Biológiai Fizika Tanszék Környezet-
optika Laboratóriumának vezetője. A vizuá-
lis környezet optikai sajátosságait és az álla-
tok látását tanulmányozza, továbbá biome-
chanikai kutatásokat folytat. Számos szak-
mai díj és kitüntetés tulajdonosa.



15. ábra. Balra a vízszintes sebességet gyorsító köszörüléssel előre pörgő kosárlabda visszapattanásának tornatermi képsorozata (Nagy Norbert dobása). Jobbra fent az 1. rész 3. ábrája, ami az így visszapattanó labda sebességvektorainak komponenseit és szögsebességeit ábrázolja. Alatta a fényképsorozat labdájának helyei, ahol az egyik szaggatott vonal a függőlegest, a ferde szaggatott vonal pedig azt az irányt mutatja, amiben a labda akkor pattanna vissza, ha az α beesési és β visszaverődési szöge azonos lenne ($\alpha = \beta$).

A sport, azon belül a labdajátékok kedvelt tevékenységei a 13-14 éves korosztálynak. Ezen keresztül el lehet érni a lelkesedésüket, lehet építeni kitartó munkájukra. A csapatsportokban rejlő nevelési, fejlesztési lehetőségek különösen sokoldalúak. A gyermekközösségekben domináns szerepet betöltőkre építve a személyiségfejlesztés területén is hatásos lehet a pedagógus, ha jól megtervezi a folyamatot. S ha ehhez a tantervi követelményekben is szereplő tananyag feldolgozását is hozzá tudja kapcsolni, akkor többszörös a siker.

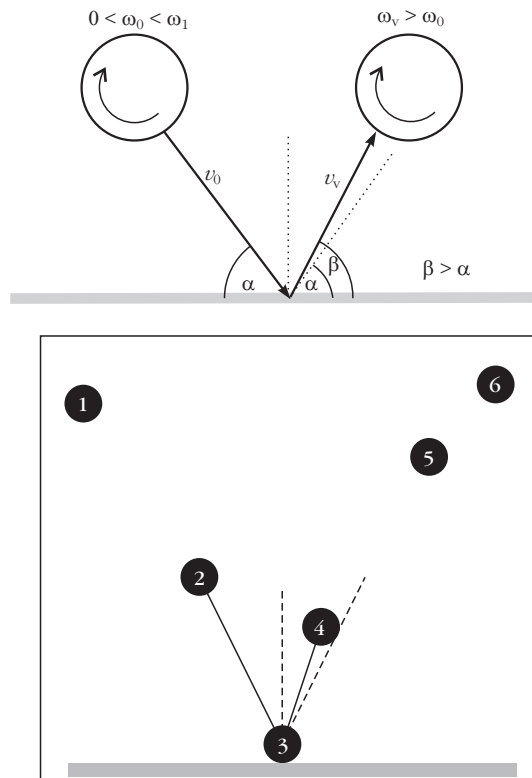
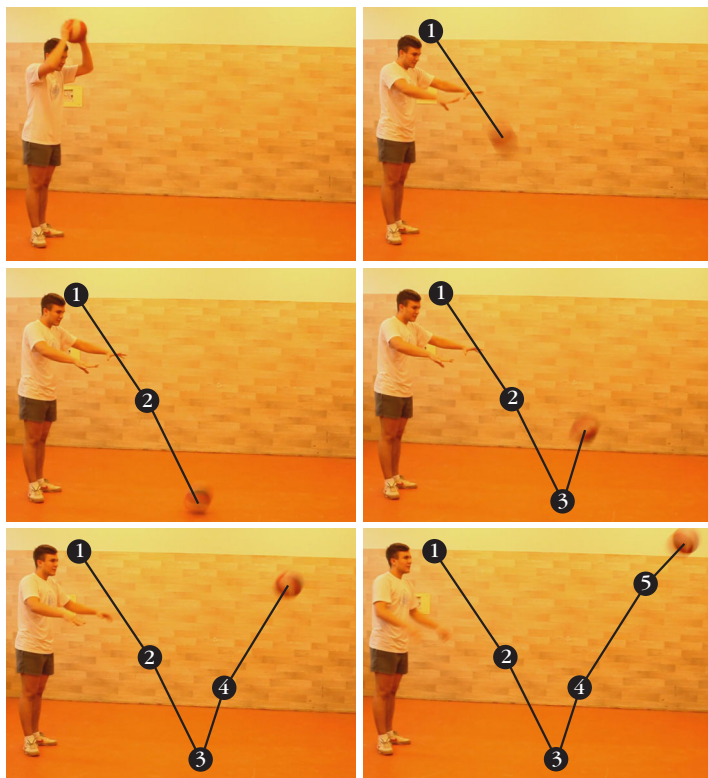
A pattanó, pörgő labda sok lehetőséget kínál: a rugalmas ütközések és az energiaváltozások megfigyelése és magyarázata, a súrlódási erő és a forgatónyomaték összekapcsolása, a lendület, a sebesség, a Newton-törvények, mind föllelhetők a labda viselkedésének megfigyelésében és leírásában. Az a matematikai apparátus, amely a határszögek és végsebességek cikkünk 1. részében történt kiszámításához volt szükséges, természetesen nem áll rendelkezésükre a 7-8. évfolyamosoknak. De nem is erre helyeztük a hangsúlyt. Az elvont gondolkodás fejlesztésére az 1. részbeli ábrákat használtuk, amelyek az eldobott vagy elütött labdák forgását, sebességének nagyságát és irányát, visszapattanás utáni pályáját szemléltették.

A diákoknak ezeket kellett megfigyelhető módon előállítaniuk a gyakorlatban. Canon EOS 600D kamerával rögzítettük a látványt, és lassítva is megnéztük a filmfelvételeket. Eközben informatikai kompetenciát

is fejlesztettünk, az elérhető informatikai eszközök értelmes alkalmazási módjaira ötleteket gyűjtöttünk. A labda talajról történő visszapattanásának kísérleti előállítása élményszerű volt, mert nem a rajzokon látható események rekonstruálását kértük, hanem problémaként fogalmaztuk meg: hogyan lehet elérni e visszapattanási helyzeteket, a pattanó, köszörülő labda elképzelt viselkedéseit?

Naponta tapasztaljuk, hogy a legmagasabb szintű, didaktikailag jól fölépített és előadott tanári bemutatás sem tudja annyira vonzani a figyelmet, mint a tanulóktársak kiselőadásai, Power Point-bemutatói vagy kísérletei.

Mivel valamelyik labdajáték diáksportköri foglalkozásán biztosan részt vesz minden osztályból több tanuló is, ezért jó esélye van, hogy találunk köztük a labdával ügyesen bántót, jó megfigyelőt, és társai közt népszerűt. Rá tudjuk építeni ezt a kis fizikai projektet. Személyére, példájára, tekintélyére támaszkodva, rajta keresztül tudjuk felkelteni az érdeklődést a fizika és alkalmazásai iránt, élményhez kapcsolni a tananyagot, ezzel segítve a figyelmet, az emlékezet és a gondolkodás együttes fejlesztését. Felhasználhatjuk előzetes tudását, hiszen ő már gyakorlati tapasztalatokat szerzett a vizsgálni kívánt jelenségek szándékos vagy véletlenszerű előidézése és megfigyelése során. Így valósulhat meg a konstruktív tanulás, ami jobban hasonlít a spontán, természetes, gyermekkorban jellemző és hatékony tanulási módokhoz, mint a tanórak



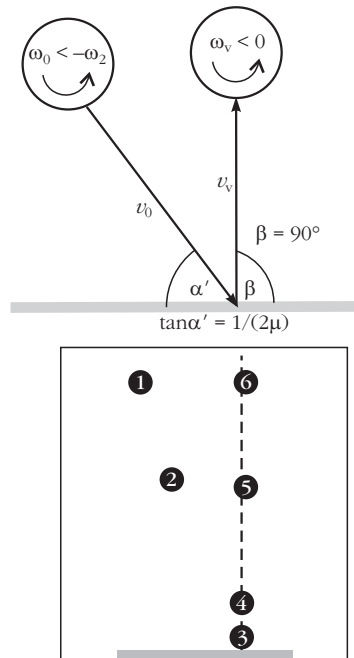
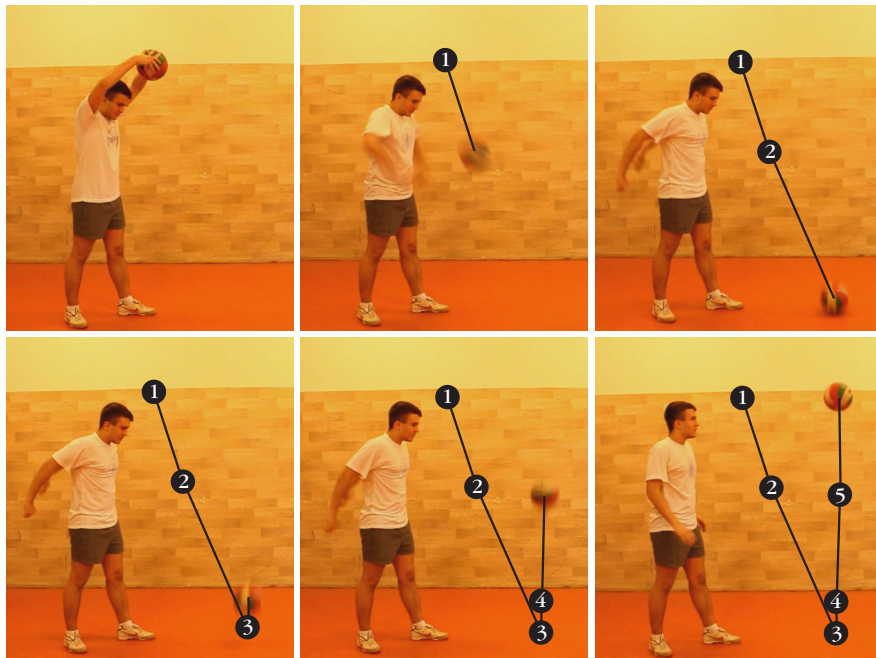
16. ábra. Balra a vízszintes sebességet lassító köszörüléssel előre pörgő kosárlabda visszapattanásának tornatermi képsorozata (Nagy Norbert dobása). Jobbra fent az 1. rész 5. ábrája, ami az így visszapattanó labda sebességvektorainak komponenseit és szögsebességeit ábrázolja. Alatta fényképsorozat labdájának helyei, ahol az egyik szaggatott vonal a függőlegest mutatja, a ferde szaggatott vonal pedig azt az irányt, amiben a labda akkor pattanna vissza, ha az α beesési és β visszaverődési szöge azonos lenne ($\alpha = \beta$).

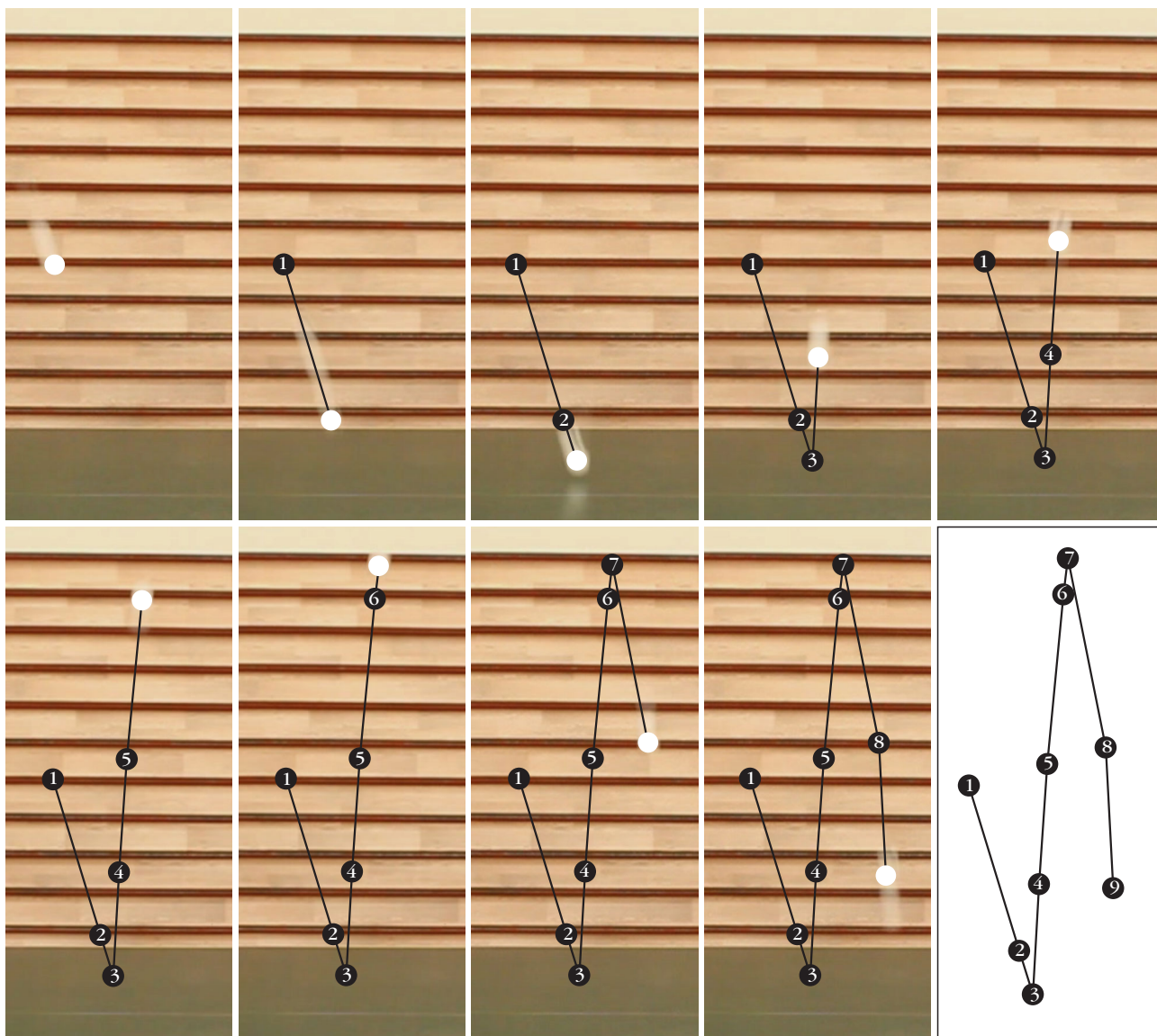
A visszapattanás filmdokumentációja

Megkértünk egy ügyes diákot, hogy egy kosárlabdát úgy próbáljon megpörgetve a tornaterem padlójára

dobni, hogy a labda a cikkünk 1. részében tárgyalt módokon pattanjon vissza. Közben egy másik tanuló oldalról filmre vette a dobást és visszapattanást. A labda filmen rögzített mozgását lassítva visszaneztük,

17. ábra. Balra a visszafelé pörgő, vízszintes sebességet megállító köszörüléssel – így függőlegesen fölfelé – visszapattanó kosárlabda tornatermi képsorozata (Nagy Norbert dobása). Jobbra fent az 1. rész 9. ábrája, ami a függőlegesen fölfelé visszapattanó labda sebességvektorainak komponenseit és szögsebességeit mutatja, amikor a visszapattanás után a labda forog ($\omega_v < 0$). Alatta a fényképsorozat labdájának helyei, ahol a szaggatott vonal a függőlegest mutatja.





18. ábra. Egy majdnem függőlegesen fölfelé visszapattanó, a köszörülő visszapattanás után forgó ($\omega_v < 0$) pingponglabda tornatermi fényképsorozata (Stenzel László ütése) és utolsóként a képsorozat labdájának vonalakkal összekötött helyei.

és a labda pályájának szemléltetésére néhány jellemző képkockát kiemeltünk.

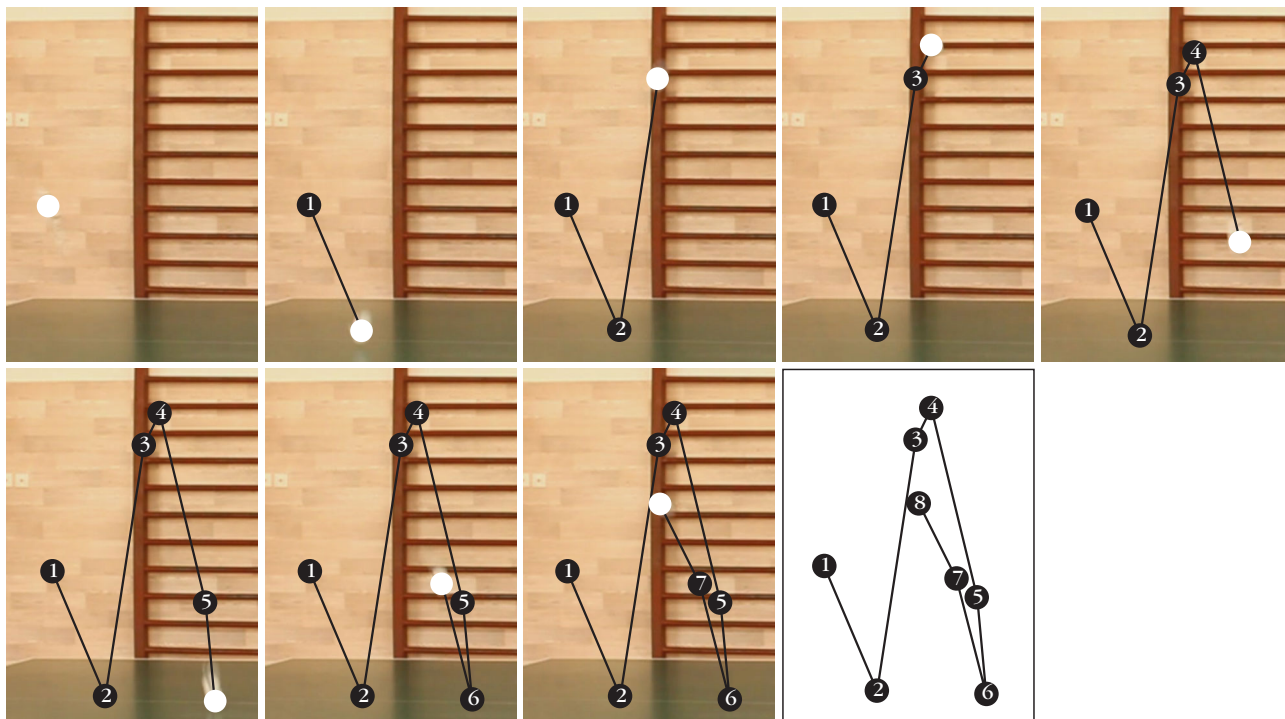
Kosárlabdát alkalmaztunk, mert e labda színmintázata jól láthatóan jeleníti meg a tengely körüli forgást. A dobó diáknak nem kellett tudnia követni az 1. részbeli számításokat. Ő a kosárlabdázásban szerzett tapasztalatait, rutinját alkalmazta az eldobott labda kezdősebességének és szögsebességének a kívánt visszapattanási módhoz szükséges beállításakor. Őt és figyelő társait is örömmel töltötte el, hogy némi próbálkozás után a labda „engedelmeskedett”, és viselkedése pontosan megfelelt a várakozásoknak, igazolva a számítással előrejelzett visszapattanásokat. A 15. ábra a cikk 1. részének 3. ábráján tárgyalt visszapattanás tornatermi előidézésének képsorozatát mutatja. A visszapattanás β szöge itt kisebb az α beesési szögnél ($\beta < \alpha$). Írásunkban a szögeket a vízszintestől mérjük.

A 16. ábra az 1. részben található 5. ábrán tárgyalt visszapattanás előidézésének képsorozata, ami-

kor a visszapattanás β szöge nagyobb az α beesési szögnél ($\beta > \alpha$).

Még nagyobb csodálatot váltott ki a diákokból, amikor pontosan függőlegesen pattant föl a labda az előre jósolt irányban forogva, lásd a 17. ábrát. Hasonló jelenséget pingponglabdával is előállítottunk. Asztalitenisz diáksport csoportunk edzője Stenzel László, iskolánk portása. A 18. és 19. ábrával szemléltetett eseményeket ő érte el. A jobb megfigyelhetőségért fekete filctollal berajzolta a fehér pingponglabda főkört. Jól látható a felvételeken, hogy a pingponglabda majdnem függőlegesen pattant vissza az asztalról mindkét esetben. A 19. ábrán az asztallal való második ütközést követően a köszörülés miatt hátrafelé, vagyis az ütőjátékoshoz közeledve pattant vissza.

A 19. ábrán láttuk, hogy a pingponglabda a második visszapattanása után az ütőjátékoshoz tért vissza. A gyerekek által eddig ismert fizikai (mechanikai) törvényeket meghazudtolni látszott a kosárlabda is, mikor

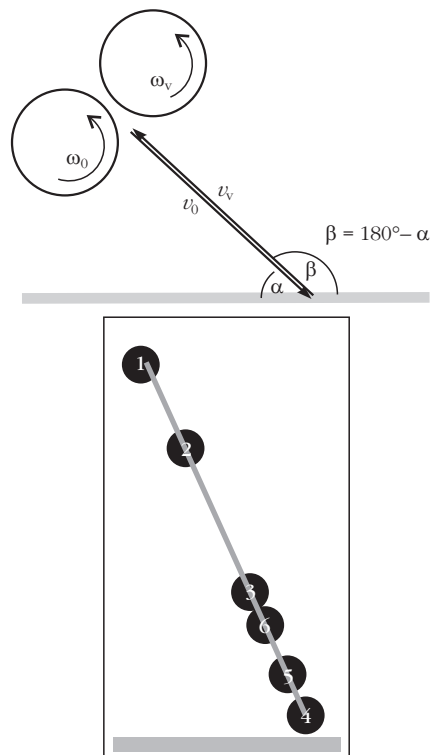


19. *ábra.* Egy közelítőleg függőlegesen fölfelé visszapattanó, a köszörülő visszapattanás után forgó ($\omega_v < 0$) pingponglabda tornatermi képsorozata (Stenzel László ütése) és utolsóként a képsorozat labdájának vonalakkal összekötött helyei. Az asztallal való második ütközés után a köszörülés miatt a labda hátrafelé, vagyis az ütőjátékoshoz közeledve pattant vissza.

pontosan a dobó felé pattant vissza a 20. *ábra* szerinti módon. Talán még a dobó maga is meglepődött, amikor ismét pontosan a kezébe érkezett vissza a labda.

A felvételeket a fizikaórákon szemléltető anyagként lehet felhasználni. Még néhány évig a készítőjükre és a dobó fiúra is ismerősként tekintenek a gyerekek,

20. *ábra.* Balra a visszafelé pörgő, vízszintes sebességet megfordító köszörüléssel – így a dobó kezébe visszaérkező – visszapattanó kosárlabda tornatermi képsorozata (Nagy Norbert dobása). Jobbra fent az 1. rész 11. *ábrája*, ami a hátrafelé visszapattanó labda sebességvektorainak komponenseit és szögsebességeit mutatja. Alatta a fényképsorozat labdájának helyei, ahol a szürke vonal mutatja a megegyező be-esési és visszapattanási irányt.



figyelmüket vonzzák, ezért érzelmileg is bevonódnak. Akik részt vettek a felvételek készítésében, saját, tanulói portfóliójuk egy színes elemeként őrzik meg a képeket. Könnyen lehet, hogy újabb próbálkozás, kutatás kiindulópontja lesz majd mindez.

Heti másfél fizikaórán ritkán van lehetőség arra, hogy élményszerű módon végezzünk megfigyeléseket. A saját élmény megszerzése nem mindig várható el a tanórákon. Azonban, ha sikerül, meghozza az eredményt: az iskolán kívüli élet tudatos megélésére, a kíváncsiság megőrzésére, a magyarázatok keresésére ösztönzünk, a „Miért?” kérdés feltevéséről nem szoktatjuk le a gyerekeket. Erre biztat a tanterv, és ezt várják el a pedagógus szakmai teljesítményszintjére vonatkozó előírások is. Itt találkozhat

a tudomány és a tantárgy. Cikkünkben erre mutatunk egy követhető és kivitelezhető példát a labdajátékok fizikája kapcsán.

Köszönetnyilvánítás

A filmfelvételek elkészítésében a kiskunhalasi Fazekas Mihály Általános Iskolában kaptunk sok segítséget. A kosárlabdát *Nagy Norbert* 8. osztályos tanuló *Sallay Beáta* röplabdaedző tanácsait is figyelembe véve tudta megfelelő módon pörgetni. A pingponglabdás felvételeket Stenczel László úteiseiről *Gudmon Olivér* 8. osztályos tanuló készítette. Mindannyiuknak köszönetünket fejezzük ki ügyességükért és közreműködésükért.

SOKSZÁLAS GÁZDETEKTOR ÉPÍTÉSE A BAÁR–MADAS REFORMÁTUS GIMNÁZIUMBAN

Horváth Norbert

Baár–Madas Református Gimnázium,
Általános Iskola és Diákotthon

Lassan tíz éve, hogy elkezdtük a tehetséggondozást fizikából gimnáziumunkban, amelyet 1990-ben kaptunk vissza az 1950-es államosítása után. Az adományozóiról – *Baár Jánosról* és *Madas Károlyról* – kapta gimnáziumunk nevét, amelyet a református egyház 1907-ben alapított.

Az elmúlt tíz évben a kis számú, de annál lelkesebb szakkörösök a hazai és nemzetközi rangos versenyeken (Mikola, Szilárd Leó, OKTV, IPhO) igen szép eredményeket értek el. Ezen eredmények eléréséhez a *Vankó Péter* vezette olimpiai szakkör is nagy mértékben hozzájárult.

Jómagam, a fizikatanáruk kezdtem érezni, hogy már nem elegendő a tudásom, legfőképpen a modern fizika területein. Jelentkeztem, és részt is vehettem a CERN-ben (Európai Nukleáris Kutatási Szervezet) a középiskolai tanárok tizedik továbbképzésén. Csodálatos egy hetet töltöttünk Genfben, és tanárokként mind azon gondolkodtunk, hogyan hozhatnánk el ide a diákjainkat is. A CERN-ben kutató fizikus, *Béni Noémi* tartott erről egy praktikus előadást, de mint

mindenhez, ehhez is természetesen pénz kell. A pályázat volt az egyetlen esélyünk. Éppen amikor haz értünk írta ki az Emberi Erőforrások Minisztériuma az NTP-MTTD-15, azaz a nemzeti tehetségprogram matematikai, természettudományi és digitális kompetenciák fejlesztésére szóló, összegében 2 millió forintos pályázatot. A pályázatban három különböző méretű csoportos kategóriából lehetett választani. Mi a legkisebb létszámú, maximálisan tízfős kategóriát választottuk. Öt napunk volt rá, hogy megírjuk a pályázatot. A „hozzáértők” lemondóan legyintettek, de mi összeraktuk, megírtuk és beadtuk *Útban a Higgs-bozon felé, kozmikus részecskék detektálása* címmel. Programunk három fő részből állt: 1) elméleti ismeretek bővítése, 2) CERN-i tanulmányút, 3) detektor építése.

A pályázat eredményének kihirdetésétől függetlenül, az elméleti ismeretek bővítésével indult a programunk, amelyben minden tanulónk számára nyitott volt a részvételi lehetőség. A kiemelt tehetségekre való szűkítést a CERN-i tanulmányút és a detektorépítésben résztvevők lehetséges száma adta.

Ismeretbővítő programunk első pontja a CERN–Wigner nyílt nap volt 2015. szeptember 12–13-án Budapesten. A fizikában járatos érdeklődő diákok ezen a kiállításon keresztül kitekinthettek a középiskola és a versenyek világából a valódi fizikusi világba. Előadást és online-kapcsolatú bemutatót hallhattak CERN-ből, bejárhatták a Wigner Intézetben lévő CERN–Wigner Data Centert, és a kiállító sátrakban megfoghatták a detektorelemeket, a szcintillátorokat, továbbá elektronszorozók különböző fajtáit, és végül, de nem utolsósorban a mi leendő detektorunk mintapéldányát.



Horváth Norbert villamosmérnök, fizika- és technikaszakos középiskolai tanár. Több középiskolában tanított, mellette négy évet töltött a KFKI RMKI lézeres laborjában. Jelenlegi iskolájában 2001 óta tanít technikát és fizikát. Tanítványaival estékbe nyúló szakkörökön dolgoznak, amelynek eredményeként diákjai eredményesen szerepelnek a rangos fizikaversenyeken, részt vesznek innovációs és tehetséggondozó pályázatokon is. Öveges-érmes, Bonis Bona-, Delfin-, Csákány Antalné- és Ericsson-díjas.

A továbbiakban kéthetes ciklusokban tartottunk előadásokat és a témához tartozó négyórás szakköri foglalkozásokat. Első vendégünk, *Horváth Dezső* Horvá lett az antianyag? című előadásának nagyon örültünk, mert kiemelkedő tehetségeinknek már voltak részecskefizikai ismeretei, de ezt a kérdést még nem tettük fel. Előadónk az antianyag definiálása után lényegében összefoglalta e lapban megjelent cikkeit [1, 2], amelyekben írt a fizika alapvető törvényéről, a szimmetriáról.

A világ az Ősrobbanásban keletkezett. A keletkezéskor volt egy olyan időszak, amikor csupa sugárzás töltötte be a Világegyetemet, és ekkor pontosan ugyanannyi anyagnak és antianyagnak kellett keletkeznie. A jelenlegi megfigyelésekben nem látjuk az antianyag-galaxisokat. Vannak olyan elképzelések, amelyek szerint ezek a Világegyetem általunk nem belátható részében rejtőznek.

Ma az orvosi alkalmazásokban vagy a fizikai kísérletekben megtaláljuk az antianyagot. Az antiproton előállítása után az antihidrogén-atom előállítása és annak vizsgálata történt meg, igaz, az antihidrogén még nem számolható molnyi mennyiségekben. Az ALPHA-kísérletben már tárolni is sikerült antihidrogént, szám szerint 38-at. 2010-ben a fizikusi világban az antihidrogén előállításának ítelték az első helyet a kutatások sorában. A valóságban egyelőre csak a pozitronemisziós tomográfia, a PET létezik. Álom még az Antiproton Cell Experiment (ACE), azaz a rák kezelése antiprotonokkal, amelyek energialeadó lokalizálhatósága jobb, mint a protoné. A rákétahajtó antianyag fantazmagória, az antianyag-bomba pedig egyszerűen butaság.

A következőkben megpróbáltunk közelebb kerülni a részecske kutatás hőskorához. Bár magunk még nem építettünk ködkamrát, elméleti ismereteinket és az elmúlt évben készített videófelvételeimet elemezve közelebb kerültünk az érzékelés utáni feldolgozó munkához. *Radnóti Katalin* cikkében [3] megtaláltuk azt a Nobel-díjas fényképet, melyet *Carl Anderson* készített a pozitron pályájáról, amint egy ólomlemezen áthaladva görbületi sugara megváltozik. A képet milliméterpapíron is feldolgozhattuk volna, de rajzolópappal gyorsabban kivettük a görbe pontjait, és táblázatkezelővel kiértékeljük. A szakirodalomban szereplő 1:2 sugárárányhoz igen közeli 1:2,18 arányt kaptunk. Más módon is megtettük ezt a kiértékelést. A GeoGebra nevű programmal az ismert pontokra könnyen illesztettünk köröket. A program analitikusan kiírja a kör egyenletét, ahonnan a sugár leolvasható.

A másik híres felvétel magyarként büszkeséggel tölt el: a *Csikai Gyula* és *Szalay Sándor* által készített Wilson-féle expanziós ködkamrás felvétel a neutrínó bizonyítására [4]. Az *Élet és Tudomány* riportjából megtudhattuk, hogy a kísérletet több tízezerszer végezték el, miközben több száz méternyi filmet használtak fel. *Dóczi Rita* ötvenéves évfordulóra írt cikkében [5] megtaláltuk a görbületi sugárhoz tartozó mágneses térerősség adatait, de a méterskálázás hiányában sugáradatot, így impulzust és energiát sem tudunk meghatározni.

Következő előadónk a Wigner Intézet munkatársa, *Fodor Zoltán* volt, aki bemutatkozásában elmondta, hogy már hetedikében eldöntötte: fizikus lesz, és most, a hetvenedikben sincs oka, hogy nagy szerelmét, a fizikát elhagyja. Fizikusi pályájának nagy részét CERN-ben töltötte, az NA61 kísérletben, amelyben jelenleg is egy 150 fős kutatócsoport egyik vezetője.

Előadásának bevezetőjében kitért a CERN-ben folyó kutatási irányokra, különös tekintettel az elmúlt évek legnagyobb mérési sikerére, a Higgs-bozon megtalálására. Ezért természetesen nem a CERN, hanem *Peter Higgs* és *François Englert* kaptak fizikai Nobel-díjat 2013-ban. Megtudtuk, hogy a Nobel-díj bizottság indoklása szerint a két tudós azon mechanizmus elméleti megalapozásáért részesült az elismerésben, amely hozzájárult a szubatomi részecskék tömegeredetének megértéséhez, és amelyet nemrégiben megerősítettek a megjósolt elemi részecske felfedezésével a CERN Nagy hadronütköztetője (LHC) ATLAS- és CMS-kísérleteiben. A Higgs-mechanizmus úgy egészíti ki a standard modellt, hogy megeremti a tömegeket, azaz nélküle az elemi részecskéknek nincs tömegük. *Peter Higgs* úgy vélte, hogy a kérdéses részecske betölti a rést a természet alapvető működését leíró standard modellben, amely nem más, mint az elektromágneses, a gyenge és az erős kölcsönhatást együttesen leíró kvantumtérelmélet.

De mi is a CERN és azon belül az LHC, mint a részecske kutatás központja? A hallgatók megtudhatták, ez egy gyorsító komplexum, amelynek bizonyos pontjain óriás detektorok mérik a felgyorsított és egymással ütköztetett protonok – vagy nehézionok – reakcióinak következményeit. Ahhoz, hogy a töltött részecskék nyalábjá együtt maradjon egy 27 km körű körpályán, mágneses összetartást és eltérítést kell alkalmazni. De mit kell mérni? A keletkező részecskék kilépési irányát, tömegét, töltését, sebességét, energiáját stb.

Hogyan történik a mérés? A detektor nyomkövető. Hogy a pálya több információt tartalmazzon, a töltéssel rendelkező részecskéket mágneses eltérítéssel hozzuk görbevonalú pályára (ez nem a gyorsító mágnes). A pályaeltérítéshez általában szolenoid tekercselrendezést alkalmaznak, a CMS- és ALICE-kísérletekben például csak szolenoidot, az ATLAS-ban toroidot is. A görbület méréséből következtethetünk a töltés és impulzus szorzatára, a fajlagosenergia-vesztéséből a töltéssűrűség és sebesség szorzatára, a repülési időből pedig a sebességre. Így együtt minden lényeges részecske tulajdonságot megkaphatunk.

A CERN két legnagyobb detektora, az ATLAS és a CMS általános ismerveivel folytatta *Fodor Zoltán* az előadást, majd részletesebben megismertedtünk a különböző detektorfajtákkal és azok működési elvével. Történeti sorrendben a nyomdetektorok: emulziók, köd-, buborék- és szikrakamrák. Érdekes volt, hogy egy mérési esemény kiértékelése napokat vett igénybe. Később alkalmazták a gázalapú detektorokat: az ionizációs, proporcionális, időprojekciós kamrákat, amelyekben az ionizációban keletkezett elektronokat mérik meg. A félvezető alapú detektorok,

vagyis pixel- vagy csíkdetektorok nagy felbontással és nagy érzékenységgel tudják a beérkező részecskét jelezni. A szcintillációs detektorokkal a gerjesztett vagy ionizált atomok legerjesztődésénél keletkező fényt mérjük meg. A kaloriméterekben a beeső részecske energiájával arányos jel jön létre.

Pályázati programunk következő lépésében a leendő sokszálas proporcionális gázdetektorunk 1500 V-os nagyfeszültségű táplálását és a szálakon lévő néhányszor tíz nanoamper áramerősségek mérését gondoltuk át. A gimnáziumi oktatásban a félvezetőket, illetve az azokból épített elektronikai eszközök csak elemi szinten jelennek meg. Villamosmérnöki ismeretekkel felvértezve megtárgyaltuk az ide vonatkozó legfontosabb elektronikai eszközöket: a nagyfeszültség előállítására szolgáló kondenzátoros feszültség-sokszorozó kapcsolást, az indukciós elvű kapcsolóüzemű tápegységet, amellyel a nagyfeszültséget szabályozott módon állíthatjuk elő. Kitértünk a nagyfeszültséghez megkívánt érintésvédelemre, a védőellenállásra, amelynek méretezését elvégeztük. Áttekintettük az elemi zajszűrő kapcsolásokat, az úgynevezett RC-áramköröket. Megismerkedtünk a műveleti erősítő fogalmával, annak mérő és illesztő kapcsolásaival és egyszerű méretezésével. Ezek az erősítő kapcsolások teszik lehetővé a jelek digitális feldolgozását és a nanoamperes áramok mérését.

Következő előadónk *Varga Dezső* a részecskefizika standard modelljének alkotóelemei és az azokból felépülő részecskék világába vezetett be bennünket. A standard modell táblázatában szereplő anyagi részecskéknek vannak antianyag-részecske párjai. A nagyenergiás ütközésekben ezek általában párban keletkeznek. Ezen család legkisebb építőkövei a kvarkok, illetve az antikvarkok. Ezek hatan-hatan vannak és bármely kombinációban (egyből vehetünk többet is) állíthatnak elő összetett részecskéket. Az ismertebb proton két u- és egy d-kvarkból áll. A detektorfizika ezen részecskéket keresi, ennek forradalmi pillanatait mutatta be az előadó. Az expanziós (*C. Wilson* 1911-ben fedezte fel, 1927 Nobel-díjat kapott) és a diffúziós (1936) ködkamrák világában már kisebb jártasságunk volt. A következő forradalmi lépés a ködkamrák világából előlépő buborékkamra volt. Ezt a kamrát *D. Glaser* 1952-ben fejlesztette ki, amiért 1960-ban Nobel-díjat kapott.

A buborékkamra elve hasonló a ködkamráéhoz, azonban nem alacsony, hanem magas hőmérsékleten van a detektoranyag, a folyadék, ahol a buborék létrejön. A forrponthoz közeli folyadékba érkező részecske nyomán apró, mikrométer méretű buborékfonal képződik. A folyadéktartály alján egy dugattyú van, amikor a részecske várhatóan bekerül a folyadékba, akkor ez a dugattyú egy rövid időre, jellemzően egytized másodpercre lefelé mozog, ezzel csökkentve a folyadékban lévő nyomást. A csökkent nyomású folyadékban a forrponthoz közeli hőmérséklet is alacsonyabbra esik, így kialakulhat forrás. A lokális forrás, azaz a buborék kialakulásához segít a részecske jelenléte. A buborékfonal létrejöttét fényképezik le, majd a du-

gattyút visszanyomják, hogy ne alakuljon ki lobogó forrás. Az egész buborékkamrát mágneses térbe helyezzük, így a töltéssel rendelkező részecske körpályán fog mozogni. Ebből erednek a görbe vonalak a fényképen, a hosszú egyenesek igen nagy energiájú töltött részecskék jelenlétére utalnak, a semlegesek nem hagynak nyomot.

A bemutatott képeken láthattuk a semleges Λ -részecske töltöttekre történő bomlását, amely u-, d- és s-kvarkokból áll össze, a K-mezont, amely egy anti-s és d-kvarkból áll. Létezik a három u-kvark összerakásából a Δ -, az u- és két s-kvarkból a Ξ -részecske. A kvarkszerkezet bizonyítékának koronája a három s-kvarkból álló Ω -részecske észlelése volt.

A detektorfizika újabb forradalmi pillanata az 1974-ben felfedezett c-kvark. Felfedezéséhez merőben új érzékelési eljárást dolgoztak ki: a gyorsítóból érkező proton céltárgyba csapódásakor olyan részecske keletkezett, amely elektronra és pozitronra bomlik. Ezeket az elektronokat és pozitronokat akarták érzékelni. A probléma az, hogy sok ilyen eseményt kell gyűjteni. A buborékkamrával legjobb esetben is 100 000 képet tudunk készíteni, és ezeket egyenként kell megnézni és feldolgozni. Ennél gyorsabb feldolgozás kellett. A milliós, tízmilliós nagyságrend elérése érdekében új módszert fejlesztettek ki, amelynek lényege, hogy az átmenő részecskékről kevesebb információt gyűjtünk, de sokkal gyorsabban. Ehhez több, kisebb detektorból álló detektorrendszer kell, amely egymástól távolabb álló több ponton méri a részecske, ebben az esetben elektron, illetve pozitron pályáját. Cserenkov sugárzással mérték az elektron sebességét, energiáját, amelyekből következtettek az előzőekben elbomlott részecskére. A számítások azt mutatták, hogy az elektron-pozitron pár egy kvark és antikvark kötött állapotából keletkezett. Ez az új részecske c és anti-c kötött állapota. A mérésért *Burton Richter* és *Samuel Ting* 1976-ban Nobel-díjat kapott.

Ezzel a méréssel elkezdődött egy új részecske-nyomkövetés: sok diszkrét helyen érzékelik a detektálódó részecskét. A létrejött elektromos jel elektronika-adta gyors kiolvasása és feldolgozása, majd az adatok tárolása forradalmasította a részecskék kutatását. A gyorsítók egyre nagyobb energiájú gyorsítással egyre nagyobb tömegű részecskék felfedezését tették lehetővé. A CERN Nagy hadronütköztetőjében, az LHC-ben már 6,5 TeV energiájú protonok ütköznek egymással.

Pályázati programunkban elérkeztünk a legáthitotabb pillanathoz: a Genfben lévő CERN laboratórium meglátogatásához. A pályázat beadásának pillanataiban a CERN látogatói oldalán megjelöltünk három alternatív időpontot, amely kétnapos látogatási lehetőséget biztosít. Visszaigazolták kérésünket, azt meg kellett erősítenünk, másodszer az utazáshoz közeledve is.

Tízfős csapatunk 2016. január 10–14. között volt Genfben. *Makovský Mibály* (9. osztály), *Nenezic Patrick*, *Jakus Balázs*, *Dávid Eszter* (11. osztályosok), *Asztalos Bogdán*, *Blum Balázs*, *Forrai Botond* és *Balogh Menyhért* (12. osztályosok).

Fogadóink, „idegenvezetőink” a CMS magyar kutatói, *Szillási Zoltán* és *Béni Noémi* voltak.

Előadást hallhattunk a CERN 1954-es alapításáról, a már több mint 20 tagországról, az évi egymilliárd svájci frankos költségvetésről, a standard modellről és annak hiányosságairól, hogy a modell jelenlegi alakjához való eljutást miképpen segítette elő a CERN, és hogyan tervezi megoldani annak hiányosságait. A CERN gyorsítóról, amelyek közül legfontosabb az LHC és annak előgyorsítórendszere – protonra: Linac 2, PS booster, PS, SPS (ahol a PS proton-szinkrotront jelent), nehéz ionra: Linac 3, LEIR, PS, SPS –, emellett gyorsítói az ISOLDE és az AD (antiproton-lassító). A CNGS-program (CERN Neutrinos to San Grasso) keretében neutrínókat küldenek egy olaszországi érzékelőhöz. Néhány éve egy nehezen feltárható mérési hiba miatt a neutrínókat gyorsabbnak mérték a fénynél, ez akkor nagy port kavart. Idegenvezetőink beszéltek az LHC detektorairól: ALICE, LHCb, ATLAS és CMS, amely utóbbi kettő nagy intenzitású ütközőpontokon helyezkednek el, ezért közöttük egyfajta verseny van. Egymástól függetlenül működnek, így egymás mérési eredményeit megerősíthetik, illetve cáfolhatják.

Béni Noémi vezetett körbe a kiállítótermen, ahol a gyorsítókat felépítő elemeket életnagyságban láthattuk, de ez még nem maga a gyorsító volt. Beszélt a pár éve fellépő üzemzavar okáról (egy hibás forrasztás, amelyen az áram túl sok hőt fejlesztett és elforralt a hélium hűtőfolyadékot, ezzel szétrobbantva a gyorsító néhány elemét) és a nyolc hónapon át tartó javításról. Az LHC-ben főleg protonokat gyorsítanak, a gyorsítás elektromos mezővel történik, és a protonnyalábot mágnesekkel (4 dipól után 1 kvadrupól) tartják pályán. A szupravezető elektromágnesek 1,9 K-en működnek. A mágnesblokkok egyenként több métereseek és több tíz tonnásak. Noémi beszélt a CERN elhelyezkedéséről a környező Genfhez és a Jura-hegységhez képest, a távolságot egy több méteres madártávlatú térképen is illusztrálta.

A nap során Szillási Zoltán elvitt a „trigger” terembe, ahol a másodpercenkénti körülbelül egymilliárd ütközés adatait feldolgozzák. A kirepülő részecskék közül csak azokat veszik valóságnak, amelyeket a detektor négy helyen is érzékelt, és már a detektoron belül kiválogatják az adatok azon töredékét, amely érdekes lehet. A felküldött adatokat tovább válogatják, csak az érdekeseket mentik el. Mágnesszalagon tárolják őket. Egy $10 \times 20 \times 2$ cm-es szalagon 10 TB adat elfér.

A délutáni programban a CERN kisbuszával elvittek minket a CMS-hez, amely 100 méter mélyen van, oda



1. kép. A CMS-től néhány méterre.

lifttel mentünk le. E terem egy része le volt zárva, mert ott folyékony héliummal dolgoznak: hűtik a hatalmas mágneset, amely üzemzavar esetén 10 másodperc alatt elveszti terét. Az ekkor keletkező óriási mágnesesmező-változást az emberi test nem bírja ki, ezért a hatalmas áramokat kinti mechanikai ellenállásokon vezetik át, így disszipálják a hőt.

A gyorsító alagútjába nem vihetek le bennünket, mert a folyékony hélium kiömlése életveszélyt jelentene, de életnagyságú kép előtt fotózhattuk le magunkat, mintha ott lennénk. Az ütköztető éppen állt, így kis csapatunknak hihetetlen élmény volt életközérből látni a CMS-t (1. kép). Egy 10-20 méter oldalélű, 14 ezer tonnás téglatestet láttunk. Az Eiffel-torony tömege ennek kevesebb, mint fele. Az ATLAS nyolcszor ekkora, de fele tömegű. Megtudtuk, hogy Zoltán egyik feladata a CMS beázásának megakadályozása, vizsgálata, és hogy centire pontosan meg tudja mondani, ha benn valami valahol csöpög.

A CMS látogatása után visszatértünk a látogatóközpontba, ahol multimédiás vetítést tartottak a falra és valódi, már leszerelt kisebb gyorsítóelemekre vetítve a CERN feladatáról és történetéről, a fejlesztésekről. A filmben magyar munkatársak is megszólaltak.

A CERN épületeit járva a legemlékezetesebb az a terem volt, ahol a World Wide Web, az internet információs rendszere született. Az irodában dolgozó *Tim Berners-Lee* és *Robert Cailliau* elgondolásai alapján olyan rendszer kelt életre, amely az elmúlt huszonöt évben forradalmasította a kommunikációt.

Másnap a CERN egyik új, látogatóknak fenntartott laboratóriumában, a S’CoolLabban kaptunk elméleti és gyakorlati felkészítést a legelső detektorokról. Itt valóban meg is építhettük azt a diffúziós ködkamrát, amelyet elméletben már otthon is megismertünk. Ebben a kozmikus sugárzásból származó részecskéket detektáltuk, majd Zoltán felvázolta a táblán, hogy miért pont olyan részecskeutakat láttunk. Találtunk elektront, müont, müon bomlását, valamint a szeren-

csések α -részecskéket is. Ezután bemutatott egy professzionális detektort, amelyben több jelet láttunk, de nem volt meg az az érzésünk, hogy ez a mi munkánk gyümölcse. Ezután – egy pincében porral teleszívott – rongyot raktunk az egyik detektorba, ebben radon és leányelemei α -bomlását figyelhettük meg.

A detektorépítés után ismét a helyi menzán ebédeltünk, majd a szálláson pihentünk és a bevásárlást is elintéztük. Este ismét sétálni mentünk a városba, ezúttal az óváros volt a célpont. Itt az egyetem parkjában sakkoztunk egy kicsit az életnagyságú bábukkal, majd a katedrálshoz is felmentünk. A Kálvin János utcában – református iskola diákjai lévén – fotót készítettünk az utcanévtáblával.

Repülőjegyük úgy volt a legolcsóbb, ha vasárnap érkezünk és csütörtökön repülünk vissza. Így a hétfői és keddi CERN-látogatás után még maradt egy szerdai napunk, amelyet ugyanazzal a kincsvadászattal töltöttünk el Genfben, mint amelyet az előző nyári tanári továbbképzés alkalmával átélhettem. Megkerestük a reformátorok falát, *Rousseau* házát, felmentünk a városi történelmi múzeumba, a Szent Péter katedrális tornyaiba, ahonnan Genf egyik látványosságát, a január közepén is működő óriás szökőkutat láthattuk. Ezután lementünk a Genfi-tóra, hajókáztunk innen-oda és vissza, keresztül-kasul a városon. Tisztelegtünk Erzsébet királynénk szobránál, majd egy igazi helyi specialitású fondue-s helyre, a strand zárt, vaskályhával fűtött teraszán kialakított étterembe ültünk be.

Itthon folytattuk pályázatunkat a harmadik rész végrehajtásával, a sokszálas proporcionális gázdetektor [6] megépítésével.

Nyolc egymás feletti detektorkamrást képzelünk el. A pályázatunkban ennek megfelelően kértük az

anyagi támogatást, így a Wigner Intézetnek nem kellett anyagilag hozzájárulnia. A Wigner Fizikai Kutatóközpont Részecske és Magfizikai Intézet kutatócsoportjának segítségével végeztük el a munkát. A csoport vezetője Varga Dezső. Munkánkat *Oláh Éva*, egy másik tehetséggondozó program vezetője is segítette, aki már több hasonló detektorépítési munka irányítója volt. Oláh Éva régóta foglalkozik középiskolásokkal ebben a laboratóriumban, így a témában több cikke is megjelent [7, 8]. Varga Dezső a leendő detektorunk egy működő példányán magyarázta el a fizikai működést, a gázzal töltött kamrában lévő, a müonok által keltett ionizációban létrejött elektronok nagyfeszültségű, kis átmérőjű szálak körüli, nagy elektromos térerősség miatt kialakuló lavinaeffektusban való sokszorozódását, illetve a szálakon létrejött elektromos jel kivezetését, erősítését, tárolását és – esetünkben – LED-es megjelenítését. Itt is megjelenik a „trigger”, azaz a jelek kivezetése csak akkor történik meg, ha az egymás alatt lévő kamrákban ugyanazon ionizációs folyamatból származó jel jön létre.

A detektor építése a kutatócsoport kisebb laborjaiban, műhelyében folyt, ezért a nyolc főből két négyes csoportot alkottunk, akik felváltva, kéthetente összesen hat alkalommal dolgoztak, de dolgoztunk a Baár-Madas műhelyében is. A munkaalkalmak időtartama változó, átlagosan 3-4 óra volt. Külön köszönet *Pázmándi Péter* villamosmérnök-hallgatónak, az ő technikai háttér munkája nélkül semmire sem mentünk volna. A detektorépítés fázisaiban tehetségeink megtanultak ipari fűrógéppel fűrni, kétkomponensű ragasztót homogenizálni, méretezni, pontosan illeszteni a plexirudakat, hogy légmentes kamrát kapjanak. Megtekercselték a 16-16 szál 100 μm -es és a véko-

2. kép. Készülnek a detektorkamrák.



nyabb, 25 μm -es aranyozott volfrámszálat tartalmazó kamrakeretet, a szálatokat fogpiszkálóval helyreigazították a forrasztási pont közepére, leforrasztották és snitzerrel levágták a vékony szálatokat. Rézzel borított nyomtatott áramköri lapokkal zárták a tekercskeretet, amivel mechanikailag elkészült a kamra. Ezután az elektromos csatlakozások, ellenállások és kondenzátorok felforrasztása következett. A kész kamrát légmentességi és elektromossági szempontból kellett még ellenőrizni. Általában hat-nyolc kamrából áll egy detektor, nekünk hatot sikerült ennyi idő alatt elkészíteni, de két kölcsönkamrával kiegészítettük. A 8 kamra emeleit összekábelezve és a jelfeldolgozó digitális kijelzőrendszerrel ellátva detektorunk elkészült. A jelfeldolgozó és kijelző elektronikát, a nagyfeszültségű tápegységet és a gázadagoló egységet darabokban vettük meg a pályázati keretből (2. kép).

A működést 2016. május 13-án mutattuk be a Baár-Madas Református Gimnázium szülői estjén, ahol az iskola vezetése mellett hivatalosan jelen volt az iskola fenntartója képviselőjében Szabó István, Dunamelléki református püspökünk, továbbá egyik tanítványunk édesapjaként, nem hivatalosan Varga Mihály miniszter és nagyapai minőségben Kroó Norbert akadémikus is.

A pályázati program kétségtől hatással volt a programban résztvevő tehetségek fejlődésére. A program előtti években tehetségeink már részt vettek a korosztályos fizikaversenyeken igen jó eredményekkel (a Szilárd Leó Tehetségkutató Fizikaverseny, a Mikola Sándor Tehetségkutató Fizikaverseny és az OKTV első tíz helyezettjei között is voltak). Biztos vagyok abban, hogy a programunk évében elért újabb sikereikhez a programban való részvétel is hozzájárult. Kiemelt tehetségeink közül négyen az idén voltak végzősök, e cikk írásának napjaiban döntik el,

hogy melyik egyetem fizikusi karára jelentkeznek (Balogh Menyhért, aki tavaly az Indiában tartott fizikai diákolimpián ezüstérmes, az idei Zürichben rendezetten aranyérmes szerzet, már februárban felvették a Cambridge-i Trinity College-ba). A nem végzősök közül ketten e cikk írásának napjaiban vannak a keszthelyi Nukleáris Táborban.

A tehetséggondozó programunk létrejöttéért sokaknak kell köszönetet mondanunk. *Sükösd Csabának* és *Jarosievitz Beátának* akik tíz éven keresztül vitték CERN-be a középiskolás tanárokat, bevezetve minket a részecskefizika rejtelmeibe. A programban résztvevő fizikusoknak, a „CERN-i különítménynek”: Szillási Zoltánnak, Béni Noéminek, a Wigner Intézet főigazgatójának *Lévai Péternek* és a munkatársainak, Fodor Zoltánnak, Varga Dezsőnek, *Horváth Dezsőnek*, Pázmándi Péternek. Köszönet Oláh Évának, aki energikus lendületével segítette leendő fizikusaink manuális fejlődését. Laus Viventi Deo.

Irodalom

1. Horváth Dezső: Antianyag-vizsgálatok a CERN-ben. *Fizikai Szemle* 54/3 (2004) 90.
2. Horváth Dezső: Szimmetriák az elemi részecskék világában. *Fizikai Szemle* 53/4 (2003) 122.
3. Radnóti Katalin: Használjuk-e a centripetális erő fogalmát? *A Fizika Tanítása XVIII/4* (2010) 8–13.
4. Dombi Margit: Ködkamrák és reaktorok – Csikai Gyula elmulasztott Nobel-díjról és Teller álmairól. *Élet és Tudomány* 2014/3 4.
5. Dóczi Rita: A neutrínó visszalökő hatásának észlelése a ${}^6\text{He}$ béta bomlásában – 50 évvel ezelőtt. *Fizikai Szemle* 55/10 (2005) 356.
6. D. Varga, Z. Gál, G. Hamar, J. S. Molnár, É. Oláh, P. Pázmándi: Cosmic Muon Detector Using Proportional Chambers. *Eur. J. Phys.* 36 (2015) 065006.
7. Oláh Éva Mária: Részecskefizika tanítása a kutatólaborban. *Fizikai Szemle* 64/9 (2014) 317.
8. Oláh Éva Mária: Hogyan építsünk műondetektort diákokkal és tanárokkal? *MAFIOK XL. konferencia*, Székesfehérvár, 2016. augusztus 22–24.

KÖNYVESPOLC

Juhász András, Jenei Péter (szerk.):

A FIZIKA TANÍTÁSA A KÖZÉPISKOLÁBAN I.

Elektronikus módszertani jegyzet a középiskolai fizikatanításhoz

Végre megjelent!

A fizika középiskolai tanításához a korábbiakban még nem készült magyar nyelvű, átfogó, a fizika középiskolában tárgyalt fejezeteit teljes körűen áttekintő módszertani szakkönyv. Az Eötvös Loránd Tudományegyetemen, illetve elődjén több mint száz éve folyik fizikatanár-képzés. Bár a felkészítésben hagyományosan komoly szerepet tölt be a szakmódszertan, a két féléves, heti két órás kollégium nem ad lehetőséget a

teljes középiskolai fizika-tananyag kellő mélységű és részletességű módszertani feldolgozására. A gyakorló iskolában végzett munka kiegészíti ugyan az elméleti képzést, de ott is csak a gyakorló tanítás során előkerülő témakörök tanítási problémái kerülnek elő. A hallgatóknak eddig nem állt rendelkezésére olyan segédanyag, amelyből az időhiány miatt kimaradt anyagrészeket pótolni tudták volna. Az iskolába kikerülő fiatal tanár számára sok módszertani kérdésben maradt tehát

a saját tapasztalat, illetve tapasztalatlanság, aminek első saját „igazi” iskolai tanítványaik látták kárát.

Az ELTE fizika módszertannal foglalkozó oktatói munkaközössége a közelmúltban belekezdett a hiánypótló munkába. Ennek eredményeként 2015 októberében végre megjelent *A fizika tanítása a középiskolában* címet viselő átfogó elektronikus egyetemi jegyzet első kötete. A jegyzet minden érdeklődő számára ingyenesen letölthető.¹

A jegyzet elsődleges célja, hogy segítse a fizikaszkos tanárjelöltek módszertani tanulmányait, és vizsgára való felkészülését. A szakanyag azonban ennél sokkal általánosabban is felhasználható, gyakorló fizikatanárok, szakirányú tanártovábbképzések résztvevői, sőt doktoranduszok is haszonnal forgathatják. A sokoldalú felhasználást a jegyzet enciklopédikus jellege és modul rendszerű felépítése teszi lehetővé. A szerzők a speciális szakmódszertani kérdések és módszerek tárgyalása mellett a középiskolai tanítás nézőpontjából áttekintik a fizika tematikus fejezeteinek tartalmát is.

Időtálló szakmódszertani jegyzetet írni nagyon nehéz, hiszen napjainkban az oktatási reformok korát éljük. Az egymást követő gyors változások miatt sokszor az iskolai tankönyvek sem készülnek el időben, és kelő színvonalon, nemhogy a tanítási gyakorlat módszereit segítő tanári kézikönyvek jelenhetnének meg.² A most megjelent szakmódszertani jegyzet igyekszik kerülni az időszerűség buktatóit. A tananyagot diszciplínárisan, a fizika fejezeteinek tudományos egymásra épülésének sorrendjében és nem adott tantervnek megfelelően dolgozza fel. A módszerek és tanítási lehetőségek kipróbált változatait mutatja be és illusztrálja kísérletekkel, kitekintésekkel és szakmai megjegyzésekkel, ugyanakkor segítséget kíván nyújtani a különböző tantervi lehetőségek közötti választáshoz is.

A jegyzet nem fizikatanönyv, nem a fizika tematikus tanulását szolgálja, és az iskolai tanításra sem használható közvetlenül. Ezzel szemben mindkét fontos témában nagyon hasznos segítséget kínál a szaktanárok számára. A tanítási módszerekre, illetve a tanítás során szükséges egyszerűsítések bemutatására, és az egyszerűsítések buktatóinak feltárására koncentrálna. Kiemelten foglalkozik a gyakran félreértett vagy tévképzeteket keltő anyagrészekkel is. A tévképzetek általában a hétköznapiakból származnak, de számos esetben az iskolában rosszul értett, félreértelmezett ismeretanyag eredményezi őket. Legtöbbször ilyen tévképzetek állnak a háttérben annak, hogy sok diák úgy érzi képtelen megérteni a fizikát, hiába magolja be a törvényeket, az alkalmazásuk nem megy. A tévképzetek megelőzésében, illetve korrigálásában kulcsszerepük van a fizikatanároknak. A fizikatanítás sikere alapvetően a tanár tantárgyi és módszertani felkészültségén és persze elhivatottságán múlik.

¹ http://ttomc.elte.hu/kiadvany/fizika-tanitasi-kozepiskolaban-i-es-http://csodafizika.hu/fiztan/letolt/fizika_tanitasi_1.pdf

² A legutolsó nagy változás a Nemzeti Alaptanterv 2012 évi megújítása volt, amit új kerettantervek követtek. Az illeszkedő tankönyvek első változata épp, hogy elkészült, és máris az Alaptanterv újabb revíziója van napirenden.

A jegyzet elektronikusan, pdf formátumban jelent meg. A szerzők kihasználják az elektronikus dokumentum lehetőségeit, a jegyzet moduláris formában épül fel. A feldolgozás vázát a fizikatanítás szempontjából legfontosabb ismereteket összefoglaló tömör tematikus fejezetek adják. Ezt a fő vonalat rengeteg – kattintással behívható melléklet – kidolgozott tanítási egység, részletes kísérletleírások, feladatok, fizikatörténeti kiegészítések, technikai érdekességek, alkalmazások, szakirodalmi hivatkozások, ajánlások egészítik ki. Az internetről letölthető anyag terjedelme 733 oldal, amit további, az interneten található tartalmakhoz vezető, élő linkek egészítenek ki. A jegyzet fő vonalát kiegészítő, és kattintásra behívható kiegészítő anyagrészeket, csakúgy, mint az internetes linkeket, csak a speciális részek iránt érdeklődő olvasónak szánják a szerzők. A szakanyag sajátos szerkesztése egyrészt a gazdag tartalom jobb áttekinthetőségét biztosítja, másrészt lehetővé teszi az elektronikus jegyzet későbbiekben biztosan elkerülhetetlen tartalmi frissítését, aktualizálását.

Az első kötet bevezetőjében a szerzők ígéretet tesznek a munka folytatására. A fizika további fejezeteinek szakmódszertani feldolgozását tartalmazó második kötetet 2017 tavaszára ígérik.

A módszertani jegyzet most megjelent első kötete öt nagy témakört tartalmaz:

- A fizikatanítás hazai története és helye a középiskolai oktatásban
- A magyar iskolarendszer tantervi szabályozása
- A mechanika tanításának kérdései
- A termodinamika és statisztikus fizika tanítása
- Mindennapi gyakorlat módszertana

Az első rész a fizikatanítás társadalmi helyével, feladataival és a vele szemben támasztott elvárásokkal foglalkozik. Kitekintést ad a hazai fizikatanítás történetére, az alkalmazott módszerek változásaira, és ezekhez kapcsolódva néhány fontos hazai és külföldi tanítási kísérletet is bemutat.

A második rész bemutatja a magyar iskolarendszert és annak történelmi fejlődését. Az iskolarendszer legfontosabb szabályozója a tanterv. A szerzők önálló fejezetet szenteltek a jelenleg fokozatos bevezetés alatt lévő, sok vitát gerjesztő Nemzeti Alaptantervnek és az érettségi szabályzatnak. Egyik mellékletben mutatják a nemzetközi felméréseket és azok eredményeit.

Az első kötet részletesen foglalkozik a mechanika és a termodinamika tanításának kérdéseivel. E két témakör tárgyalása talán a legfontosabb a fizika alapfogalmainak kialakításában és a tudományra jellemző gondolkodásmód megismertetésében, amelyekre a fizika további témaköreinek tárgyalása során szükség lesz. A természettudományos vagy műszaki irányban továbbtanuló diákok számára meghatározó, hogy milyen alapokkal indulnak a felsőszintű fizikatanulásban. A jegyzet kitér a csak az emeltszintű fizikatanítás során előkerülő és a különös érdeklődésre számot tartó kérdésekre is.

A mechanika tanítását a jegyzet nem az iskolában szokásos (mozgástípusok szerinti) csoportosításban, hanem kinematika és dinamika részekre osztva mutat-

ja be. Ezzel nem kötelezi el magát egyetlen tanterv mellett sem, a módszertani lehetőségek taglalásával azonban segítséget nyújt a tanárok számára a saját tantervek kialakításához.

A jegyzet első kötetének záró fejezete *A minden napok módszertani gyakorlata* címet viseli. Ebben olyan gondolatokat, ötleteket, tananyag-feldolgozási lehetőségeket talál az olvasó, amelyek sok tanár számára talán evidenciának tűnnek, azonban sokan, akik eddig semmi jelentőséget nem tulajdonítottak az ilyen lehetőségeknek, jól használhatják őket.

Minden tanárjelölt és tanár tudja, hogy órán bemutatott kísérletek nélkül nem lehet eredményesen természettudományokat tanítani, de arról, hogy miként kell a kísérleteket beépíteni a fizikaórába és hogyan kell hasznosítani a látottakat, már jóval kevesebb szó esik. Egy-egy kísérlet különböző szerepet tölthet be a fizikaórán. Ennek megfelelően kell megtervezni a kivitelezését is. A kísérletet bemutathatja a tanár, de sok esetben a tanulók által elvégzett mérés vezet az eredményes megértéshez. Keveset beszélünk a tanulók által otthon elvégezhető kísérletekről, pedig az otthoni önálló tevékenység motivációs hatása jelentős. Igen fontos minden kísérlet (beleértve az otthoniakat is) órai előkészítése és a tapasztalatok értelmezése. A 21. század önálló „kísérlettípusa” a számítógépes szimuláció. A jegyzet részletesen foglalkozik a számítógép felhasználásával és néhány tananyagot egy új fejlesztésű számítógépes program segítségével illusztrál. A szerzők a jól felszerelt és berendezett fizikaszertárat és -előadót is bemutatják. A jó és átgondolt tervezés adhat lehetőséget az iskola anyagi lehetőségeinek leghatékonyabb kihasználására.

A feladatmegoldás szintén elengedhetetlen a fizika tanítása során, de egyáltalán nem mindegy, milyen feladatok és a tanítási folyamat melyik szakaszában kerülnek közös vagy egyéni feldolgozásra. Meghatározó a feladatmegoldás célja, a tanulócsoport tudásszintje, valamint motivációja.

Mind a kísérleteknek, mind a feladatmegoldásnak fontos szerepe van, ezért alaposan át kell gondolni helyüket, módjukat, szintjüket az adott témakör feldolgozása során. Ehhez a tervezéshez is kiváló segítséget nyújt a jegyzet. A feladatok újszerű „típusát” alkotják a fényképpel vagy videóval illusztrált feladatok, amelyek esetében a pusztán számoláson túl más tevékenységet, például mérést (például időt, távolságot) is kell a diákoknak végezniük.

A feladatmegoldás ritkábban alkalmazott módszere a grafikus megoldás. Grafikon segítségével sok esetben könnyebben megoldhatók a feladatok, és olyanok megoldására is lehetőség nyílik, amelyek algebrai megoldásához a tanulók még nem rendelkeznek elegendő matematikai ismerettel. (Például nem tudnak még másodfokú egyenletet vagy egyenletrendszer megoldani.)

Kihívást jelent a tanár számára az osztály kiemelkedően tehetséges tanulóival való foglalkozás. Ehhez is kínál segítség a jegyzet. Így például áttekintést ad a különböző fizikaversenyekről, amelyekre a legjobb tanulók felkészítése is komoly feladat.

A tankönyv, a füzet és a tábla a tanítási-tanulási folyamat klasszikus segédeszközei, amelyek az informatika századában is fontos szerepet tölthetnek be mindaddig, amíg szerepüket szerves fejlődés eredményeként, maradéktalanul át nem veszik új segédeszközök. A diákok számára mindig rendelkezésre álló, hiteles szakmai segédeszköz a tankönyv (szerepét tekintve közömbös, hogy a könyv papír alapú, vagy elektronikus). A tankönyv azonban csak kiegészítője a tanórai munkának, így csak akkor lehet hatékony, ha a tanórai munka és a tankönyv jól összeillenek. A tankönyvválasztás fontos szaktanári (munkaközösségi) feladat. Sajnos igen elterjedt és nagyon helytelen gyakorlat, hogy sok tanár egyáltalán nem használ tankönyvet a fizikatanítás során. Ez lényegesen megnehezíti a diákok önálló tanulását, otthoni munkáját. A jegyzet részletesen tárgyalja a tankönyv szerepét és segítséget nyújt a tanárnak az egyéniségéhez és az osztály adottságaihoz legjobban illeszkedő tankönyv kiválasztásához és a tanítási folyamat és a tankönyv összhangjának gyakorlati megvalósításához.

A tanórát kiegészítő önálló tanulás másik meghatározó segédeszköze a diákok füzete. Ez azonban csak akkor töltheti be funkcióját, ha vezetése szakszerű, olvasható, áttekinthető. Erre szintén a tanárnak kell figyelnie. A füzetbe kerülő óravázlat döntő részben a táblára felírtak, felrajzoltak alapján készül. Ez segíti a diákot az önálló jegyzetelés elsajátításában, de a tananyag rögzülésében is szerepe van. A gondos füzetvezetés nevelő hatása! A füzetvezetés és a táblai tanári óravázlat fontosságáról a jegyzetben leírtak a módszertani szakirodalomban hiánypótlók.

Az információtechnológia fejlődése egyre több, a hagyományostól jelentősen különböző eszközt adott a tanárok kezébe. Számos számítógépes alkalmazás, videó, fénykép, szimuláció, kivetítés, intelligens tábla stb. áll rendelkezésünkre a tanítás hatékonyabbá tételéhez, a számítógépes világhálóról nem is szólva. Fontos azonban, hogy az új technika alkalmazása a fizikaórán ne váljék öncélúvá. Használatukat tanárnak, diáknak egyaránt meg kell tanulnia. A jegyzet ehhez is igyekszik segítséget nyújtani. A diákok nyitottak a „számítógépes világ” felé, gyorsan alkalmazkodnak az új lehetőségekhez, ezt kell kihasználni a tanórákon is, ahol ez a technológia motivációs eszközzé is válik. Az internet segítségével könnyen elérhetővé váltak olyan filmek, amelyek iskolában nem bemutatható kísérleteket és a fizikához kapcsolódó történelmi eseményeket mutatnak be. Egy kis érdekes „mozizás” mellett, hogy egy kis „legális” órai lazítás, motivációs erővel bír, megkönnyíti a tanulást. Mozgóelemző szoftverekkel a videón rögzített mozgások kiértékelésére is lehetőség van.

Nincs iskola számonkérés és értékelés nélkül, és ebben nem várható lényegi változás a jövőben sem. A jegyzet összefoglalja a számonkérés és az értékelés tartalmi lényegét, és technikai lehetőségek sokszínűségét. Hangsúlyozza, hogy a fizikaórán leginkább elterjedt írásbeli példamegoldás és tesztoldozat mel-

lett fontos szerepe van a sokszor mellőzött szóbeli számonkérésnek, de a gyakorlati készségek (kompetenciák) mérésének is.

Fogalomrendszerünkben a fizika tanítása általában az iskolai osztályteremhez és a tanórához kötődik. Kétségtelenül ez a tipikus, így annál meglepőbb, és a diákok számára szemléletformáló, ha a fizikai problémákkal nem csupán a fizika szakteremben foglalkozunk, hanem kivisszük azt szokatlan helyszínekre, udvarra, játszótérre, a havas hegyoldalra, uszodába, osztálykirándulásra stb. A helyszínhez illeszkedő fizikai problémák felvetése, helyszíni kísérletek, mérések, majd a hozzájuk kapcsolódó kiértékelések, számítások (ez utóbbiak már az osztályban történhetnek, esetleg házi feladatként is kiadhatók) jól érzékeltetik a gyerekekkel, hogy a fizikában tanultak mindennapi élethelyzetekben is jól alkalmazhatók. A jegyzet befe-

jező fejezete ilyen iskolán kívüli, rendhagyó fizika-órákhoz ad ötleteket, beleértve a fizikai szempontból fontos és érdekes tanulmányi kirándulásokhoz ajánlott helyszíneket.

A fentiekben igyekeztem bemutatni a sokunk által már régóta hiányolt jegyzet közelmúltban elkészült első kötetét. Természetesen tudom, hogy semmilyen ismertetés sem tudja helyettesíteni a saját tapasztalatokat. Jó szívvel ajánlom minden fizikatanár kollégának, hogy a jegyzetet maga is töltse le, nézzen bele, „kattintgasson benne”, majd kezdje el mindennapi munkájában is használni, gondolatébresztőként, referenciaként, ötletforrásként. Remélem, az első részt hamarosan követik a fizika további fejezeteit hasonló szelvényben feldolgozó kötetek is, hatékony segítséget adva munkánkhoz.

Jávor Márta

Horváth Gábor, Farkas Alexandra, Kriska György: A POLÁROS FÉNY KÖRNYEZETOPTIKAI ÉS BIOLÓGIAI VONATKOZÁSAI ELTE Eötvös Kiadó, Budapest, 2016, 485 oldal

A tankönyv, lévén a benne található tudásanyag gondosan felépített és jól követhető, mindenképp előtt témakörönként rendezett munkanapló, hiszen a mondanivaló minden fejezetben saját kutatásokhoz és eredményekhez kapcsolódik. A poláros fényről a ket-tősen törő kristály, a látványosan indokolható Brewster-törvény és a valóban térhatású 3D filmek ugranak be. Ha nagyon igyekszem, előkerülnek bonyolult összefüggések a törés és visszaverődés intenzitásvi-szonyairól, de inkább csak úgy, hogy tudom, melyik könyvet, hol kell kinyitnom hozzájuk. Ezek után nagy élmény találkozni egy négy és félszáz oldalas könyvvel a poláros fény környezetoptikai és biológiai vonatkozásairól. Nincs szükség előzetes felkészülésre, csak elszánt odafigyelésre.

A polarizációs szög (-irány) és a polarizációfok segítségével jól jellemezhető egy fénysugár lineáris polarizációs állapota: „Ha egy adott hullámhosszúságú fényben az elektromágneses rezgés egyetlen irányban történik, akkor teljesen lineárisan poláros fényről beszélünk, a rezgés iránya pedig polarizációiránynak nevezzük. Ekkor a lineáris polarizációfok $d = 100\%$.” (16. oldal)

Az égbolt (egy adott helyen és adott időben) ezekkel az egyszerű jellemzőkkel ábrázolt polarizációs mintázatának átlátása, jelentésének megértése azonban odafigyelést, magasabb szinten jártasságot igényel. A jártasság megszerzésére a könyv olvasása során mind több lehetőségünk adódik, hiszen mint utá-

zónak a térképek, a poláros környezetoptikát tanulmányozóknak a polarizációs minták bemutatása adja a pontos fogalmazás lehetőségét.

Megtudjuk, hogy miképpen alakult ki a kezdeti nehézkes mérésekből a mai, halszemoptikával ellátott, lineáris polárszűrővel felszerelt digitális fényképezőgép adatainak számítógépes feldolgozása. Az optika történetére is kellő hangsúly kerül, hiszen a polarizációs jelenségek értelmezése során alakult ki a fény, mint transzverzális elektromágneses hullám képe.

Az égboltfény polarizációját *François Arago* francia fizikus, csillagász fedezte fel és vizsgálta a 19. században és azt találta, hogy „... az égboltnak a Nappal átellenes oldalán lévő antinap felett, az antiszoláris meridián egy pontjában a polarizációfok zérus, vagyis az innen jövő fény polarizálatlan, azaz semleges (neutrális)”. (33. oldal)

A 19. század közepéig még további két neutrális pontot, a Babinet- és Brewster-pontokat sikerült megtalálni. Csak a 20. század végén, elsősorban magyar kutatók mérései mutatták ki a korábban megjelölt negyedik neutrális pont létezését, amely polarizálatlan pontot azonban csak kilométerekkel a földfelszín fölé emelkedve lehet mérésrel megtalálni. Valóban, 2001-ben több sikeres felszállás után magyar kutatók írhatták le: „Összefoglalásul megállapíthattuk, hogy hőlégballonos polarometria méréseinkkel a világon elsőnek sikerült kísérletileg bizonyítanunk a 4. neutrális pont létét.” (53. oldal)

Az égbolt polarizációs mintázatának ismerete nem öncél, számos állatnak ez jelenti a tájékozódási lehetőséget, ezért a különböző fokú felhőzottség hatásának ismerete a polarizációs viszonyokra alapvető fontosságú. Magát a felhőzottséget is minősíteni és mérni kell, ez is megfelelő teret kap a könyvben. Vannak éjszaka vadászó és repülő állatok, amelyek a különböző holdfázisok idején a polarizációs minták szerint tájékozódnak, ezért az éjszakai égboltot is meg kell ismerni. Különleges mérési-modellezési feladat a teljes napfogyatkozáskori égbolt-polarizáció felderítése. A mérések szerint ilyenkor csak a totalitás (a 98%-ot meghaladó naptakarás) néhány percig tartó ideje alatt válik felismerhetetlenné az ég addig keveset változó polarizációs mintázata. Ezen idő rövidsége segítheti az irányt vesztett állat túlélését, bár a házimehek éppen ilyenkor tévedhetnek el és zömük nem ér vissza a kaptárba, a méhészek bánatára.

Számos, fénypolarizáció alapján tájékozódó élőlény szempontjából fontos a vízfelszín polarizációja. A leginkább szembetűnő különbség a sekély és világos, valamint a sötét és mély vizek polarizációs mintázatai között adódik. Ennek részletezése a következő fejezetekre, a fénypolarizáció érzékelésének tárgyalása utánra marad.

Ugyan az állatvilágban elég széles körben van szerepe a poláros fénynek, a könyvben ismertetett kutatások túlnyomóan a fény polarizációjára érzékeny rovarokkal foglalkoznak. Ennek megfelelően a rovarok összetett szemének különböző modelljeivel találkozunk. Ezek a modellek remekül szemléltetik a rovarok látásmechanizmusát. A látópigment-molekulák párhuzamos állása a receptorsejtek mikrobolyhainak hossz tengelyével szemléletes kapcsolatban van a poláros fény rezgési síkjával.

A könyv harmadánál eljutottunk oda, hogy az olvasók a polarizációfok és polarizációs szög eloszlásával jellemzett polarizációs mintázatokban kiismerik magukat. A fény polarizációs állapotára érzékeny rovarszemek működése sem ismeretlen. Jöhetnek tehát a polarizált fény észlelése által motivált viselkedés következményeit taglaló esettanulmányok. A szerzőknek és munkatársaiknak bő húszévi munkájáról szólnak a könyv fejezetei. Az egyes témák kifejtése során a szerzők lekötik figyelmünket a biológiai mondanivalóval, de érdemes odafigyelni, hogyan alakult ki a történet. A tiszavirág mindenki számára a gyorsan ellobbanó életet jelképezi, és esetleg még arról is halottunk, hogy erős fényű lámpákkal meg lehet zavarni a folyó feletti rajzását. *A tiszavirág fénypolarizáció alapú vízdetekciója* című alfejezetben fóliás kísérletek sorozatáról olvashatunk, amelyek alátámasztják a régebbi tapasztalatot, hogy „a tiszavirág rajzásakor két viselkedésforma (vízkövető és vízkereső repülés) jellemző, melyek kiváltásában az erősen és vízszintesen poláros, megfelelően nagy kiterjedésű vízfelület megléte vagy hiánya jelenti a kulcsingert”. (147. oldal) Öröndetes, hogy az utóbbi években a Duna bizonyos szakaszain ismét megfigyelhető a dunavirágok rajzása. Ennek, a tiszavirágnál kisebb termetű, a

könyv borítóján is látható kéreszfajnak tömegeit vonzák magukhoz az erősfényű fényforrások.

Kiterjedt vizsgálatok mutatták ki, hogy a fényforrások bizonyos elhelyezkedésénél a vonzó hatás csupán a forrás intenzitásán múlik, míg egyéb helyzetekben a fény vízszintes polarizációja a vonzó hatás kulcsa. A poláros fényhez vonzódó rovarok nem tesznek különbséget aközött, hogy a poláros fényt az életfeltételüket jelentő vízfelület vagy olajfolt, netán egy kivilágított híd szolgáltatja. A poláros fényszennyezés elkerüléséhez nélkülözhetetlen adat az egyes fajokra jellemző d^* polarizációs ingerküszöb, ami „...a d lineáris polarizációfok azon minimális értékét jelenti, ami még képes pozitív polarotaxist kiváltani”. (172. oldal) Ennek a megállapítása különböző színű folyadékcsapdák – különböző polarizációfokú, vízszintesen poláros fényt tükröző étolajtálcák – segítségével történt, a befogott rovarok számának összehasonlításával.

A könyv csaknem felét kitevő 3. fejezet a poláros fényszennyezéssel és a poláros ökológiai csapdákkal foglalkozik. A kuwaiti kőolajtavak és a budapesti parkurató csapdájába került rengeteg rovar és madár végzetes sorsáért is elsősorban a vizet kereső állatok vízszintesen poláros fényre érzékeny látása felelős. A természetben a vízszintesen poláros fény biztonsággal vezet vízfelülethez, és még az összetettebb helyzetérzékelésre képes madarak is megtévednek a tikkasztó sivatagi környezetben, bár az ő polarizációalapú vízdetekciójuk még nincsen bizonyítva vagy cáfolva. Nagy felületű sötét és világos fóliákkal végzett kísérletek segítségével mutatták ki a polarotaktikus rovarok csapdába esésének folyamatát, időbeli lefolyását.

A vízhez kötött életformájú szitakötők számára ökológiai csapdának bizonyultak a fényes fekete sírkövek is. A fényes fekete felületek polarizációs mintázata a mérések szerint a vízfelszint idézi, és a szitakötők itt rakják le petéiket, amelyek hamar elpusztulnak. (Részben e kutatási eredmény kapta a 2016. évi fizikai IgNobel-díjat.) Ugyanígy poláros fényszennyezőknek bizonyultak a piros és fekete autók, amelyek parkolás közben is vízirovarok tömkelegét csábíthatják magukhoz. Megvizsgálták fehér, fekete, sárga és piros autók motorháztetejének polarizációfokát, és valóban csaknem tízszeres eltérés adódott a fekete és a piros javára. Érdekesség, hogy a piros színt a vízirovarok nem látják, a spektrum zöld, kék és UV tartományában azonban a piros felületek fénypolarizációs mintázatai gyakorlatilag olyanok, mint a feketéké.

A manapság terjedő autódívat, a matt fekete és matt szürke bevonatok alkalmazása azt a reményt keltette, hogy az autókrosszérik vízirovarokat vonzó hatása jelentősen csökkenni fog. A részletes vizsgálatok és összehasonlító terepkísérletek számos különbségre mutattak rá a fényes/matt – fekete/szürke felületek polarizációs tulajdonságaiban, de a jelentős vonzó hatás minden esetben jelen volt.

A Duna-parti magas épületek lakói évek óta találkoznak tavaszi alkonyatkor a tömegtegzés rovarok rajzásával, az ablakok mellett összegyűlő rovarfélékkel. A Duna-lakó tegzesfaj nevéből láthatóan tö-

mege, azonban nem közismert. Rajzások a magas üvegépületek körül kikerülhetetlen kutatási témának bizonyult, hiszen az ELTE Természettudományi Kara is magas Duna-parti üvegépület lakója. Részletes kutatómunka bizonyítja, hogy a tömegtegzés rajzása az üvegfalak vonzásában elsősorban a vízirovarok polarotaxisának következménye. A vízirovarok polarizációs ökológiai csapdájaként működő városi üvegépületek poláros fényszennyezésének csökkentésére nyolc pontból álló ajánlás zárja a fejezetet.

A könyvben eddig a polarizációs ökológiai csapdák elkerülése és a veszélyeztetett állatok védelme volt a cél. A bögyölyök polarotaxisát csípésük elkerülésére lenne érdemes kihasználni, amely csípés (harapás) nemcsak fájdalmas, de fertőzésveszéllyel is jár. Részletes vizsgálatokkal mutatták ki, hogy a potenciális áldozatok közül „a bögyölyök számára az a legvonzóbb, aminek felületéről visszavert fény vízszintesen poláros és polarizációfoka a legnagyobb”. (342. oldal) Így a bögyölyök kevésbé vonzódnak a világos, mint a sötét szőrű emlősökhöz. Mindezek alapján az a 2016-os fizikai IgNobel-díjjal jutalmazott hasznos tanács adható a barna vagy fekete szőrű lovak gazdáinak, hogy takarják le állataikat fehér vászonnal. Annál érdekesebb a zebrák által megvalósított trükk, a keskeny fekete-fehér csíkos zebraször. A bögyölytámadások száma ugyanis nem a fekete és fehér szőrű lovak elleni támadások között helyezkedik el valahol középen, hanem kisebb a fehéreknél is.

Magától értetődően adódtak a terepkísérletek a polarotaktikus bögyölyök harapásainak száma és a testfelület foltossága közötti kapcsolat kiderítésére. A bögyölyök polarotaktikus viselkedésével kapcsolatos ismeretek felhalmozódása elvezetett az új típusú, fénypolarizációs elven működő bögyölycsapdák kialakításáig, és valóban kreatív megoldások születtek. Azonban az összefoglaló tanulságot nem lehet elkerülni: „A napelemes bögyölycsapda piaci bevezetésének lehetőségét még tanulmányozni kell.” (392. oldal)

A zárszó előtti utolsó fejezet kultúrtörténeti ajándék a széles körben érdeklődő olvasók számára: *Az égbolt polarizációs viking navigáció hipotézise és kísérleti vizsgálata*. A vikingekről, tengeri kalandozásaikról, mágneses iránytű nélküli tájékozódásukról sokat megtudunk. A nap-iránytű használata sem volt egyszerű, de borult időben a Nap helyzetének megállapítására nem volt megbízható módszer. Felmerült, hogy az égbolt felhős, borús időben is megőrződő polarizációs mintázata lehetett a megoldás, amit napkőnek nevezett turmalin vagy kalcitkristályok forgatásával vizsgálhattak. A felmerült hipotézist részletes vizsgálat nélkül, a viking sagákban napkövekre tett utalások alapján elfogadták és ötven éve tényként kezelik. A szerzők és munkatársaik mai eszközökkel a viking navigáció meteorológiai és légköroptikai feltételeit vizsgálták, terepi pszichofizikai vizsgálatokat végeztek, a navigáció egyes lépéseit laboratóriumban ellenőrizték. Ezek a kutatások napjainkban is folynak.

A *Zárszó* tanmese formájában foglalja össze az eddig elmondottakat. *Darwin* vicces Mikulás-figurája képviseli az evolúciót, akitől kérni kell a valóságban hosszú idő alatt kialakult tulajdonságokat: Darwin poláros tanácsokkal látja el a látásával elégedetlen méhet; becsíkozta a zeb-rát a vérszívó bögyölyök ellen, bölcs tanácsadóként fog-

lalja össze a könyv esettanulmányait. Darwin nem teremtető, csak tudós tanácsadó, és távolról sem mindenható: „Darwin sajnos nem tudta orvosolni a viking azon jogos panaszát, hogy felhős, ködös időben, mikor a Nap nem látszik, gyakran annyira lecsökken az égboltn fény polarizációfoka, hogy a Haidinger-pamacs nem észlelhető. Ilyenkor tehát a viking nagy eséllyel eltévedt a tengeren.” (451. oldal)

Magá a könyv sem tökéletes, csak nagyon jó. Rendkívül sok mindenről szól magas színvonalon, közérthetően. De nincs tárgymutatója, sem névmutatója, így aki tárgyszó vagy név alapján érdeklődne, az nagy eséllyel eltéved a szöveg dzsungelében.

Füstöss László



FROM TEACHERS
FOR TEACHERS



2017. JÚNIUS 29. – JÚLIUS 2.

INVENTING THE FUTURE OF SCIENCE EDUCATION

SCIENCE ON STAGE FESZTIVÁL 2017, DEBRECEN

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

SCIENCE ON STAGE 2017
DEBRECEN

THE EUROPEAN NETWORK OF SCIENCE TEACHERS

SZERVEZŐK:



Debreceni Egyetem
UNIVERSITY OF NATIONAL EXCELLENCE
HUNGARY

