

fizikai szemle



2021/6

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat havonta megjelenő folyóirata.

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

Főszerkesztő:
Lendvai János

Szerkesztőbizottság:
Bíró László Péter, Bokor Nándor, Czitrovsky Aladár, Füstöss László, Gyürky György, Hebling János, Horváth Dezső, Horváth Gábor, Iglói Ferenc, Kiss Ádám, Ormos Pál, Papp Katalin, Simon Ferenc, Simon Péter, Sükösd Csaba, Szabados László, Szabó Gábor, Takács Gábor, Trócsányi Zoltán, Ujvári Sándor

Műszaki szerkesztő:
Kármán Tamás

A folyóirat e-mailcíme:
szerkesztok@fizikaiszemle.hu
A lapba szánt írásokat erre a címre kérjük.

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

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



A címlapon:

Tiziano Vecellio (1488/90–1576) Sziszüphosz című festménye a madridi Pradóban. Aktualitását az ideai biológiaérettségi adja, lásd az írást a 204–208. oldalakon.

TARTALOM

Cseb József: Égi harmónia és dinamikai algebra 181
Kepler több mint 400 éves sejtésének és Bartut 30 éves modelljének vizsgálata exobolygórendszerek adatai alapján.

Csedreki László, Gyürky György, Szücs Tamás: Az Univerzum születésének vizsgálata a föld alól 185

Az olaszországi Gran Sasso Nemzeti Laboratóriumban, mélyen a föld alatt elvégzett kísérletekből a korábbiaknál sokkal pontosabban ismerjük a deuteron kialakulásához kapcsolódó $D(p, \gamma)^3\text{He}$ reakció hatáskeresztmetszetét. Így a BBN (standard ősrobbanás kori nukleoszintézis) modell alapján még nagyobb biztonsággal határozható meg a barionos anyag sűrűsége az Univerzumban.

Angeli István: Út a nagyszögű alfa-szóráshoz 190

Az írás részletesen elemzi a Rutherford-modell megszületéséhez vezető út állomásait.

A FIZIKA TANÍTÁSA

Nógrádi Zsófia: Szabadulószoza a fizikaórán 198

Ötletek olyan szabadulószozas feladatok megalkotásához, amelyek megmutatják, hogy a hétköznapi eszközök működésében, tervezésében milyen fontos a fizika.

Horváth Gábor, Vass Miklós: Egy biológiaérettségi-feladat biomechanikai hibái 204

Az idei emelt szintű biológia írásbeli érettségi V/9. feladata hibás. A cikk rámutat a hibára, közli a biomechanikai szempontból helyes feladatot és megoldását, valamint elemzi a problémát, ami jóval összetettebb az eredetinél.

Tóth Kristóf: Modell kvantummechanika középiskolában 209

A cikkben bemutatott módszer célja, hogy a középiskolás diákok kísérletezés révén fedezzék fel a kvantumvilág alaptörvényeit és matematikai formalizmusát kétállapotú rendszerekben.

HÍREK – ESEMÉNYEK

Kovách Ádám, 1933–2021 215

Radnai Gyula, 1939–2021 (Lendvai János) 216

Mezei Ferenc kapja a 2021. évi Lise Meitner-díjat 216

J. Cseb: Celestial harmony and dynamic algebra

L. Csedreki, Gy. Gyürky, T. Szücs: Examination of the birth of the Universe from below the Earth

I. Angeli: Road to the wide angle alpha scattering

TEACHING PHYSICS

Zs. Nógrádi: Escape room in physics class

G. Horváth, M. Vass: Biomechanical mistake of a biological graduation example

K. Tóth: Model quantum mechanics on secondary school level

EVENTS

Ádám Kovách, 1933–2021

Gyula Radnai, 1939–2021 (J. Lendvai)

Ferenc Mezei receives the 2021 Lise Meitner Award

„Világűr és mennyboltozat
sok forgó égi kapcsolat”

(Weöres Sándor: *Öröklét*)

„Oh tárd ki, tárd ki végtelen nagy ég,
Rejtélyes és szent könyvedet előttem”

(Madách Imre: *Az ember tragédiája*)

Több mint négyszáz évvel ezelőtt történt, hogy *Johannes Kepler* feltárta a bolygómozgás törvényeit. Ezáltal nemcsak az égi mechanika alapjait vetette meg, hanem azt is lehetővé tette, hogy *Isaac Newton* erre alapozva megtalálja a tömegvonzás erőtvényét. Korszakalkotó felfedezés volt, sokan ezt tekintik a modern természettudomány kezdetének.

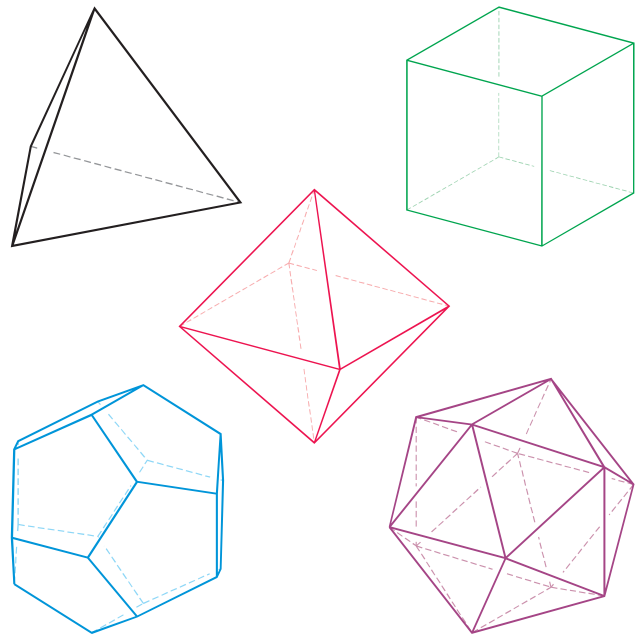
És mégis, Keplernek volt egy olyan elvárása, ami nem teljesült. Azt remélte, hogy a bolygórendszer megtestesíti az égi harmóniát. Ez a következő jelentené. Az ő idejében hat bolygó volt ismeretes, és a harmonikus arányosságnak azt gondolta, ha ezek pályáit az öt platóni tökéletes test (tetraéder, oktaéder [kocka], hexaéder, ikozaéder, dodekaéder) viszi át egymásba [1, 2] (amint az 1. ábra mutatja). Vagyis: a legbelső bolygó pályája köré írunk egy érintő testet, amelynek csúcsai meghatározzák a következő bolygó pályájának felületét, és így tovább, amíg előáll a teljes bolygórendszer (2. ábra). Mint tudjuk, ez az elvárás nem bizonyult helytállóknak.

Newton gravitációs törvénye természetesen megmagyarázza a bolygómozgás tulajdonságait. Hiszen alkotója azokból következtette ki. De arra a kérdésre, hogy a bolygóknak milyen távol kell elhelyezkedniük a Naptól, nem ad választ. A newtoni mechanika szempontjából a kérdés a (bonyolult) kezdőfeltételek hatáskörébe tartozik; a választ nem tudjuk, egész más elhelyezkedésük is lehetne.

Az [5] hivatkozás, amelyen a jelen ismertető alapul szabadon elérhető: <https://www.mdpi.com/2073-8994/12/12/2109> (az itt bemutattnál kicsit több részlettel). A jelen munka a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból biztosított támogatással, a K18 pályázati program finanszírozásában valósult meg a K 128729 számú projekt keretében. A szerző köszöni *Riczu Gábor* technikai segítségét és az *ifjabb Györgyi Gézával* folytatott hasznos diszkussziót.



Cseh József az ATOMKI tudományos tanácsadója. Kutatási területe az atommagok szerkezete és a szimmetriák szerepe. Mostanában főként azt a kérdést tanulmányozza, hogy miként tudnak kapcsolatot teremteni a szimmetriák különböző soktestmodellek között. A magszerkezet alapvető leírásai ugyanis eltérő fizikai képekre épülnek (héjszerkezet, folyadéksepp, fűtődés), ám – úgy tűnik – ezeket alkalmas szimmetriák képesek egységbe foglalni.



1. ábra. Az öt tökéletes test.

Léteznek empirikus formulák, amelyek megadják a bolygótávolságokat. A legismertebb a Titius–Bode-formula. E szabálynak azonban nincs valódi elméleti alapja, és alkalmazása (a bolygók számozása) sem teljesen következetes. (Többé-kevésbé hasonló a helyzet az egyéb empirikus formulákkal is.)

E cikkben egy olyan sejtést vizsgálunk meg, amelyet *Barut* a 20. század végén fogalmazott meg [3], és ami a Kepler-probléma rejtett szimmetriáján alapul. (Kepler-problémának nevezzük a nagy tömegű Nap gravitációs terében keringő bolygó mozgását.) Barut modellje jól leírja a Naprendszer bolygópályáit. Ennek ellenére nem nagyon ismeretes. Itt azt vesszük szemügyre, hogy az exobolygórendszerekre nézve helytálló-e ez a szimmetriamegfontolás alapján származtatott szabály.

A következő fejezetben röviden megemlítünk néhány összefüggést, amelyeket a bolygótávolságokra nézve alkalmaznak, különös tekintettel Barut sejtésére. Azután a Kepler-probléma szimmetriáit mutatjuk be dióhéjban, amelyek a modell alapjául szolgálnak. Végül néhány exobolygórendszer példáján összevetjük az elméleti elvárást a megfigyelt adatokkal.

A bolygópályák transzformációja

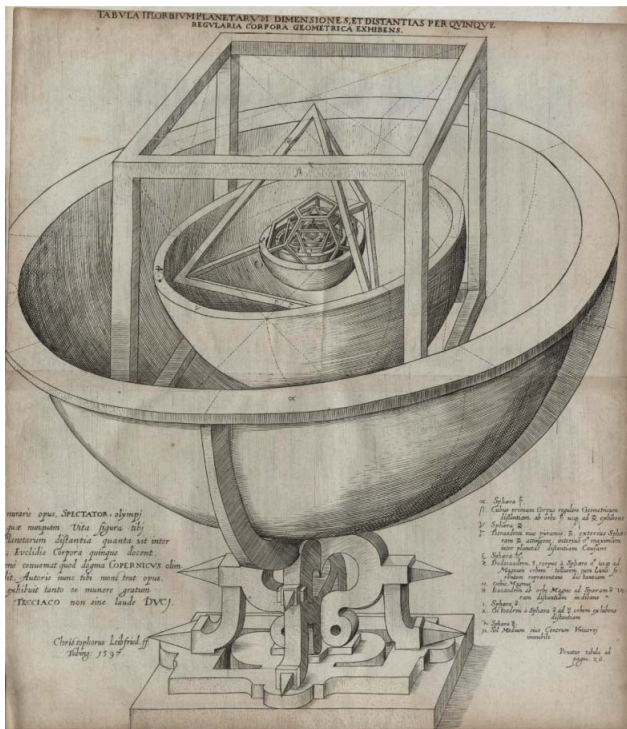
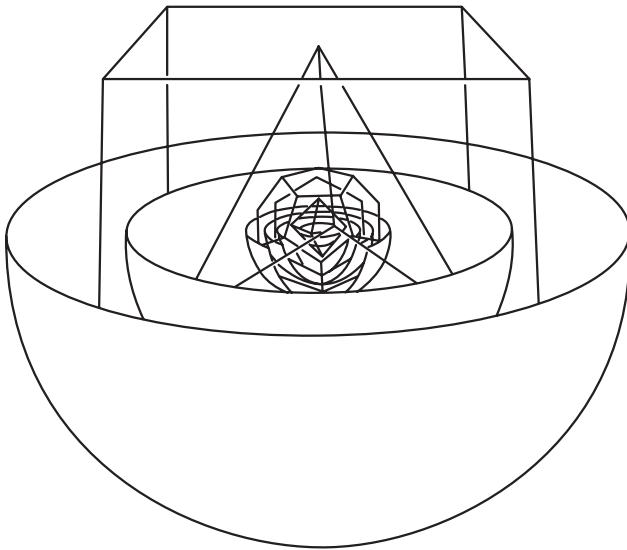
A Titius–Bode-szabály szerint a bolygók fél nagytengeleynél csillagászati egységekben mért – amely eredeti definíciója szerint a Föld Nap körüli pályájának fél nagytengelelyével egyenlő – hossza az

$$R_n = 0,4 + 0,3 \cdot 2^n$$

formulából származtatható, ahol n az egyes bolygók „sorszám”, mégpedig

- $n = -\infty$ a Merkúr,
- $= 0$ a Vénusz,
- $= 1$ a Föld,
- $= 2$ a Mars,
- $= 3$ a Kisbolygóöv,
- $= 4$ a Jupiter,
- $= 5$ a Szaturnusz,
- $= 6$ az Uránusz és
- $= 7$ a Pluto esetére.

2. ábra. Kepler eredeti elképzelése (az akkor hat bolygót tartalmazó) bolygórendszerünkről (fölről) és a *Mysterium Cosmographicum*-ban megjelent rajz (alul). A hat bolygópálya koncentrikus gömbhéjait az öt érintő tökéletes test viszi át egymásba.



A szabály nem ad számot a Neptunusról, és amint látszik, a bolygók sorszáma nem teljesen reguláris. (Habár ma nem tekintjük bolygónak a Plutót, itt mégis megemlítjük, mert a korábbi vizsgálatokban belefoglalták.)¹

Egy másik formulát az

$$\frac{m v^2}{R} = \frac{G M m}{R^2}, \rightarrow v^2 R = G M$$

mozgásegyenletből származtattak, amit kvantálva:

$$v_n R_n = n \sigma$$

adódik. E szabály alkalmazása hasonló eredményt hozott, mint a Titius–Bode-formuláé: elfogadható módon reprodukálta a bolygótávolságokat, de a sorszámmok nem követnek szabályos rendet és a kvantálásnak egyik esetben sincs elméleti alapja.

Léteznek még más empirikus szabályok is, de ezek további részletezése helyett inkább vegyük szemügyre a rejtett szimmetria által sugallt transzformációt!

Barut a Naprendszer bolygóit tanulmányozta [3], és azt találta, hogy azok keringési ideje, sebessége és

¹1741-ben, amikor a bolygótávolságokat még csak egymáshoz viszonyítva ismerték, *Christian von Wolff* német csillagász észrevette, hogy a bolygótávolságok számsorában valami különös tapasztalható. A távolságok nem véletlenszerűek, hanem valamilyen törvényszerűség szerint követik egymást. A valódi távolságtól való eltérés (a sorba nem illeszthető Neptunuszt, illetve az Eris leszámítva) minden bolygó esetében 5%-on belül van.

E törvényt *Johann Daniel Titius* német csillagász–matematikus említette először 1766-ban. Erre talált rá 1772-ben *Johann Elert Bode*, a berlini csillagvizsgáló igazgatója, aki 1778-ban öntötte végleges formába.

Sok csillagász úgy gondolta, hogy ez csupán véletlen számtani egyezésnek tűnik, számokkal való játéknak, különösebb tartalom nélkül. Az egyezéseket azonban mégsem lehetett egyszerűen figyelmen kívül hagyni. Annak ellenére, hogy a törvény a nagyobb teljesítményű távcsövek megjelenése előtt jelent meg, figyelemre méltó előrejelzéseket adott. A szabály látszólagos igazolására először 1781-ben került sor, mikor *William Herschel* felfedezte az Uránuszt. Az eredmények alapján az 1700-as évek végén rendszeresen kutatva kezdtek el keresni a 2,8 CsE távolságban keringő „hiányzó” bolygót. 1801. január 1-jén *Giuseppe Piazzi* felfedezte a hiányzó, új „bolygót”, a Cerest. Ahhoz túl kicsi volt, hogy a hiányzó bolygó hézagát „betömje”, de újraélesztette a Bode-szabály érvényességébe vetett hitet. Ennek hatására ezen a pályán egymás után több kisebb égitestet fedeztek fel (Pallas – 1802, Juno – 1804, Vesta – 1807). 1846-ban a francia *Urbain Leverrier* és az angol *John C. Adams* egymástól függetlenül kiszámították az Uránusz pályaháborgásaiból egy lehetséges külső bolygó pozícióját, amit *Johann Gottfried Galle* fedezett fel. Távolságára 30,1 CsE-t mértek, a Bode-szabály szerint 38,8 CsE-nek kellett volna lennie.

A Titius–Bode-szabályra elméleti bizonyosság nincs, de valószínűleg a pályarezonancia és a szabadságfokok hiányának kombinációjával magyarázható: bármilyen stabil bolygórendszerben viszonylag magas valószínűséggel létrejön egy Titius–Bode-féle összefüggés. Emiatt inkább szabálynak, mintsem törvénynek lehet nevezni.

A nagyobb keringő testek pályarezonanciái olyan régiókat hoznak létre a csillag körül, amelyekben nem alakulhatnak ki hosszú időn keresztül stabil bolygópályák. Másféleképpen fogalmazva ez azt jelenti, hogy a stabil pályák a csillagtól mért bizonyos távolságokra korlátozódnak. A bolygókeletkezési szimulációk eredményei alátámasztják az elképzelést, hogy egy véletlenszerűen választott stabil bolygórendszer pályái valószínűleg kielégítenének egy Titius–Bode-szerű szabályt.

(Wikipedia alapján)

naptávolsága jó közelítéssel egyenesre esik, ha a sorszámok függvényében ezen mennyiségek logaritmusát ábrázolja. A sorszámok pedig regulárisak: 1. a Merkúr, 2. a Vénusz, 3. a Föld, 4. a Mars, 5. a Kisbolygóöv, 6. a Jupiter, 7. a Szaturnusz, 8. az Uránusz, 9. a Neptunusz és 10. a Pluto. Továbbá felfedezte, hogy az egyszerű idő- és térdilatáció:

$$\begin{aligned} t &\rightarrow e^{3\lambda n} t, \\ x &\rightarrow e^{2\lambda n} x, \end{aligned} \quad (1)$$

amely a

$$\begin{aligned} \log v_n &= \log v_0 - \lambda n, \\ \log R_n &= \log R_0 + 2\lambda n, \\ \log T_n &= \log T_0 + 3\lambda n \end{aligned} \quad (2)$$

egyenletekre vezet, egymásba viszi át a bolygópályákat. Itt λ egy konstans, de ezzel az egyetlen paraméterrel bármely bolygópályát megkaphatjuk, ha már egyet ismerünk.

Ezek a dilatációk olyan transzformációk, amelyek összhangban vannak a Kepler-probléma $O(4,2)$ dinamikai algebrájával (lásd alább). Megjegyzendő azonban, hogy n -et egész számnak választva a leírásba itt is beépítünk egy kvantálást, amelynek nincsen valódi elméleti magyarázata. (A [3] munkában Barut ezzel kapcsolatban megjegyzi, hogy például a hidrogénatomban az impulzusmomentum kvantált voltát a kvantummechanika is csak leírja, de nem magyarázza.)

Barut javaslata maradéktalanul kielégíti Kepler eredeti elvárását: ha ismerjük egy bolygó pályáját, akkor a bolygórendszer többi tagjának viselkedését abból egyszerűen meg tudjuk határozni. Ezen eljárás során a bolygók a természetes sorszámukat viselik. Továbbá a szerző külön érdeme, hogy a transzformációt a Kepler-probléma sajátosságából származtatta [3].

A Kepler-probléma szimmetriái

A Kepler-probléma alapvető fontosságú nemcsak a klasszikus, hanem a kvantummechanikában is. Ott hidrogénatomnak hívják. Szimmetriáinak feltárásához lényeges hozzájárulást adott mind a klasszikus, mind a kvantumelmélet. Itt most a kötött állapotokat vizsgáljuk, az energia negatív és a pályák ellipszisek. A kérdéses szimmetriák egy hierarchikus rendbe szerveződnek.

Geometriai szimmetria: a probléma nyilvánvaló szimmetriáját a háromdimenziós tér forgatása jelenti, amely változatlanul hagyja az x_i térkoordinátákból képzett $x_1^2 + x_2^2 + x_3^2$ kvadratikus alakot. E szimmetria következményeként az impulzusmomentum megmaradó mennyiség. Azért hívjuk geometriai szimmetriának, mert a geometriai változókat, nevezetesen a térkoordinátákat transzformálja egymásba, nem keveri őket más mennyiségekkel. Változatlanul hagyja nem-

csak a teljes Hamilton-függvényt (energiát), hanem külön-külön a kinetikus és a potenciális részét is.

Dinamikai szimmetria: az impulzusmomentumon kívül a Kepler-probléma rendelkezik egy másik megmaradó vektorral is, amit Laplace- vagy Runge-Lenz-vektornak hívnak. A hat mozgásállandó együttesen alkotja az $O(4)$ algebrát, amely megőrzi az $x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2$ kvadratikus formát. Az $O(3)$ szimmetriával ellentétben azonban az $O(4)$ -nek nem minden transzformációja hagyja változatlanul a potenciális és kinetikus energiát külön-külön, hanem csak az összegüket. $O(4)$ specifikus az $1/r$ alakú potenciálra, ezért dinamikai szimmetriának hívjuk.

Az $O(4)$ szimmetriát *Fock* és *Bargman* fedezte fel, és *Györgyi Géza* találta meg azt a teret, amelyben a négydimenziós transzformációk működnek [4]. A probléma olyan tárgyalását adta, amelyben egy négydimenziós gömb főkörain lezajló inerciamozgással van dolgunk. E leírásban a pályák tökéletesek (körök), a háromdimenziós tárgyalás gravitációs ereje pedig eltűnik.

A szimmetriaalgebrák által generált transzformációk az azonos energiájú pályákat viszik át egymásba.

Dinamikai algebra: ez a fogalom a kvantummechanikában született és sokáig nem is volt ismeretes, vajon alkalmazható-e a klasszikus elméletben. Noha jelen mondanivalónk szempontjából nincs rá szükségünk, mégis – annak érdekében, hogy a feladatot érzékletessé tegyük – álljon itt a kvantumos értelmezés. A dinamikai algebra olyan algebra, amely egyfelől tartalmazza a rendszer szimmetriaalgebráját, másfelől egyetlen irreducibilis ábrázolása megadja a rendszer minden állapotát, továbbá elemeivel a fizikai mennyiségek operátorai kifejezhetőek. Távrolról sem nyilvánvaló, hogy van-e ennek klasszikus megfelelője és ha igen, mi az. Idővel mégis sikerült a klasszikus mechanikában is értelmezni.

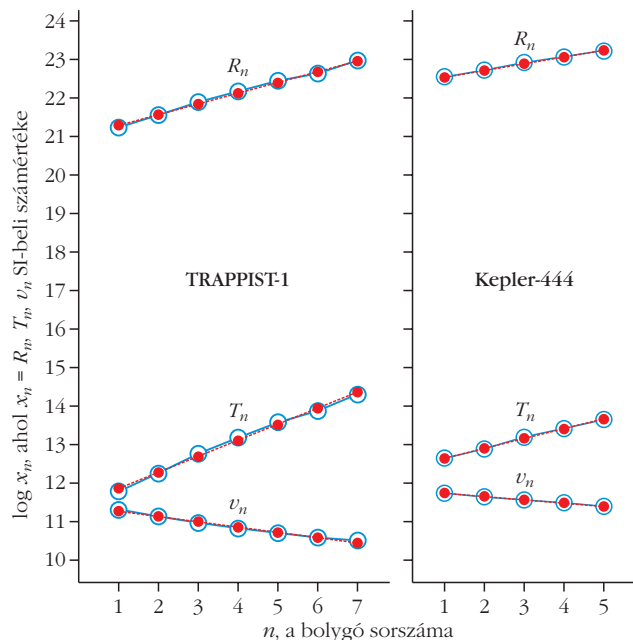
A dinamikai algebrát a rendszer összes mozgásállandója feszíti ki, beleértve azokat is, amelyek explicit módon függenek az időtől. Első pillantásra furcsán hangzik, hogy explicit időfüggéssel rendelkező mozgásállandóról beszélünk, de emlékezzünk rá: egy fizikai mennyiség idő szerinti teljes differenciálhányadosa a parciális derivált és a Poisson-zárójel összege. Tehát akkor is lehet nulla, ha a parciális derivált nem nulla.

A dinamikai algebra által generált transzformációk a különböző energiájú pályákat is át tudják vinni egymásba.

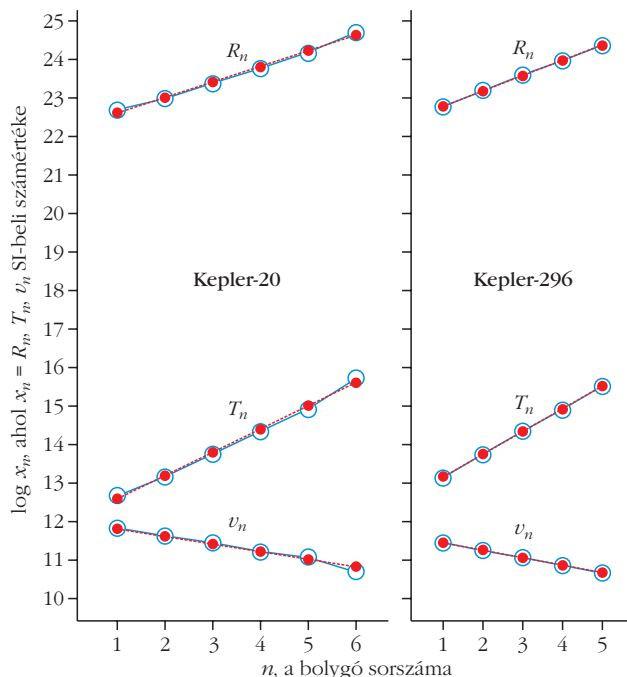
A Kepler-probléma dinamikai algebrája a hatdimenziós $O(4,2)$ algebra, amely a koordináták

$$x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 - x_5^2 - x_6^2$$

kvadratikus alakját hagyja változatlanul [3]. (Ezen algebrának létezik olyan ábrázolása, amely az előző bekezdésekben említett explicit időfüggést mutatja.) Elemei többféle transzformációt generálnak, közöttük dilatációt is, és ez a tény vezette Barutot az előzőekben bemutatott (1) tér- és időtranszformációhoz, amely a (2) egyenletekkel összekapcsolja a bolygópályákat.



3. ábra. Exobolygórendszerek megfigyelt adatainak – v az átlagos pályasebesség, T a keringési idő, R a fél nagytengely SI-ben kifejezett számértékei – összevetése az elméleti elvárással (a 2. egyenletek szerint) logaritmus skálán. Az észlelt adatokat körök jelzik, folytonos vonallal összekötve, a számolt értékek pontok, szaggatott vonallal. A bolygórendszerek elnevezése gyakran a felfedezésükben meghatározó szerepet játszó obszervatóriumra utal. A chilei Atacama-sivatagban található a TRAPPIST robotteleszkóp, a Kepler pedig űrtávcső. $\lambda_{\text{TRAPPIST-1}} = 0,139$ és $\lambda_{\text{Kepler-444}} = 0,084$.



4. ábra. Ugyanaz, mint a 3. ábra, további bolygórendszerekre, $\lambda_{\text{Kepler-20}} = 0,208$ és $\lambda_{\text{Kepler-296}} = 0,240$.

masztja Kepler történelmi sejtését: a bolygók elhelyezkedése mintha szabályos sorrendet követne. A szabályszerűséget azonban nem a tökéletes testek beírása szolgáltatja, az eredeti sejtésnek megfelelően, hanem a Kepler-probléma dinamikai algebraja a (2) egyenletek szerint.

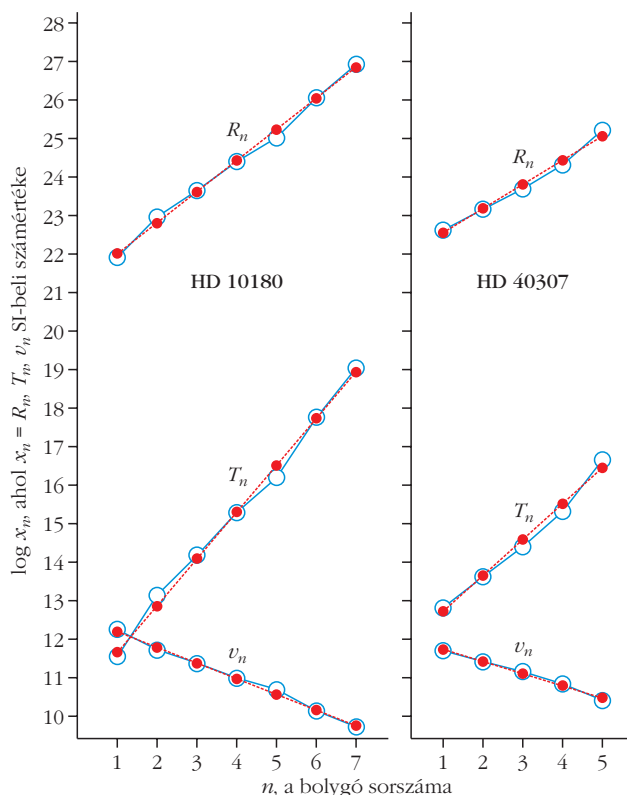
Exobolygórendszerek

A [5] munka olyan vizsgálatról számol be, amely a Barut-sejtés helytállóságát ellenőrzi exobolygórendszerekben. A megfigyelési adatok a NASA exobolygóarchívumából [6] származnak, 5-6-7 bolygót tartalmazó rendszerekre vonatkoznak, amelyek nagytengelyei, keringési idejei és excentricitásuk megbízhatóan ismeretesek. Ezekből az átlagos sebességük is meghatározható. A pályák adatait SI mértékegységekben kifejezve a 3–5. ábrák mutatják. Az ábrákon a bolygópályák sorszáma függvényében a sebesség, a keringési idő és a csillagtávolság logaritmusai vannak feltüntetve. A mért adatokat körök jelzik, és folytonos vonalak kötik össze, a számolt értékek pontok, szaggatott vonalakkal. (A vonalak csupán a szem vezetésére szolgálnak.) Az (1, 2) egyenletek λ paramétere legkisebb négyzetes illesztésből adódott (értéke a bemutatás sorrendjében rendre 0,139, 0,084, 0,208, 0,240, 0,395, 0,311).

Konklúzió

A 3–5. ábrák tanúsága szerint a bolygópályák észlelt adatai jó közelítéssel követik a rejtett szimmetriának megfelelő szisztematikát. Nehéz elhinni, hogy ez az egybeesés pusztán a véletlen műve volna. Úgy tűnik tehát, hogy az exobolygórendszerek vizsgálata alátá-

5. ábra. Ugyanaz, mint a 3. ábra, további bolygórendszerekre, $\lambda_{\text{HD 10180}} = 0,395$ és $\lambda_{\text{HD 40307}} = 0,311$.



Természetesen szisztematikusan és részletes vizsgálatokra van szükség ahhoz, hogy e kérdésben megbízható konklúzióra jussunk. Az [5] munkának és a jelen ismertetőnek csupán az a célja, hogy ráirányítsa a figyelmet Barut modelljére, és arra a körülményre, hogy az exobolygórendszerek tanulmányozása kitűnő lehetőséget kínál az ellenőrzésére.

Az első eredmények fényében számos érdekes kérdés fogalmazható meg. Csak néhányat említünk itt. A szimmetria által inspirált transzformáció inkább leírja, mintsem magyarázza a szabályosságot. (Hasonlóan a fizika más ágaiban alkalmazott számos szimmetria-alapú modellhez és elmélethez.) Miként függ össze az észlelt szabályosság a bolygórendszer keletkezésének dinamikájával? Ha irregularitást észlelünk, akkor az vajon rejtőzködő bolygóra utal? Kapcsolatban van szokatlan dinamikai effektusokkal a keletkezési mechanizmusban? Vagy hozzásegíthet külső eredetű égitest azonosításához?

A legizgalmasabb kérdésnek pedig az tűnik, hogy a kétestestprobléma tulajdonságai miként öröklődhetnek át egy olyan bonyolult folyamatba, mint a bolygórendszerek kialakulása.

A szimmetriamegfontolások szempontjából a kérdés tanulmányozása külön érdekességgel bír, hiszen egy eredendően kvantummechanikai fogalom égi mechanikában történő alkalmazásán alapul.

Irodalom

1. J. Kepler: *Mysterium Cosmographicum*. Tübingen, 1596.
2. Simonyi K.: *A fizika kultúrtörténete*. Gondolat Kiadó, Budapest 1978.
3. A. O. Barut: Symmetry and dynamics: Two distinct methodologies from Kepler to supersymmetry. In *Symmetries in Science II*. Eds.: B. Gruber, R. Lenczewski. Plenum Press, New York, USA (1989) 37.
4. Györgyi G.: A Kepler-probléma rejtett szimmetriáiról. *Fizikai Szemle* 18 (1968) 142.
5. J. Cseh: Planetary systems and the hidden symmetries of the Kepler problem. *Symmetry* 2020. 12, 2109.
6. <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu>

AZ UNIVERZUM SZÜLETÉSÉNEK VIZSGÁLATA A FÖLD ALÓL

Csedreki László, Gyürky György, Szűcs Tamás
Atommagkutató Intézet (ATOMKI), Debrecen

Ha körbenézünk világunkban, akkor a természet szinte végtelen megjelenési formáját látjuk a legapróbb vírusoktól a tőlünk akár milliárdnyi fényévre lévő csillagokig. Ezt a végtelen változatosságot a természetben előforduló csupán közel 100 kémiai elemnek köszönhetjük, amelyek változó arányban építik fel világunkat.

Ma már a tudomány nagy vonalakban magyarázatot tud adni e nagyfokú változatosság kialakulására

és dinamikájára, amely magában foglalja a kémiai elemek keletkezésének rendkívül bonyolult és összetett folyamatát, összefonódva a Világegyetem evolúciójával is.

A mára teljeskörűen elfogadottá vált elmélet szerint, közel 13,8 milliárd évvel ezelőtt a Világegyetem egy kataklizmikus eseményben, az ősrobbanásban jött létre. Ekkor született meg az anyag, az idő és a tér. Feltételezve a fizikai törvények univerzalitását és azt, hogy a Világegyetem nagy léptékben homogén és izotróp, az elmélet eredményeként sikerül magyarázatot adni olyan jelenségekre és kísérletileg vizsgálható mennyiségekre, mint a könnyű kémiai elemek gyakorisága, a kozmikus háttérsugárzás, a táguló Világegyetem és a Világegyetem nagyléptékű szerkezete [1]. Az erre vonatkozó elméleti és csillagászati megfigyelésekből származó tudásunkat az ősrobbanás standard kozmológiai modellje foglalja kerek egészbe.

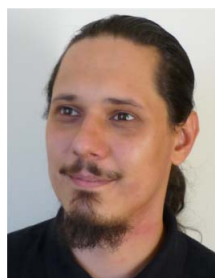
A kozmológusok a Világegyetem jelenlegi állapotának megfigyeléséből próbálnak következtetni arra az



Csedreki László fizikus, az ATOMKI tudományos főmunkatársa. 2009-ben végzett a Debreceni Egyetemen környezetkutatóként. 2015-ben szerzett PhD fokozatot magreakció-hatáskeresztmetszetek meghatározása témakörből. 2016–2020 között posztdoktorként dolgozott az INFN-LNGS intézetben a LUNA nemzetközi együttműködés keretében működtetett föld alatti gyorsító laboratóriumban. Kutatási területe a könnyű magokon végbemenő, asztrofizikailag releváns reakciók vizsgálata.



Gyürky György fizikus, az MTA doktora, az ATOMKI tudományos tanácsadója. Kutatási területe a kísérleti nukleáris asztrofizika. E tématerületen belül kiemelten foglalkozik a nehéz, protongazdag izotópok szintéziséért felelős p-folyamat magreakcióival. E munkáját az European Research Council pályázata is támogatta. Emellett részt vesz a LUNA nemzetközi együttműködés munkájában, ahol a világon egyedülálló, föld alatti gyorsítóval vizsgálják az asztrofizikailag fontos reakciókat.



Szűcs Tamás fizikus és fizikatanár (ELTE, 2008), az ATOMKI tudományos főmunkatársa. PhD disszertációját (DE, 2012) alacsony hatáskeresztmetszetek mérési módszereiről írta. Kétszer két évet töltött posztdoktor-kutatóként a drezdai HZDR kutatóintézetben, ahol egy új föld alatti gyorsítólaboratórium kialakításában vállalt meghatározó szerepet. Két évig az MTA posztdoktori ösztöndíjasa. A LUNA nemzetközi együttműködés tagja. Asztrofizikailag releváns magreakciókat vizsgál mind itthon, mind külföldön.

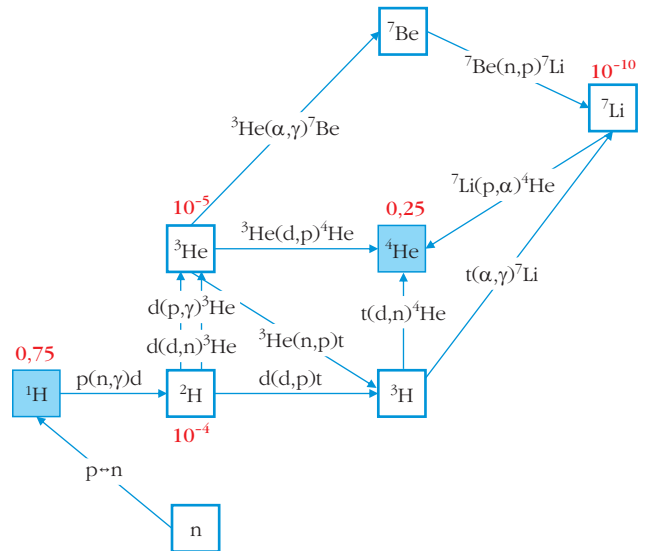
egzotikus fizikára, ami az Univerzumunk születését követő pillanatokot vezérelte. Világegyetemünk tágul, ezt főként a megfigyelt galaxisok egymástól való távolodásából látjuk. A jelenlegi Világegyetem hideg, egyenletesen kitöltve körülbelül 3 kelvin hőmérséklettel egyenértékű hősugárzással, amit kozmikus háttérsugárzásként (Cosmic Microwave Background – CMB) ismerünk. Azonban, ahogy az időben visszafelé haladunk, Világegyetemünk egyre forróbbá és sűrűbbé válik, növekvő energiájú kozmikus részecskével, amelyek egyre erőszakosabb ütközéseken mennek keresztül. Az úgynevezett kozmikus „atomkorszakban”, mikor az Univerzum 400 000 éves volt, olyan forró körülmények uralkodtak, hogy az atomok nem semleges állapotban, hanem a folytonos ionizáció révén, a szabad elektronok és atommagok által alkotott plazma formájában léteztek. Még tovább haladva visszafelé az időben, az ősrobbanás után 1 másodperccel olyan magas volt a hőmérséklet, hogy az atommagok is csak alkotóikként léteztek, a protonok és neutronok formájában. Ez a „nukleáris korszak”, aminek végén kialakultak a Világegyetemben megfigyelhető legkönnyebb kémiai elemek, mint a hidrogén, hélium és lítium. Ezt a folyamatot ősrobbanás kori nukleosintézisnek (Big Bang Nucleosynthesis – BBN) nevezzük.

Az ősrobbanás kori nukleosintézis

Amikor a BBN elkezdődött, a Világegyetem nukleonokból (protonok és neutronok), elektronokból, fotonokból és neutrínókból álló forró leves volt. Ahogy a hőmérséklet csökkent, a nukleonokból először a hidrogén egy nehezebb izotópjá jött létre, az egy protonból és egy neutronból álló deuteron (a deutérium atommagja). Később, sorozatos magreakciók révén képződtek a ${}^3\text{He}$ és végül a ${}^4\text{He}$ izotópok. Csupán 3 perc elteltével, az Univerzumban a tömegarányt tekintve 75%-ban hidrogén- és 25%-ban hélium-atommagok voltak jelen, nyomnyi mennyiségű deutérium, ${}^3\text{He}$ és ${}^7\text{Li}$ atommagokkal. Így nagyrészt a BBN felelős a Világegyetemet felépítő két leggyakoribb elem (hidrogén és hélium) keletkezésért. A lítiumnál nehezebb kémiai elemek csak jóval később, az első csillagok működése és halála során jelentek meg. A BBN-ben lejátszódó magreakciók rendszerét mutatja az 1. ábra.

A BBN egységes leírását szolgáltatja a Standard BBN (SBBN) elmélet, amely feltételezi a téridő leírását az általános relativitáselmélettel és a Lambda-Cold Dark Matter modell érvényességét. Az utóbbi az ősrobbanás kozmológiai modelljének paraméterezése, amelynek értelmében az Univerzum három fő komponenst tartalmaz: a kozmológiai állandót, amelyet a görög Λ -val jelölünk és kapcsolódik a sötét energiához; a hideg, sötét anyagot (cold dark matter); és a közönséges, látható anyagot.

Az SBBN-ben a mikrovilág fizikáját a részecskefizika standard modelljének részecskéi és kölcsönhatásai határozzák meg. A modell három neutrínófajtát



1. ábra. Az ősrobbanás kori nukleosintézis (BBN) folyamata. A piros számok az egyes elemek BBN-t követő relatív tömeggyakoriságát jelölik.

(elektron, müon, tau) feltételez és azt, hogy a BBN-ben a sötét anyag és a sötét energia elhanyagolható hatással bírt [2].

A kozmológusok és a csillagászok az Univerzumban megfigyelhető könnyű elemek mennyiségéből következtetnek azok ősi (az első csillagok megjelenése előtti) gyakoriságára. Az ilyen mérések alátámasztották például, hogy a ${}^4\text{He}$ ősi gyakorisága 25% volt. Ezeket a megfigyeléseket összevetve a SBBN elméleti modell jóslataival lehetővé válik a modell ellenőrzése.

A deutérium mennyiségének mérése további döntő információt szolgáltat, mivel a deutérium hidrogénhez képesti gyakorisága (D/H) érzékenyen függ a barionikus anyag kozmikus sűrűségétől ($\Omega_b h^2$, ahol Ω_b a barionsűrűség-paraméter, h a redukált Hubble-állandó) és a neutrínófajták effektív számától (N_{eff}),¹ mint az SBBN-modell két paraméterétől. Barionikus anyag vagy látható, fénylő anyag minden, amely protonokból és neutronokból épül fel, azaz minden elem a periódusos rendszerben.

A BBN-modell ellenőrzéséért folytatott versenyben a deutérium hidrogénhez viszonyított ősi gyakoriságát csillagászati megfigyelésekből 1% pontossággal sikerült meghatározni [3]. Ez a nagy vöröseltolódással rendelkező, azaz távoli gázfelhők abszorpciós vonalainak vizsgálatával lehetséges, amelyeknél a gázfelhő mögött valamilyen háttérfényforrás (például egy olyan kompakt csillagászati objektum, mint a kvazár) helyezkedik el. A deutérium megfigyelt gyakoriságából következtetni lehet az $\Omega_b h^2$ értékére, ami a kozmikus háttérsugárzás vizsgálatából is függetlenül meghatározható [4].

¹A modellben használt neutrínók effektív száma (N_{eff}) nem egész, mert értéke nem csupán a neutrínófajták számától függ, hanem a paraméter tartalmazza a neutrínók és az elektron-pozitron párok közötti csatolást a korai Univerzum kialakulása idején. Ezzel a paraméterrel szokás jellemezni a korai Univerzum relativisztikus energiasűrűségét.

1. táblázat

A deutérium termelésében és megsemmisülésében szerepet játszó reakciók és az SBBN-moddellel számolt, az ősi deutériumgyakoriság bizonytalanságához való hozzájárulásuk.

reakció	bizonytalanság
$p(n,\gamma)D$	0,08%
$D(p,\gamma)^3He$	2,34%
$D(d,n)^3He$	0,75%
$D(d,p)^3H$	0,49%

Összeségében elmondható, hogy a deutérium gyakoriságát megadó csillagászati megfigyelésekből és a CMB-ből kapott $\Omega_b h^2$ lényegesen pontosabb, mint a SBBN-elmélet által jósolt érték. Ennek elsődleges oka a számolásokhoz szükséges magreakciók (1. ábra) hatáskeresztmetszeteinek kísérleti bizonytalansága, amelyek közül a deuteronszintézishez köthető reakciók kiemelt szerepet játszanak. A továbbiakban ezeket a reakciókat tekintjük át!

A deuteron keletkezésében szerepet játszó reakciók

A deutérium termelésében és megsemmisülésében (más szóval égésében) szerepet játszó reakciókat és az SBBN-moddellel számolt, az ősi deutériumgyakoriság bizonytalanságához való hozzájárulásukat mutatja be az 1. táblázat, ahol egy fix $\Omega_b h^2 = 0,02207$ [5] értéket vettünk alapul. A táblázatból világossá válik, hogy kiemelt fontosságú a $D(p,\gamma)^3He$ (vagy $^2H(p,\gamma)^3He$) reakció, amelyben egy deutériummagból és egy protonból 3He keletkezik. Ez rendelkezik a legnagyobb relatív bizonytalansággal, lényegesen meghaladva a többi reakció hozzájárulását.

A teljesség kedvéért fontos megemlíteni, hogy a $D(p,\gamma)^3He$ sugárzásos befogási reakció az ősrobbanás után kívül is számos asztrofizikai környezetben rendkívül fontos szerepet tölt be. Példának okáért a Napunkhoz hasonló, viszonylag kistömegű, fősorozatbeli csillagok energiatermelése az úgynevezett pp-láncon keresztül valósul meg, amelynek eredményeként 4 protonból kiindulva, közel 26,7 MeV energia felszabadulásával egy héliumatommag keletkezik [6]. Ezen többlépéses folyamat második lépése a $D(p,\gamma)^3He$ reakció, ennek lejátszódási valószínűségét (hatáskeresztmetszetét) a Nap hőmérsékletének megfelelő, asztrofizikailag releváns, alacsony energiatartományban ($E_{c.m.} = 3-20$ keV) közvetlen mérésekből már kelendő pontossággal ismerjük [7].

E reakció szerepe még érdekesebb a csillagok fejlődésének egyik legkorábbi fázisában, a protocsillagok evolúciójában. A csillagok születésének helyszínét adó óriási gáz- és porfelhők belsejében a gravitációs összehúzódás hatására megnő a nyomás és a sűrűség. Amikor a hőmérséklet eléri a $\sim 10^6$ K-t, beindul

a $D(p,\gamma)^3He$ reakció, a gravitációs összehúzódás és a hőmérséklet növekedésének üteme csökken. Ennek következtében a kialakuló protocsillag életideje megnő és megfigyelhető tulajdonságai, mint a felszíni hőmérséklet és fényesség, változatlanok maradnak egészen addig, amíg a deutérium teljesen elhasználódik [8].

Térjünk vissza a $D(p,\gamma)^3He$ magreakció szerepére az ősrobbanásban. Itt $E = 30-300$ keV a reakció releváns energiatartománya, tehát lényegesen magasabb, mint a fent említett, csillagokban zajló asztrofizikai események esetében.

Égésen a közelmúltig a $D(p,\gamma)^3He$ reakcióra kevés kísérleti adat volt birtokunkban a BBN szempontjából fontos energiatartományban. A rendelkezésre álló kísérleti adatok alapján a $D(p,\gamma)^3He$ reakció hatáskeresztmetszetének bizonytalansága 6-10%-ra volt tehető. Ezen túl a reakció hatáskeresztmetszetének pusztán elméleten alapuló – úgynevezett ab initio módszerrel végzett – számítása arra a következtetésre vezetett, hogy a kísérleti adatok alapján számolt reakcióhozamok túlságosan alacsonyak [9].

Ha ez így van, akkor a BBN-számolások pontatlan deutériumgyakoriságot eredményeznek. Ez azért nagyon fontos, mert a deutérium gyakoriságára a megfigyelésekből és a BBN-számolásokból kapott értékek közötti bármilyen eltérés arra is utalhat, hogy eddig ismeretlen fizikai törvények játszottak szerepet a korai Univerzumban. A kozmológiai modellek ezért megkövetelik az olyan kísérleteket, amelyek segítségével a kulcsfontosságú magreakciók hatáskeresztmetszeteit a csillagászati megfigyelésekkel összemérhető pontossággal tudjuk megadni.

A LUNA (Laboratory for Underground Nuclear Astrophysics) együttműködés több éves munkájának eredményeként a $D(p,\gamma)^3He$ reakcióra vonatkozó ismereteink bizonytalanságát jelentősen sikerült csökkenteni, amellyel lehetővé vált az SBBN-modell minden eddiginél megbízhatóbb ellenőrzése. A továbbiakban ezt a kísérletet és az ebből levont következtetéseket mutatjuk be, amelyben a debreceni Atommagkutató Intézet (ATOMKI) munkatársai is jelentős szerepet játszottak [10, 11].

Föld alatti mérések

A könnyű kémiai elemekről elmondható, hogy az asztrofizikailag releváns hőmérsékleteken a keletkezésükért felelős töltött részecske-reakciók mélyen a rájuk jellemző Coulomb-gát alatti energiákon mennek végbe. Ezen energiákon a reakciók hatáskeresztmetszete ezért extrém alacsony, ami miatt a kísérleti vizsgálatok során a reakcióból származó gyenge jeleket a kozmikus sugárzás által okozott laboratóriumi háttér teljesen elfedheti [12].

Erre jelent megoldást az olaszországi Gran Sasso Nemzeti Laboratórium (LNGS) – Rómától észak-keletre, az Appenninekhez tartozó, ugyanilyen nevű hegy belsejében – mélyen a föld alatt kialakított kutatóhe-

lye, ahol a laboratóriumot fedő több, mint egy kilométeres sziklaréteg árnyékolásának köszönhetően a kozmikus sugárzás intenzitása a földfelszínen mért érték egymilliomod része.

Az LNGS ad helyet a világon egyedülálló, mélyen a föld alatt üzemelő 400 kV terminál-feszültségű LUNA400 részecskegyorsítón alapuló asztrofizikai laboratóriumnak, amelyet a LUNA együttműködés működtet mintegy 20 éve (2. ábra). A föld alatti helyszín révén az eltelt két évtizedben lehetővé vált számos, nukleáris asztrofizikai szempontból fontos magreakció közvetlen vizsgálata minden korábbinál alacsonyabb energián [13, 14].

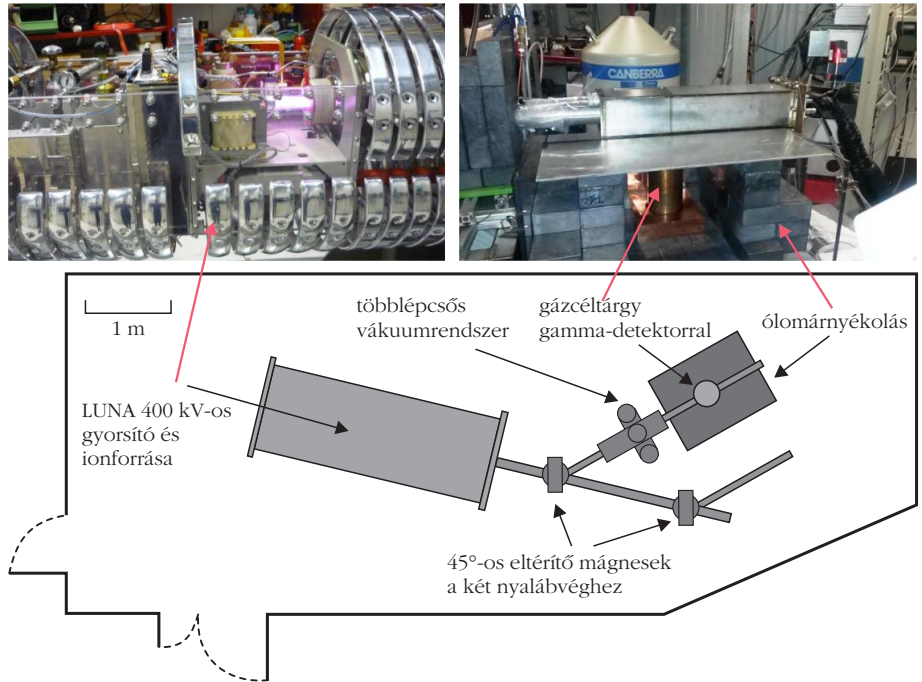
A gyorsító kifejezetten alacsony energiás nukleáris asztrofizikai mérésekre lett optimalizálva, lehetővé téve a mérésekhez szükséges többszáz μA nyalábtintenzitást (proton és alfa-részecske) és a kiváló energia- és nyalábbáram-stabilitást.

A gyorsító által szolgáltatott protonnyalábbal történt a 99,99%-ra dúsított deutérium-gázcéltárgy besugárzása. A speciális kialakítású mérőkamrában a nyaláb – a többlépcsős vákuumrendszernek köszönhetően – minimális energiavesztéssel éri el a céltárgyat. A beérkező protonok számát a mérőkamrát lezáró és így „beam-stop”-ként működő kaloriméterrel határoztuk meg. A mérőkamrában elhelyezett nyomás- és hőmérséklet-szenzorok segítségével a céltárgyatommagok számát nagy pontossággal tudtuk meghatározni.

A $\text{D}(p,\gamma)^3\text{He}$ reakcióban keltett gamma-fotonokat nagy tisztaságú germániumdetektorral mértük. A detektor hatásfokát radioaktív forrásokkal, sugárzásos befogási magreakciókkal és Monte-Carlo-szimulációval határoztuk meg, amelynek eredményeként a detektálási hatásfok bizonytalanságát, mint szisztematikus hibaforrást, 2,0%-ra sikerült csökkenteni.

Figyelembe véve a $\text{D}(p,\gamma)^3\text{He}$ reakció reakcióhőjét ($Q = 5,493 \text{ MeV}$),² a keletkezett gamma-fotonok energiája messze a természetes radioaktív izotópok által keltett laboratóriumi háttérsugárzás energiatartománya ($\sim 3,1 \text{ MeV}$) fölé esett, ahol így már csak a kozmikus sugárzás okozhat háttérrel. Itt viszont a föld alatti helyszín biztosítja az alacsony háttérrel, így ennek és a fent bemutatott kísérleti körülményeknek köszönhetően lehetővé vált a $\text{D}(p,\gamma)^3\text{He}$ reakció kívánt pontoságú, közvetlen vizsgálata [11].

²Egy magreakcióban résztvevő magok összes nyugalmi energiájának változását a Q értékkel jellemezzük. Pozitív érték esetén ennyi energia szabadul fel a reakcióban, az itt tárgyalt reakció esetén gamma-sugárzás formájában.



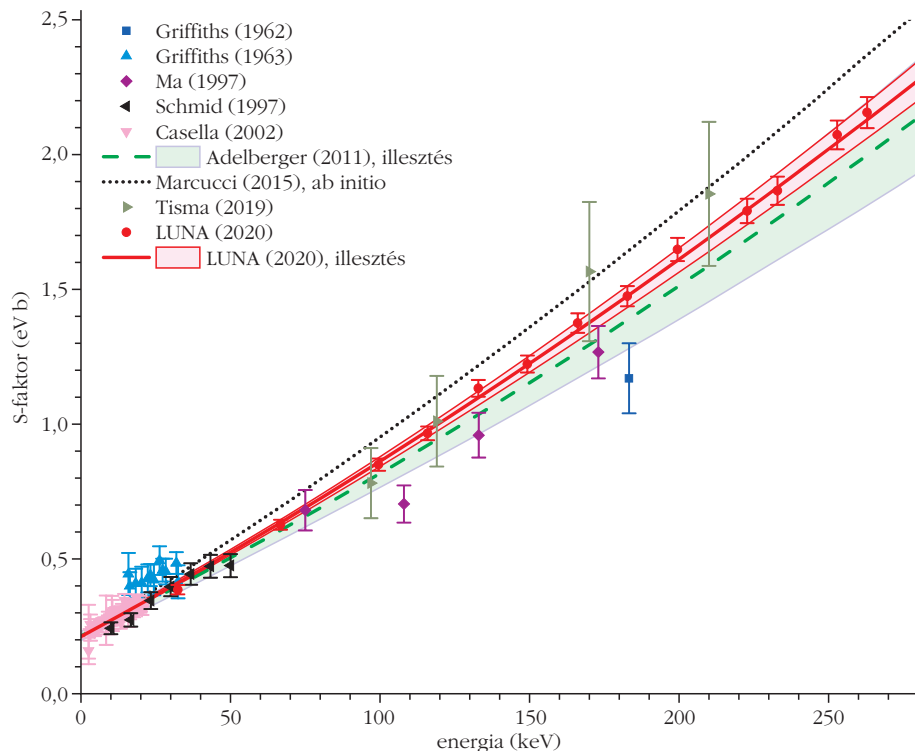
2. ábra. A LUNA400 részecskegyorsító és a mérésekhez használt gázcéltárgyas nyalábcsonna.

A 3. ábra mutatja be az irodalomban fellelhető, kísérletileg és elméleti (ab initio) számolás alapján meghatározott és a LUNA által újonnan mért asztrofizikai S-faktor értékeket. Praktikus okok miatt a mérésekből számolt hatáskeresztmetszetekből az úgynevezett asztrofizikai S-faktort származtatják, amellyel kompenzálható az alagúteffektus erős energiafüggése és így az adatok ábrázolása lényegesen könnyebb lesz. Az új kísérleti hatáskeresztmetszetek magasabbak a korábbi, hiányosabb és pontatlanabb értékeknél, viszont jelentősen alacsonyabbak, mint az elméleti számításokból előre jelzett érték (fekete pontozott vonal).

Az ábrán zöld szaggatott vonal mutatja a korábbi mérések felhasználásával illesztett S-faktor görbéjét a hozzá tartozó, világoszöld sávval jelölt bizonytalansággal. A LUNA által elvégzett precíz kísérleti munka eredményeként a korábbi 9%-os bizonytalanságot kevesebb, mint 3%-ra sikerült csökkenteni az $E_{\text{c.m.}} = 32\text{--}263 \text{ keV}$ tartományban, amint azt a piros folytonos vonal mutatja a megfelelő bizonytalansági sávval. Ez lehetővé teszi a korábbinál pontosabb SBBN-számítások elvégzését, amelyek bizonytalansága így már sokkal közelebb van a csillagászati megfigyeléséből kapott deutériumgyakorosság bizonytalanságához.

Kozmológiai következtetések

A $\text{D}(p,\gamma)^3\text{He}$ reakció lényegesen pontosabb S-faktor adatait felhasználva az SBBN-moddal segítségével újraszámolható a barionsűrűség az ősrobbanást követő néhány perces időszakban. Az SBBN modellszámítások elvégzésére alkalmas PARthENOPE kóddal ez az érték $\Omega_b h^2 = 0,02233 \pm 0,00036$, amely kettes faktorral pontosabb a korábbi adatok alapján számolt értéknél



3. ábra. A $D(p,\gamma)^3\text{He}$ reakció asztrofizikai S-faktor adatai.

($0,02271 \pm 0,00062$). Így az SBBN alapján számolt és a független, Planck³ [15] együttműködés munkája eredményeként, a CMB alapján meghatározott barionsűrűség ($\Omega_b h^2 = 0,02230 \pm 0,00021$) kiváló egyezést mutat.

Itt fontos megjegyezni, hogy a BBN és CMB alapján számolt $\Omega_b h^2$ a Világegyetem két, időben 380 000 évvel eltérő állapotára vonatkozik. Azonban a Λ -CDM-modell feltételezése alapján a barionsűrűség értékét csak az Univerzum tágulása befolyásolja. Így, amennyiben a modell helyes, a $\Omega_b h^2$ mai értékére mind a CMB mind a BBN alapján ugyanazt kell kapnunk. Az SBBN és CMB alapján kapott $\Omega_b h^2$ értékek kiváló egyezése, tovább erősíti a modell megbízhatóságát és arra utal, hogy nincs szükség a jelenlegi ismereteinken túlmutató fizikai folyamatok feltételezésére a BBN utáni pár százezer év vonatkozásában. E számításokban a neutrínófajták effektív számát fix paraméterként kezeltük, $N_{\text{eff}} = 3,045$.

A modellszámításokhoz szükséges hatáskeresztmetszetek pontosítása lehetővé teszi a neutrínófajták effektív számának vizsgálatát, illetve azt, hogy mi a valószínűsége az eddig ismeretlen és új fizika jelenlétének a standard részecskefizikai ismereteinken túl.

Két megközelítésben vizsgáltuk a fenti problémát. Az első esetben a deuterongyakoriság SBBN által jósolt és a csillagászati megfigyelésekből származó értékét, valamint a CMB-ből kapott barionsűrűséget vettük rögzítettnek. A számításokból kapott $N_{\text{eff}} = 2,95 \pm 0,22$ érték tökéletes egyezést mutat a standard

N_{eff} értékkel. A második esetben a számolásokat a deuteron és a ^4He tömeggyakoriság SBBN-ből származó és csillagászati megfigyelésből kapott értékére alapoztuk, és a barionsűrűséget szabad paraméterként kezeltük. A neutrínófajták effektív számára kapott érték ebben az esetben $N_{\text{eff}} = 2,86 \pm 0,28$ -nak adódott, amely ugyan alacsonyabb a standard értéknél, de figyelembe véve az érték nagyobb bizonytalanságát még mindig konzisztensnek tekinthető.

Összefoglalás

Az Univerzum születéséről és fejlődéséről rendelkezésre álló, megfigyelésekkel alátámasztott információinkat az ősrobbanás kozmológiai elmélete foglalja kerek egészbe, amelynek fontos állomása a könnyű elemek

keletkezéséért felelős ősrobbanás kori nukleoszintézis. A modellszámítások elvégzéséhez szükséges a könnyű elemek szintézisében szerepet játszó magreakciók hatáskeresztmetszetének kellő pontosságú ismerete, amelyek közül kiemelt fontosságú a deuteron kialakulásához kapcsolódó $D(p,\gamma)^3\text{He}$ reakció.

A debreceni Atommagkutató Intézet munkatársainak részvételével működő LUNA együttműködés által, az olaszországi Gran Sasso Nemzeti Laboratórium mélyén a föld alatti helyszínén elvégzett kísérleteknek köszönhetően a korábbiaknál sokkal pontosabban ismerjük a $D(p,\gamma)^3\text{He}$ reakció hatáskeresztmetszetét. Az eredmények hozzájárulnak ahhoz, hogy az Univerzumban a barionos anyag sűrűségét (ami mintegy 4%-a a teljes sűrűségnek) még biztosabban határozzuk meg a standard BBN-modell segítségével. Ez az új érték már 1%-os pontossággal megegyezik a CMB-ből számított értékkel. Ilyen szintű egyezés igazi diadal a kozmológia alapvető elméletének.

Irodalom

1. https://en.wikipedia.org/wiki/Big_Bang
2. Cyburt R. és mts., *Rev. of Mod. Phys.*, Volume 88 (2016)
3. Cooke R. és mts., *Astrophys. J.* 855 (2018) 102.
4. Fields B. és mts., *J. Cosmol. Astropart. Phys.* 03 (2020) 010.
5. Di Valentino E. és mts., *Phys. Rev. D* 90 (2014) 023543.
6. Gyürky és mts., *Nukleon* 5 (2012) 108.
7. Casella C. és mts., *Nucl. Phys. A* 706 (2002) 203.
8. Adelberger E. G. és mts., *Rev. Mod. Phys.* 83 (2011) 195.
9. Marcucci L. és mts., *Phys. Rev. Lett.* 116 (2016) 102501.
10. Mossa V. és mts., *Eur. Phys. J. A* 56 (2020) 144.
11. Mossa, V. és mts., *Nature* 587 (2020) 210.
12. Szücs T., *Fizikai Szemle* 68/7–8 (2018) 230.
13. Gyürky Gy., *Fizikai Szemle* 61/2 (2011) 37.
14. Csedreki L. és mts., *Fizikai Szemle* 70/2 (2020) 39.
15. https://hu.wikipedia.org/wiki/Planck_m%C5%B1hold

³Planck nemzetközi együttműködés a Planck műhold eredményeire alapozva határozta meg minden eddiginél pontosabban a kozmikus háttérsugárzás különböző tulajdonságait.

ÚT A NAGYSZÖGŰ ALFA-SZÓRÁSHOZ

– Hogyan készült a kutatóárok a kincskereséshez?

Angeli István

Debreceni Egyetem, Kísérleti Fizikai Tanszék

Ernest Rutherford a Geiger–Marsden-féle kísérlet eredményének, az α -részek nagyszögű szóródásának magyarázatára alkotta meg modelljét. De miért éppen ezt a jelenséget vizsgálta a két szorgos munkatárs? Hiszen a történet kicsit olyan, mintha a kincskereső előre tudná, hol kell ásni. Hasonlóan más felfedezések előzményeihez, ez az út sem buktatók, mellékágak nélküli, és egyben nagyon tanulságos: kis eltéréseknek is érdemes következetes, alapos munkával utána járni!

A titokzatos, új sugárzás nyomában

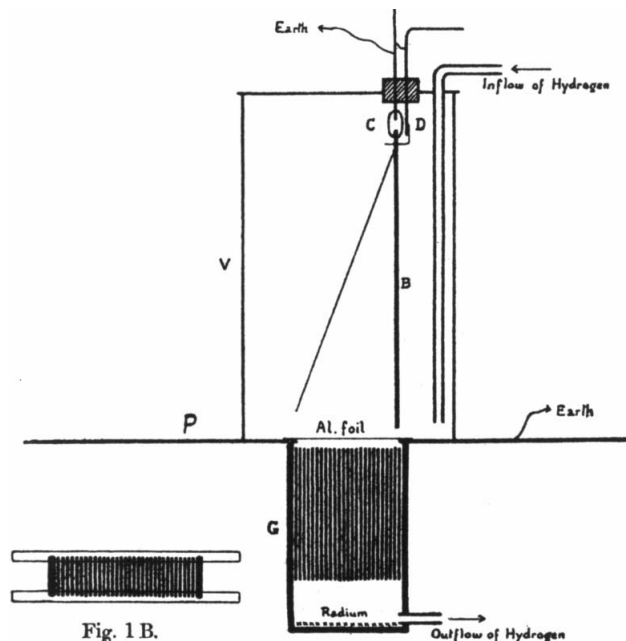
A 20. század elején az 1896-ban felfedezett radioaktivitás (Henry Becquerel, Maria Salomea Skłodowska-Curie, Pierre Curie, Nobel-díj: 1903) volt a fizikusok érdeklődésének gyújtópontjában. Rutherford is ezt az új jelenséget vizsgálta. Ez az ifjú montreali professzor Kanadából küldi cikkeit Angliába, a *Philosophical Magazine*-nak. 1903-ban arról számol be [1], hogy a tóriumot és rádiumot követő emanációk további új radioaktivitás forrásai. Aktivitásukat sem a hőmérséklet, sem drasztikus kémiai kezelés nem befolyásolja. Nem ért egyet Becquerellel, a nála 19 évvel idősebb és már nagy tekintélynek örvendő francia tudóssal, aki szerint az emanációk pozitív ionokból állnak [2], hiszen akkor elektromos térben kirakódnának a katódra, márpedig ez nem történik meg: az eredeti térfogatban akármeddig megmaradnak. Rutherfordnak később is van több – szakszerű és udvarias – pengeváltása Becquerellel. E közleményében nevezte el a radioaktív sugárzások két fajtáját [1, 113. old.]:

„One type is not appreciably deviable by a magnetic or an electric field, and is very easily absorbed in matter. These will be called the α rays. The others are deviable and more penetrating in character, and will be called the β rays. In addition I have shown that thorium and radium

Köszönet illeti Zolnai Dóra könyvtárost az évszázados források beszerzésében nyújtott segítségével.



Angeli István a Debreceni Egyetem ny. egyetemi tanára. Az ELTE TTK fizikus szakán végzett 1955-ben. Részt vett azon kísérletekben, amelyek a magyarországi szénak urántartalmának elődúsítására irányultak. Munkatársaival totális neutron-hatáskeresztmetszeteket mért; az értelmezéshez kifejlesztették az optikai modell félklasszikus változatát. A töltéssugárban héj- és deformációs effektusokat tártak fel. 2004-ben és 2013-ban magsugárábrázolókat közölt az *Atomic Data and Nuclear Data* folyóiratban.



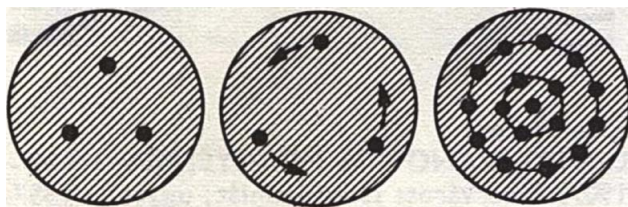
1. ábra. Rutherford első mérőberendezése az α -sugarak mágneses térben történő eltérésének kimutatására [3, 179. old.].

emit some rays nondeviable in character, but of very great penetrating power.”

A γ -sugárzásnak csak egy hónappal későbbi közleményében ad nevet [3, 177. old.]. A továbbiakban az α -sugarak természetét kívánja tisztázni, mágneses és elektromos térben mutatott viselkedés vizsgálatával. Ez azonban nem egyszerű, mert az eltérés – az akkor rendelkezésre álló eszközökkel – rendkívül kicsi [3, 178. old.]:

„The magnetic deviation, even in a strong magnetic field, is so small that very special methods are necessary to detect and measure it.”

Első kísérleti berendezése az 1. ábrán látható. A berendezés alján szétterített vékony rádiumrétegből kiinduló α -sugarak, a G részen – és egy 0,00034 cm vastag Al-fólián – áthaladva, felfelé irányuló párhuzamos nyalábot alkotnak. A V kamrában egy aranylemezes elektroszkóp helyezkedik el. A sugarak által okozott ionizáció mértékét az aranylemez mozgási sebességével határozza meg, ezt mikroszkóppal méri. Hidrogéngáz-áramoltatással gondoskodik arról, hogy a kamrában ne gyűljön fel a Ra-ból kiszabaduló emanáció, ami zavaró háttérionizációt okozna. A mágneses tér az ábrára merőleges. A mérési eredmények igazolják várakozását. Az elektroszkóp kisülési sebessége mágneses tér nélkül: 8,33 V/perc és a mágneses teret bekapcsolva: 1,72 V/perc.



2. ábra. A Thomson-féle atommodell [8, 326. old.].

Ez azt mutatja, hogy az α -sugarak a mágneses térben eltérülnek, tehát elektromos töltéssel rendelkeznek. Különböző télerősségekhez különböző kisülési sebesség tartozik, ebből az α -pályák R görbületi sugarára következtet, és még az e/m értékre is kap egy közelítő becslést. Azt is valószínűnek látja, hogy a vizsgált α -sugarak különböző sebességgel mozgó részecskékből állnak. Megoldandó feladatnak tartja e részecskék által hordozott töltés meghatározását.

Becquerel elismeri Rutherford eredményét, de a módszert nem tartja elég megbízhatónak; a maga részéről egy másik, fotografikus detektáláson alapuló eljárást alkalmaz [4]. Folytatja a Ra α -sugárzására vonatkozó vizsgálatait, amelyek során forrásként néhány darabka rádiumsót helyez el egy ólomtömbben [5, 1517. old.]. Erre nagyon vékony Al-fóliát helyez, hogy a fény ne jusson el a fényérzékeny lemezre – feltehetően a Cserenkov-sugárzásról van szó. Azt tapasztalja, hogy az RH szorzat – tehát vm/e – a pálya mentén növekszik [5, 1519. old.]. Mivel a sebesség növekedése nehezen elfogadható, tehát vagy az m tömeg nő, vagy az e töltés csökken [5, 1520. old.]:

„On peut au contraire envisager les hypothèses d'une augmentation de la masse m , ou d'une diminution de la charge e .”

Ami a töltés csökkenését illeti, közel jár a megoldáshoz, a *töltéscserélő* folyamatok feltételezéséhez, de később mégis a *tömeg növekedése* mellett dönt [6, 486. old.].

A későbbi fejlemények szempontjából fontos körülmény, hogy 1904-ben *J. J. Thomson* részletes számításokat végez pozitív töltésű gömbben körpályán mozgó negatív részecskék által alkotott rendszer (2. ábra) tulajdonságaira és stabilitási feltételeire [7]. Eredményeit alkalmazza atomszerkezeti modell megfogalmazására, elemek kémiai tulajdonságainak értelmezésére, molekulák képződésére és még a radioaktív α -bomlás magyarázatára is [8]. Tehát a Thomson-modell sokkal több, mint a közismert *mazsolás pudding* ábra. Ezért az alábbi fejezetben kivonatossan ismertetjük Thomson eredeti cikkét [7].

A Thomson-modell

Ez a fejezet az 1904-es 29 oldalas Thomson-cikk [7] kivonatossan ismertetése. Az eredeti mű jelentékeny matematikai apparátussal dolgozik [7, 238–253. old.], azonban a mai olvasó számára lényeges tartalom ennek mellőzésével is követhető.

Egyenletes sűrűségű pozitív gömbön belül helyezzünk el a középponttól a távolságra egy negatív részecskét. Erre a részecskére a középpont felé irányuló, a -val arányos vonzóerő fog hatni. Hogy a részecske megmaradjon az eredeti távolságban, egy kifelé irányuló taszító erőre van szükség. Ezt létrehozhatja egy másik negatív részecske a középpont felől, vagy/és a vizsgált részecske körpályán történő, megfelelő sebességű mozgása. A feladat megoldásához Thomson a *klasszikus elektromosságban és a mechanika törvényeit* használta fel.

A feladatot több részecskére kiterjesztve, kérdezhetjük: mi a feltétele annak, hogy a sokrészecske-rendszer stabil legyen. Szimmetriameggondolások alapján gömbhéjak menti elrendezésre gondolhatunk. Thomson is lehetségesnek tartotta ezt, de rámutatott, hogy számítási könnyebbséget jelent, ha csak két dimenzióra szorítkozik, tehát héjak helyett gyűrűk mentén osztja el a részecskéket egyenletesen, n részecske esetén $2\pi/n$ szögintervallumonként [7, 237. old.].

„The analytical and geometrical difficulties of the problem of the distribution of the corpuscles when they are arranged in shells are much greater than when they are arranged in rings, and I have not as yet succeeded in getting a general solution. We can see, however, that the same kind of properties will be associated with the shells as with the rings; and as our solution of the latter case enables us to give definite results, I shall confine myself to this case.” [7, 255. old.]

Azt is vizsgálta, milyen erő hat egy olyan részecskére, amely kissé eltér az egyensúlyi helyzetétől [7, 238. old.].

A részecskék számát fokozatosan növelve azt találta [7, 253. old.], hogy *egyetlen központi részecske eleget a gyűrű stabilizálásához, amíg a gyűrűt alkotó részecskék száma legfeljebb nyolc*. Ennél több gyűrűrészecske esetén azonban már egyetlen központi részecske nem elég, $n = 9$ -nél már kettő kell; ezek a középpont két átellenes oldalán helyezkednek el, illetve keringenek; $n = 10$ esetén három belső részecske helyezkedik el egy egyenlő oldalú háromszög csúcsain. A háromszög síkja nem feltétlenül esik egybe a gyűrű síkjával, de mindig párhuzamos vele. *A számítások azt mutatták, hogy a külső részecskék n számának növelésével rohamosan növekedik a stabilitáshoz szükséges belső részecskeszám* [7, 254. old.]:

n	5	6	7	8	9	10	15	20	30
p	0	1	1	1	2	3	15	39	101

Ha $p > 1$, akkor ezek nem lehetnek együtt a középpontban, hanem *kezd kialakulni egy belső gyűrű*, és ez így folytatódik. Ha például összesen 19 részecske van, akkor 12 alkot egy külső gyűrűt, 6 egy belsőt, egy részecske pedig a középpontban helyezkedik el. A gyűrűk síkja merőleges a keringés tengelyére. A különböző gyűrűk síkjai nem feltétlenül esnek egybe. A keringés biztosítja, hogy a gyűrű akkor is stabil, ha a részecskék a gyűrű síkjára merőlegesen eltávolodnak [7, 255. old.].

Alkalmazás az atomok szerkezetére [7, 255. old.]

Azt találjuk, hogy az ilyen gyűrűkből álló rendszerek sok tekintetben hasonlóak a kémiai elemek atomjaihoz, nevezetesen: *a tulajdonságok nagyon hasonlóan függenek az atomsúlytól, mint ahogyan azt a periódusos rendszer leírja*. Tegyük fel, hogy az összesen N darab e töltésű részecske a lehető legegyszerűbben tölti ki a gyűrűket; ezen azt értjük, hogy minden gyűrűben a lehető legtöbb (n) részecskét helyezük el [7, 256. old.].

Az így kiszámított rendszert a következő táblázat mutatja [7, 257. old.]:

N	60	55	50	45	40	35	30	25	20	15	10	5
n	20	19	18	17	16	16	15	13	12	10	8	5
n	16	16	15	14	13	12	10	9	7	5	2	–
n	13	12	11	10	8	6	5	3	1	–	–	–
n	8	7	5	4	3	1	–	–	–	–	–	–
n	3	1	1	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Vizsgáljuk meg a kapcsolatot ezen eredmények és a kémiai elemek atomjainak tulajdonságai között [7, 258. old.]. Az $N=60$ csoportjai – a legkülső 20-as gyűrűtől eltekintve – azonosak az $N=40$ csoportjaival. Látható, hogy *az atomok különböző csoportjait sorozatokba tudjuk osztani* úgy, hogy a sorozat minden tagja leszámaztatható az előző tagból oly módon, hogy egy részecskegyűrűt adunk hozzá [7, 259. old.]. Ez olyan, mint *Mengyelejev* táblázata.

Kiszámította azokat a sorozatokat is, amelyekben a legkülső gyűrű 20 részecskét tartalmaz; ezekben a teljes N részecskeszám: $59 \leq N \leq 67$ [7, 258. old.]:

N	59	60	61	62	63	64	65	66	67
n	20	20	20	20	20	20	20	20	20
n	16	16	16	17	17	17	17	17	17
n	13	13	13	13	13	13	14	14	15
n	8	8	9	9	10	10	10	10	10
n	2	3	3	3	3	4	4	5	5

$N=59$ -nél a belső gyűrűk még éppen csak elegendők a külső gyűrű stabilizálásához [7, 260. old.], a csoport pontosan az instabilitás szélén áll, ezért könnyen veszíthet el részecskét, tehát pozitív lesz. Ekkor viszont a környezetében lévő negatív részecskékre vonzást gyakorol. Ez a rendszer tehát nem lehet tartósan töltött [7, 261. old.]. Egy ilyen atom *sem elektropozitív, sem elektronegatív*. A 60 részecskét tartalmazó csoport a leginkább elektropozitív a sorozatban. Egy részecske elvesztésével még mindig stabil rendszer marad, úgy viselkedik, mint egy 1-vegyértékű elektropozitív elem atomja. Hasonlóan, a 61-es és 62-es csoport kettő, illetve három részecskét tud elveszíteni, tehát 2-, illetve 3-vegyértékű elektropozitív elem atomjaként viselkedik.

Tekintsük most a sorozat utolsó csoportja, a 67-es tulajdonságait! Ha ez felvesz egy részecskét, 21-es külső gyűrűt alakít ki, ami nagyon instabil, könnyen újra elveszíti a részecskét. Tehát – hasonlóan az 59-hez – ez sem lehet permanensen töltött; úgy viselkedik, *mint egy vegyérték nélküli elem atomja*. A 66-os a sor leginkább elektronegatív tagja, de csak egyetlen negatív részecskét tud megtartani. Ez a *66-os csoport tehát úgy viselkedik, mint egy 1-vegyértékű elem atomja* [7, 262. old.]. Hasonló gondolatmenettel belátható, hogy a 65-ös 2-, a 64-es csoport pedig 3-vegyértékű elem atomjaként viselkedik. A tulajdonságok e sorozata nagyon hasonló ahhoz, amit az elemek atomjai esetében megfigyeltek. Az elemek sorozatait:

He	Li	Be	B	C	N	O	F	Ne
Ne	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar

Mindegyik sorozat első és utolsó eleme vegyérték nélküli, a második egyvegyértékű elektropozitív elem, az utolsó előtti egyvegyértékű elektronegatív elem, a harmadik kétvegyértékű elektropozitív elem stb.

Ha elektronegatív atomok elektropozitívokkal keverednek, az elektronegatívok részecskét vesznek fel, tehát negatívok lesznek és vonzani fogják a pozitív töltésűeket, és így *vegyület alakul ki*.

Másodlagos részecskecsoportok az atomon belül [7, 263. old.]

Ha a nehezebb elemek atomjait könnyebb elemek atomjaiból – *szub-atomokból* – összetettnek tekintjük [7, 264. old.], akkor jogosan feltételezhető, hogy *a nehezebb atomok részecskéi másodlagos csoportokba, szub-atomokba rendezhetők*, ezen csoportok mindegyike egységként viselkedik.

„If we regard the atoms of the heavier elements as produced by the coalescence of lighter atoms, it is reasonable to suppose that the corpuscles in the heavier atoms may be arranged in secondary groups or *sub-atoms* [ezen és a többi idézetben is kiemelés tőlem, A.I.] ...”

Ha a részecskék ilyen csomókba tömörülnek, elérhető a stabilitás, ha ezek a csomók egyenletesen gyűrűbe rendeződnek – középen kisebb számú részecskével. Vegyünk példának egy 30 részecskéből álló gyűrűt, ha ezeket egyenletesen rendezzük el, akkor 101 részecskére van szükség középen, hogy a gyűrűt stabilizálja. Ha viszont a 30 részecskét tíz hármass csomóba rendezzük, akkor csak $3 \times 3 = 9$ belső részecskére lenne szükség, hogy a rendszer stabil legyen [7, 265. old.].

Radioaktív elemek atomjainak szerkezete [7, 265. old.]

Vannak részecskekerendszerek, amelyek stabilak, ha a forgási sebesség nagyobb egy bizonyos értéknél, és instabilak, ha a sebesség ezen értéknél kisebb. Példa [7, 249. old.]: négy részecske egy négyzet négy csúcán stabil lehet, ha a négyzet a síkban egy bizonyos sebességnél gyorsabban forog, azonban e sebesség

alatt a rendszer instabil, és tetraéder alakzatba – csúcsain a részecskékkel – rendeződik át.

Tekintsük most egy olyan atom tulajdonságait, amelynek részecskéi eredetileg a kritikus sebességnél gyorsabban forogtak. A mozgó részecskék által kibocsátott sugárzás következtében a sebesség – nagyon lassan – csökken, hosszú idő után eléri a kritikus értéket, a részecskék szétrobbannak és messzire eltávolodnak. A kinetikus energia elegendő lehet arra, hogy a rendszer elhagyja az atomot és – mint a rádium esetében – az atom egy része kilöködik. Mivel a sugárzási energiaveszteség nagyon lassú, az atom élettartama nagyon hosszú. *Minden ilyen rendszer, amelynek stabilitásához forgás kell, a fokozatos sugárzási energiaveszteség következtében radioaktív tulajdonságokkal rendelkezik.*

„We have taken the case of the four corpuscles as the type of a system which, like a top, requires for its stability a certain amount of rotation. Any system possessing this property would, in consequence of the gradual dissipation of energy by radiation, give to the atom containing it radioactive properties similar to those conferred by the four corpuscles.”



Angliában különös érdeklődést keltettek Rutherford azon eredményei, amelyekkel kimutatta, hogy a sok, látszólag különálló aktivitás néhány nagy sorozatba rendezhető. Ezekért a vizsgálatokért kapja meg 1904-ben a Royal Society rangos kitüntetését, a Baker-érmet. A kitüntetés átvétele alkalmából tartott előadás anyaga nyomtatott formában is megjelenik [9], egy rövid összefoglalót a *Nature* is közöl [10]. Az 52 oldalas közlemény addigi munkásságának átfogó ismertetése, ezért néhány részletet érdemes kiemelni.

Matematikai leírást ad az egymáshoz kapcsolódó aktivitásokra, a radioaktív bomlási sorokra. Ábrán és táblázatban is közli a megállapított kapcsolatokat a különböző radioaktív elemek között. Az uránt és a rádiumot még külön sorozatban helyezi el, bár kifejezi azt a gyanúját, hogy közös sorozatba tartoznak. Erre azonban még nincs kísérleti bizonyítéka.

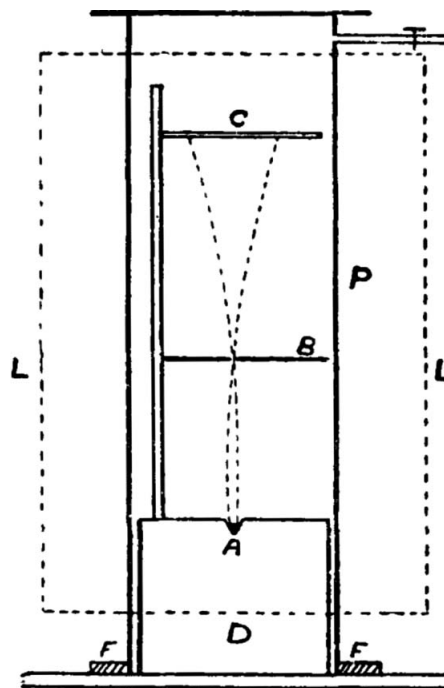
Becslést ad a radioaktív α -bomlásból származó energiára, és felhívja a figyelmet, hogy ez nagyságrendekkel nagyobb az ismert kémiai reakció-energiáknál, érdemes őrtenézni [9, 210. old.]:

„The amount of energy liberated, weight for weight, is over 100,000 times greater than has previously been observed in any chemical reaction.”

Gyanítja – de bizonyítania még nem sikerül –, hogy az α -részek valójában elektromos töltésű héliumatomok (*atommagot* akkor még nem ismertek!).

„The α particles, in all probability, consist of helium atoms expelled at the successive stages of the disintegration.”

De még gondja van a töltés kísérleti meghatározásával, ennek okát egy feltételezett *másodlagos sugárzás* kompenzáló hatásának tulajdonítja [9, 212. old.]:



3. ábra. Rutherford tökéletesített mérőberendezése az α -sugarak mágneses térben történő eltérésének mérésére [11, 166. old.].

„The failure to detect the charge carried by the α rays is probably due in part to a strong secondary ionization set up by the α rays.”

Ez a feltételezés később is felmerül.

Új technika, új eredmények

Rutherford következő munkája során még részletesebb vizsgálat alá veszi az α -sugárzást [11]. Ismeri Bragg és Kleeman kísérletének eredményét, amelyben – nagyon vékony rádium-bromid réteget alkalmazva – megmutatták, hogy négy, különböző sebességű α -sugár lép ki. A vastag Ra-preparátumokban a fékezés és önabszorpció révén még ez az energiaelmoszlás is elmosódik, ezért vastag rádiumpreparátumból nem várható monoenergiás α -sugárnyaláb. Ezen akar változtatni: későbbi kísérleteiben vékony és monoenergiás forrást alkalmaz.

Új kísérleti berendezését – amely egy 1903-ban Becquerel által alkalmazott elrendezés tökéletesített változata – a 3. ábra mutatja [11, 166. old.]. Egy 1 cm hosszú, 0,5 mm átmérőjű drótdarabra rádiumemanációból képződő RaC-t csapat ki (^{214}Bi , a rádium bomlási sorának negyedik tagja); ennek α -sugárzása egyetlen energiával rendelkezik. A réteg vékonysága miatt nincs önabszorpció, sem fékezés. Ezt a drótdarabot a berendezés alján lévő A vályúban helyezi el. E felett 2 cm-re lévő B fémlapon egy keskeny rés alakítja ki azt a vékony α -nyalábot, amely a további 5 cm-re elhelyezett C fényérzékeny lemezre esik.

Az egész berendezés egy vákuumra szívható hengeres tartályban helyezkedik el. Az elrendezésre mérőleges, közel homogén mágneses teret egy elektro-

mágnes két pólusával alakítja ki, a szaggatott vonallal jelzett I térfogatban.

A nagy légrés miatt a mágneses tér értéke csak mérsékelt volt, ezért a nyaláb elhajlása kicsi, néhány milliméter nagyságrendű. Ezt oly módon kétszerezi meg, hogy nem a térmentes helyzettől méri az eltérést, hanem a mágnesező áram irányát változtatja meg. Ezért az előhívott fényérzékeny lemezen látható két csík távolságának fele adja az eltérést, ebből számítja az R görbületi sugarat. A 4. ábra (egy későbbi közleményből [12]) annak eredményét mutatja, hogy a forrásnál vékony csillámlemezzel kettéválasztott nyaláb felső részén nyolc vékony alumíniumfóliát helyezett el; az alsó rész pedig fedetlen. Jól látható, hogy a fóliák által lefékezett részecskék jobban, körülbelül 4 mm távolságra térülnek el.

Az

$$e v H = \frac{m v^2}{R}$$

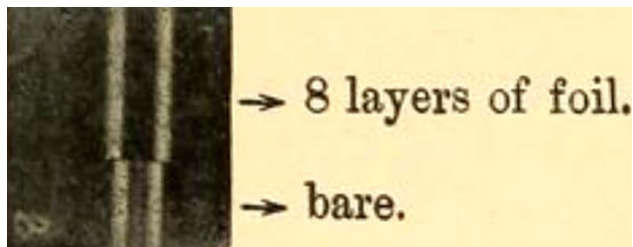
egyenletből a

$$H R = \frac{m v}{e}$$

összefüggést kapjuk, H és R ismeretében a jobb oldal értéke is ismert. Rutherford az e/m és a v szétválasztására elektrosztatikus eltérítést kívánt volna alkalmazni, de technikai nehézségek miatt e helyett megelégedett a sebesség – hőtermelésből kapható – becslésével. Az eredmények egyre inkább alátámasztották azt a feltevést, hogy az α -sugarak tulajdonképpen héliumatomok, amelyek a kibocsátáskor valami módon töltést és sebességet kapnak a bomló magtól.

Rutherfordnak azonban volt egy nyugtalanító megfigyelése is, amikor a különböző vastagságú alumíniumrétegeken áthaladt α -részek sebességváltozását vizsgálta. Azok a részecskék, amelyek sebessége az eredeti érték körülbelül $2/3$ részére csökkent, már nem hagytak nyomot a fényképező lemezen. Ugyanilyen csökkenést tapasztalt a gázionizációban és a szcintillációnál is. Ezt a jelenséget valamiféle, eddig ismeretlen *másodlagos hatásnak* tulajdonítja. Nem ért egyet Becquerellel, aki a szcintilláció megszűnését a kristály – α -bombázás miatti – sérülésével magyarázza. A vitába belépett W. L. Bragg és Kleeman is. (Ma feltételezhetjük, hogy itt is a sebesség csökkenésével járó *töltésváltozásról* van szó: a kétszeres pozitív töltésű He^{++} -ionok lefékeződve felvesznek egy elektront. Az így képződött egyszeres töltésű He^{+} -ion már sokkal kevésbé ionizál. Ezek a *töltéscsere-folyamatok* ma lényeges szerepet játszanak a nagyenergiájú nehézion-gyorsítóknak.)

Ezzel csaknem azonos időben Becquerel – vastag rádiumpreparátummal és levegőben mérve – nem állandó, hanem a pálya mentén fokozatosan növekvő R görbületi sugarat, tehát folyamatosan növekvő HR értéket tapasztal. Ő ezt úgy értelmezi, hogy az α -részecske a pálya mentén a levegővel érintkezve, abból



4. ábra. Az α -sugárnyalábok által hagyott nyomok a fényképező lemezen. A felső részen az alumíniumfóliák fékzése miatt a sebesség kisebb, ezért az eltérés nagyobb [12, 1. ábra].

valamilyen anyagrészeket szed fel, és ez az m tömeg megnövekedésére vezet [6, 486. old.]. Rutherford szerint azonban nem ez a helyes magyarázat, hanem az, hogy a heterogén energiájú rádiumforrás, a vastag réteg önabszorpciója, valamint a levegő fékzése nagyon széles α -energia-spektrumot hoz létre, és végül ezért adódik a nagy görbületi sugár. Becquerel azonban – kísérleti eredményeire hivatkozva – vitatja Rutherford fenti álláspontját [6, 488. old.]:

„Cette nouvelle expérience, confirmant les conclusions que j'avais déduites de mes premières observations, conduit à rejeter les interprétations de MM. Bragg, Kleeman et Rutherford.”

Rutherfordnak végre sikerül kísérlettel igazolnia azt a régi sejtését, hogy az α -sugárzás pozitív töltésű részecskékből áll, és azt is, hogy e részecskék már keletkezésük pillanatában töltéssel rendelkeznek, nem a környező anyagi közegben ionizálódnak [13, 200. old.]. A mérést zavaró elektronáramot mágneses térrel téríti el. Azonban még mindig nem sikerül tisztázni, hogy ezen elektronok is a radioaktív bomlás során keletkeznek-e, vagy az α -sugárzás hatására a kísérleti berendezés elektródáiból lépnek ki. Ezt a jelenséget *másodlagos sugárzásnak* nevezi [13, 201. old.]:

„It seems probable that these electrons constitute a type of secondary radiation which results from the impact of the α particles on matter.”

Első 1906-os cikke is [12] a rádium α -sugárzásának tulajdonságaival foglalkozik, különös tekintettel a Becquerellel vitatott mérésekre. Átvesszi Becquerel technikai ötletét: a keskeny α -nyalábot egy csillámlemezzel megfelezi, és e két részen különböző elnyelő rétegeken áthaladt sugárnyaláb mágneses térben történő eltérülését vizsgálja. Így készült – a már fentebb bemutatott – fénykép vákuumban(!): a felső rész nyolc Al-fólia-takarással, az alsó rész pedig takarás nélkül, 4. ábra [12, 1. ábra]. Jól látható, hogy a fóliák által lefékezett nyalábot a mágneses tér jobban eltéríti.

Egy kis anomália, amely történelmet ír

Mivel Becquerel minden mérését levegőben végezte, Rutherford ellenőrzésképpen meg akarja vizsgálni, vajon milyen hatással van a levegő a felvételekre. Ezért egy olyan kísérletet végez el, ahol a nyaláb felső

része levegőn, alsó része vákuumban halad át [12]. A bonyolult kísérlet végrehajtása több lépésben történt, a részletes leírást mellőzzük. Az 5. ábrán nemcsak az látható, hogy a felső részen a csíkok távolsága kissé nagyobb, mint az alsó részen – tehát a levegőben a nyaláb kissé fékeződik –, hanem az is, hogy a felső csíkok kevésbé élesek!

Ez azt jelenti, hogy az α -sugárzás nemcsak eltérül a mágneses tér hatására, hanem *szóródik* is a levegőn történő áthaladásakor [12, 176. old.].

És itt lép be a zseniális nyomozó megérzése: Rutherford ezt az alig észlelhető effektust olyan lényegesnek tartja, hogy a cikk összefoglalójának (5) pontjában külön meg is fogalmazza:

„(5) There is evidence of a distinct scattering of the rays from radium C in their passage through air.”

Ez a megfigyelés volt az atommag felfedezésének kiindulópontja, a „kutatóárok” kezdete!

A következő feladat: meg kell vizsgálni, hogy szilárd fékező közegben is fellép-e a szóródás?

Experiments are in progress to see whether this scattering also occurs in the passage of the rays through a solid substance.” [12, 174. old.]

Csillámlemezrel fedi be az *S* rés alsó felét; a felső részen pedig a részecskék vákuumban, szabadon mozogva eltérülnek a mágneses térben (bal oldalt a 6. ábrán) tér nélkül egyenes vonalban terjedve egyetlen vonalat adnak (6. ábrán jobbra). Most a szóródás hatása sokkal jobban kivehető, mint a teljes térfogatban elosztott levegő esetén, a felvétel önmagáért beszél, 6. ábra [14, 3B ábra].

A berendezés geometriai adatai alapján a szóródás szögére is becslést tud végezni; eredményül azt kapja, hogy egyes α -részek a csillámfólián történt áthaladásakor 2° -os eltérést szenvednek [14, 144. old.]:

„Some of the α rays in passing through the mica have been deflected from their course through an angle of about 2° .”

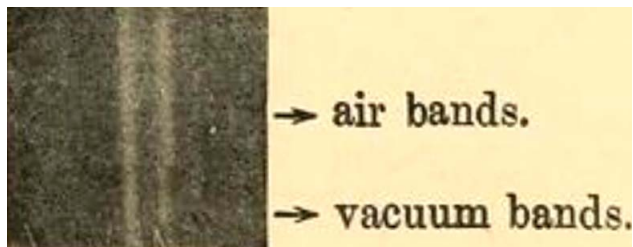
Ez a kis szög – a Thomson-modell alapján – már nagy eltérésnek számított! És gondolatban máris továbblép [14, 145. old.]:

„It is possible that some were deflected through a considerably greater angle; but, if so, the atoms of matter must be the seat of very intense electrical forces.”

Közjáték

A Rutherford által megfigyelt két új jelenség – a *másodlagos sugárzás* és az α -részek *szóródása* – mások érdeklődését is felkeltette, váltakozó következtetésekkel.

Prágában *B. Kučera* és *B. Mašek* vizsgálatokat folytattak a másodlagos sugárzás kimutatására. Arra következtetésre jutottak, hogy másodlagos sugárzás nincs, hanem az α -részek a levegőben vagy fémfóliában szóródást szenvednek [15]:



5. ábra. Az első – levegőben történt – α -szóródást kimutató felvétel [12, 3. ábra].

„Die α -Strahlen beim Durchgang durch eine Luftschicht eine diffuse Zerstreuung erleiden (scattering of the α -rays).”

1907 januárjában W. H. Bragg előadást tart egy ausztrál tudományos társaság előtt. Itt kifejti, hogy sem a Rutherford-féle *másodlagos sugárzást*, sem a Kučera-féle α -szórást nem szükséges feltételezni, hanem csak alkalmazni kell már ismerős törvényszerűségeket [16].

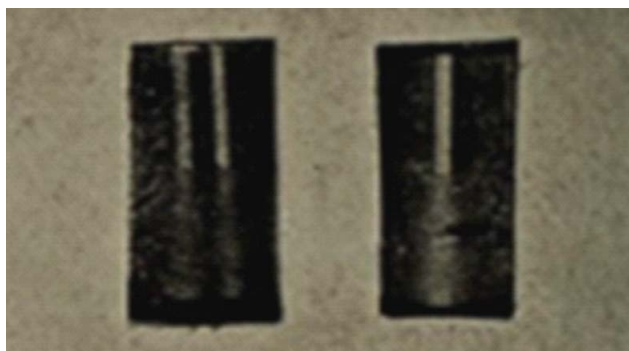
Edgar Meyer méréseket és számítást is végzett α -sugarak elnyelődésére két különböző anyagú, egymás mögött elhelyezett abszorbensfóliával, annak vizsgálatára, hogy a teljes elnyelés mennyiben függ a fóliák sorrendjétől (például $\text{Al} \rightarrow \text{Sn}$, majd $\text{Sn} \rightarrow \text{Al}$). Arra a következtetésre jutott, hogy az eredmények értelmezéséhez sem a másodlagos sugárzás, sem az α -szórás feltételezésére nincs szükség [17]:

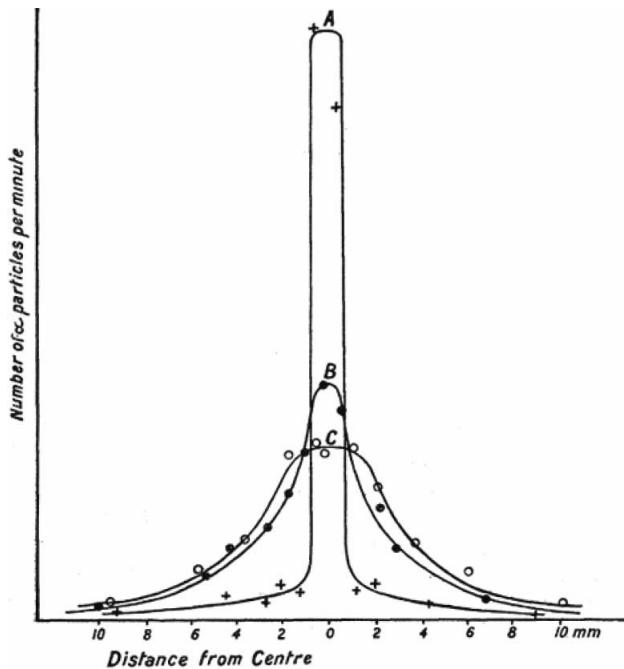
„Nach einer älteren Anschauung von Rutherford sollten an der Hinterseite der ersten absorbierenden Schicht Sekundärstrahlen auftreten. Kučera und Mašek glauben die erscheinung auf eine diffuse Zerstreuung der α -Strahlen in den Metallen zurückführen zu können. Nach meiner Auffassung braucht man keine dieser Hypothesen anzunehmen.”

Lise Meitner 1907-ben tudományos továbbképzésre Berlinbe megy, elsősorban azért, hogy *Max Planck* előadásait hallgassa. De beszámol kísérleti munkájáról is [18], és arra a következtetésre jut, hogy az α -szóródás valóban létrejön:

„Es ergibt sich demnach, dass die von Kučera und Mašek angenommene Zerstreuung der α -Strahlen beim Durchgang durch Metalle wirklich vorhanden ist.”

6. ábra. Vákuumban haladó (felső rész), illetve csillámiban szórt (alsó rész) α -nyalábot mutató felvétel kétirányú mágneses térben (bal oldali ábra), illetve tér nélkül (jobb oldali) [14, 3B ábra].





7. ábra. Vákuumban (A), illetve aranyfóliákon történt α -szóródást mutató ábra. B görbe: egy fólia, C görbe: két fólia alkalmazásával [19, 176. old.].

Út a megoldás felé

Rutherfordot 1907-ben meghívják Angliába, a manchesteri Victoria Egyetemre. A már itt dolgozó *Hans Geiger* asszisztens nagy segítséget jelent későbbi kutatásai során. Rutherford javaslatára 1908-ban Geiger részletes vizsgálat alá veszi az α -szóródást [19]. A radioaktív forrásból származó α -nyalábot vákuumban, vékony résen engedi át egy szcintillációs ernyőre, amelyen mikroszkóppal számolja a látótérbe eső felvillanások számát. Ez a módszer sokkal érzékenyebb és pontosabb – de fárasztóbb – a Rutherford által eredetileg használt fényképező lemeznél. Elvégzi a mérést úgy is, hogy a forrást különböző vastagságú aranyfóliákkal fedi. A kísérlet során Geiger a 7. ábra szerinti eloszlásokat kapja [19, 176. old.].

A vízszintes tengely a mikroszkóp helyzetét mutatja a réssel szembeni középponthoz képest. A rés és az ernyő távolsága 54 cm; tehát még a legnagyobb, 10 mm-es eltérés is nagyon kis szórési szögnek felel meg. Az A görbe a vákuumban felvett eloszlást mutatja. A B görbe egy vékony aranyfóliával fedett réssel készült, míg a C görbe pontjainak felvételénél két aranyfólia volt a rés felett. A cikk záró bekezdésének egy figyelemre méltó mondata [19, 177. old.]:

„It will be noticed that some of the particles after passing through the very thin leaves were deflected through quite an appreciable angle.”

Éppen ezért, hogy a – csak gyanított – nagyszögű szórást is detektálni lehessen, Geiger 1909-ben egy felsőéves hallgató, *E. Marsden* bevonásával olyan új kísérleti berendezést épít, amellyel még a 90° -nál nagyobb szögben szóródott α -részek is észlelhetők, és ezzel az

eszközzel végeznek újabb méréseket. Az eredmények egyre érdekesebbek [20, 498. old.]:

„It seems surprising that some of the α -particles can be turned within a layer of 6×10^{-5} cm gold through an angle of 90° and even more.”

Tehát a *visszaszóródás* most már nem pusztán gyanú, hanem kísérleti tény! Rutherford erre így emlékezik vissza [21, 38. old.]:

„It was quite the most incredible event that happened to me in my life. It was almost as incredible as if you had fired a 15-inch shell at a piece of tissue paper and it came back and hit you.”

Ez a hihetetlen esemény foglalkoztatta Rutherfordot 1910–11 telén. A fejleményről Geiger számolt be *Chadwick*hez írt levelében:

„One day, obviously in the best spirits, he came into my room and told me that he now knew what the atom looked like and how the large deflections were to be understood. On the very same day I began an experiment to test the relation expected between the number of particles and the angle of scattering.”

1910-ben Geiger egy újabb kísérletsorozatát végez [22], amelynek során különböző aranyréteg-vastagságokhoz tartozó szóródási szögek gyakoriságát veszi fel, 8. ábra. De még mindig csak *többszörös szórás* feltételezéséről van szó, tehát arról, hogy a kísérletileg mért nagy szögek több, egymás után következő, kisebb szögű esemény összegződéséből alakulnak ki. De most Geiger az új mérési eredmények, valamint a korábbi, Marsdennel végzett mérésük adatai alapján becslést végez, és arra a következtetésre jut, hogy *nagyon kicsi a valószínűsége annak, hogy ez a szórás sok kis eltérés összege legyen*. Egy sejtelmes mondattal zárja a fejezetet:

„It does not appear profitable at present to discuss the assumption which might be made to account for this difference.”

Talán sejtí, de nem meri kimondani, hogy *egyetlen ütközésben történhet ilyen nagy eltérés!*

8. ábra. Különböző vastagságú aranyfóliákon szórt α -részek szögeloszlása [22, 497. old.].

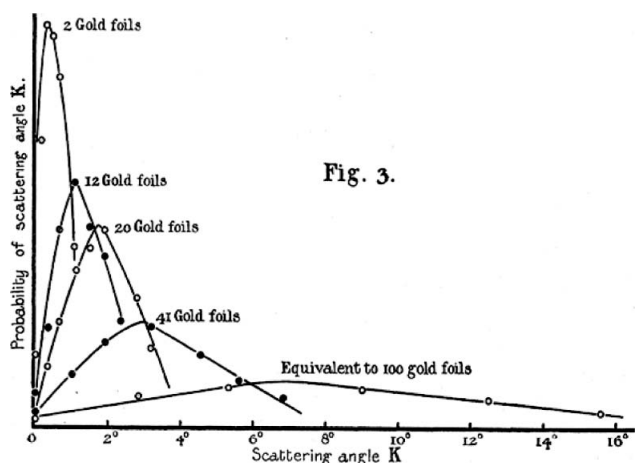
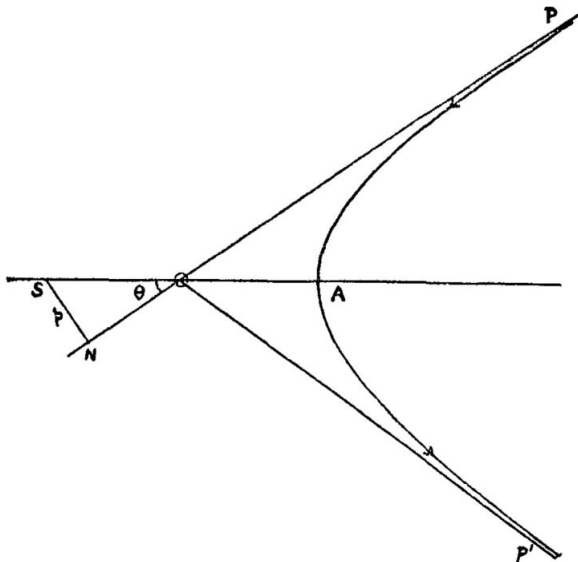


Fig. 3.



9. ábra. Rutherford 1911-es *Philosophical Magazine*-beli cikkének 1. ábrája, amelyen megjelenik a pontszerű mag által hiperbolapályára kényszerített α -részecske [25, 672. old.].

Egy új, más világ!

De Geiger helyett kimondja Rutherford: 1911 februárjában a Manchesteri Irodalmi és Tudományos Társaság (The Manchester Literary & Philosophical Society) ülésén Rutherford megteszi történelmi bejelentését [23, 19. old.]:

„It seems certain that these large deviations of the particle are produced by *a single atomic encounter*.”

Ennek értelmezéséhez pedig fel kell tételezni, hogy az atom egy *pontszerű* elektromos töltésből és azt egyenletes gömbszimmetrikus eloszlással körülvevő, azonos mennyiségű ellentétes töltésből áll:

„In order to explain these and other results, it is necessary to assume a type of atom which consists of a *central electric charge concentrated at the point* and surrounded by a uniform spherical distribution of opposite electricity equal in amount.”

Modellje alapján kvantitatív előrejelzést ad a szórási hatáskeresztmetszet szögfüggésére, hogy tudniillik az arányos az

$$\frac{1}{\sin^4(\theta/2)}$$

értékkel. Szükségesnek tartja még hozzátenni, hogy a vázolt atommodell megmagyarázza a kísérleti eredményeket, függetlenül attól, hogy a központi töltés pozitív vagy negatív [23, 20. old.]:

„The main results of large scattering are independent of whether the central charge is positive or negative.”

Ugyanezen alkalommal, közvetlenül Rutherford előadása után számol be Geiger arról a mérésorozatról, amelynek során a 30° és 150° szögtartományban el-

lenőrizte a Rutherford-formula érvényességét egy aranyfólián történő szórással, szcintillációs detektálással, és hibahatáron belül egyezést talált a számított és mért értékek között [24].

1911 áprilisában Rutherford beküldi a részletes – húsz oldalas – cikket a *Philosophical Magazine*-nak¹ [25]. A bevezetőben kitér arra is, hogy a Thomson-féle atommodell [7] által jósolt kisszögű szórás nehézségeire már *Crowther* elektronszórási kísérlete is rávilágított [26]: ha a Thomson modell igaz, akkor a kísérleti szórás értelmezéséhez háromszor annyi elektronnak kell lennie az atomban, mint ami az atomsúlya. (Az eredeti Crowther-cikk tanulmányozva pedig azt látjuk, hogy ez még csak egy alsó határ: a két vizsgált modell közül a jobbnak elfogadott érték.)

Ebben a cikkében Rutherford már a szórási hatáskeresztmetszetre vonatkozó számítások részleteit is közli. Számszerű becslést ad az α -rész legkisebb megközelítési távolságára ($b = 3,4 \cdot 10^{-12}$ cm) [25, 671. old.]. Ez tehát egyúttal felső határ a magsugárra. Közleménye 1. ábráján berajzolja a hiperbolapályát, a magtól számított ütközési paraméterrel – akárcsak egy mai tankönyv ábráját látnánk (9. ábra).

Epilógus

Rutherford a számításokhoz – egyszerűsítő feltételként – a magot pontszerűnek fogadja el, de már számol azzal a lehetőséggel, hogy *a mag kiterjedt és összetett*, és hogy ez további vizsgálat tárgya lehet [25, 686. old.]:

„It is of interest to examine how far the experimental evidence throws light on the question of the extent of the distribution of the central charge.”

Az eddigi kísérleti anyag alapján mindenesetre úgy véli, hogy a nagyszögű szórást a teljes központi töltés egésze okozza és nem az összetevők:

„It is simplest to suppose that the *large single deflexions are due to the central charge as a whole*, and not to its constituents.”

És itt már egy másik téma kezdődik: az atommag mérete és szerkezete.

Irodalom

1. E. Rutherford: Excited Radioactivity and the Method of its Transmission. *Phil. Mag.* 5 (1903) 95.
2. H. Becquerel: Sur la radioactivité de luranium. *Comptes Rendus* 133 (1901) 977.
3. E. Rutherford: The Magnetic and Electric Deviation of easily absorbed Rays from Radium *Phil. Mag.* 5 (1903) 177.
4. H. Becquerel: Sur la déviabilité magnétique et la nature de certains rayons émis par le radium et le polonium. *Comptes Rendus* 136/1 (1903) 199.
5. H. Becquerel: Sur une propriété des rayons α du radium. *Comptes Rendus*, 136 (1903) 1517.

¹Ernest Rutherford történelmi cikke megnézhető-letölthető a http://fizikaiszemle.hu/extra/Angeli2106/E_Rutherford_PhilMag_21_669_1911.pdf helyről.

6. H. Becquerel: Sur quelques propriétés des rayons α du radium. *Comptes Rendus* 11 (1905) 485.
7. J. J. Thomson: On the Structure of the Atom: an Investigation of the Stability and Periods of the Oscillation of a number of Corpuscles arranged at equal intervals around the Circumference of a Circle; with Application of the results to the Theory of Atomic Structure. *Phil. Mag.* 7 (1904) 237.
8. Simonyi K.: *A fizika kultúrtörténete*. Gondolat Kiadó, Budapest, (1978).
9. E. Rutherford: The Succession of Changes in Radioactive Bodies. Bakerian Lecture. *Phil. Trans. Roy. Soc. A204* (1904) 169.
10. E. Rutherford: The Succession of Changes in Radioactive Bodies. *Nature* 70 (1904) 161.
11. E. Rutherford: Some Properties of the α -Rays from Radium. *Phil. Mag.* 10 (1905) 163.
12. E. Rutherford: Some Properties of the α -Rays from Radium. *Phil. Mag.* 11 (1906) 166.
13. E. Rutherford: Charge carried by the α and β Rays of Radium. *Phil. Mag.* 10 (1905) 193.
14. E. Rutherford: Retardation of the α -Particle from Radium in passing through Matter. *Phil. Mag.* 12 (1906) 134.
15. B. Kučera, B. Mašek: Über die Strahlung des Radiotellurs III. Die Sekundärstrahlung der α -Strahlen. *Physikalische Zeitschr.* 7 (1906) 650.
16. W. H. Bragg: The Influence of the Velocity of the α particle upon the Stopping Power of the Substance through which it passes. *Phil. Mag.* 13 (1907) 507.
17. E. Meyer: Die Absorption der α -Strahlen in Metallen. *Physikalische Zeitschr.* 8 (1907) 425.
18. L. Meitner: Über die Zerstreung der α -Strahlen. *Physikalische Zeitschr.* 8 (1907) 489.
19. H. Geiger: On the Scattering of α -Particles in Matter. *Proc. Roy. Soc.* 81 (1908) 174.
20. H. Geiger, E. Marsden: On a Diffuse Reflection of the α -Particles. *Proc. Roy. Soc.* 82 (1909) 495.
21. W. E. Burcham: *Nuclear Physics. An Introduction*. 2nd Ed. Longman (1973).
22. H. Geiger: The Scattering of the α -Particles by Matter. *Proc. Roy. Soc.* 83 (1910) 492.
23. E. Rutherford: The Scattering of the α and β Rays and the Structure of the Atom. *Manchester Mem.* 55 (1911) 18.
24. H. Geiger: The Large Scattering of the α Particles. *Manchester Mem.* 55 (1911) 20.
25. E. Rutherford: The Scattering of α and β Particles by Matter and the Structure of the Atom. *Phil. Mag.* 21 (1911) 669.
26. J. A. Crowther: On the Scattering of Homogeneous β -Rays and the Number of Electrons in the Atom. *Proc. Roy. Soc.* 84 (1910) 226.

A FIZIKA TANÍTÁSA

SZABADULÓSZOBA A FIZIKAÓRÁN

– tanteremben és online

Nógrádi Zsófia

ELTE Radnóti Miklós Gyakorló Általános Iskola
és Gyakorló Gimnázium

Sokszor hallani, hogy a pedagógusok hétköznapi tapasztalataikat is beleszövik a tanításba. Ha ezt halljuk, elsősorban a mindennapi életből vett feladatokra, alkalmazásokra, eszközökre gondolunk, de ennél jóval többről van szó. Pár éve ismerkedtem meg a szabadulósobák világával, ami olyannyira magával ragadott, hogy gyakorló tanárként úgy döntöttem, ezt az élményt a diákjaimmal is megosztom.

Hazánkban a szabadulósobák, a szórakoztatóipar egy új ágának számítanak, hiszen az első 2011-ben nyitotta meg kapuit. A játék jelentősége az, hogy adott idő alatt logikai, ügyességi feladatokat kell elvégezni, hogy kijussunk egy bezárt szobából, vagy megoldjunk egy rejtélyt. Az idő sürgetése, a feladatok

érdekessége, a rejtély felderítése okozta izgalom serkenti a feladatmegoldók hatékonyságát.

A szabadulósobák fejlesztik a kreatív, sokoldalú gondolkodást, és a különböző dolgok közti összefüggések keresését szorgalmazzák, így jelentős fejlesztő tulajdonságokkal rendelkeznek a szórakozás mellett.

A nemzetközi irodalomban a szabadulósobák használatának ötlete a tanításban mindössze 9 éve jelent meg *Hoellwarth, Moelter* írásában [1]. A magyar nyelvű oktatásban cikkeivel *Vörös Alpár* kolozsvári tanár hívta fel rá a figyelmet [2, 3]. Egészen más témakörökben az elmúlt tanévben 8., 9. és 10. évfolyamon tartottam 5 ilyen foglalkozást (45 perces terjedelemben). Az alábbiakban ezekkel kapcsolatos tapasztalataimról számolok be.

Pedagógiai jelentőségei

A fentiekben túl jelentősen támogatja az oktatásban egyre nagyobb helyet kapó gamifikációt,¹ amelynek hatékonyságáról és pozitív hozadékairól többen szá-

¹Játékelemek felhasználása az oktatásban, vagy más munkafolyamatok során.



Nógrádi Zsófia az ELTE Radnóti Miklós Gyakorló Általános Iskola és Gyakorló Gimnázium matematika–fizika szakos tanára. Az ELTE-n 2020-ban végzett okleveles középiskolai matematika- és fizikatanárszakra, valamint fizikus diplomát szerzett informatika specializációval.

 <p>Kiss Béla</p> <p>Kor: 36 év Foglalkozás: ékszerszakértő Indíték: az ellopott ékszerek között van egy diadém, amit feltehetően Sisi hercegné ajándékozott az egyik szolgájának.</p>	 <p>Molnár Ernő</p> <p>Kor: 75 év Foglalkozás: nyugdíjas Indíték: az ékszerbolt régi dolgozója, aki évekig minimálbérért dolgozott. Végül a nyugdíj előtt 2 hónappal az üzlet vezetője kirúgta.</p>	 <p>Nagy Anikó</p> <p>Kor: 41 év Foglalkozás: a Pandóra ékszerlánc vezetője Indíték: a jölnéző ékszerbolt hírnevének csorbítása.</p>	 <p>Pál Géza</p> <p>Kor: 29 év Foglalkozás: bróker Indíték: az üzletlanc tulajdonosa elszertette tőle a menyasszonyát.</p>
 <p>Piti Attila</p> <p>Kor: 43 év Foglalkozás: banki szakértő (a tulajdonos nagybátyja) Indíték: családi örökösödési viták.</p>	 <p>Antal Tiffany</p> <p>Kor: 28 év Foglalkozás: háztartásbeli (a tulajdonos felesége) Indíték: féltékenység.</p>	 <p>Süle Mihály</p> <p>Kor: 37 év Foglalkozás: a Tiffany & Co. könyvelője Indíték: feltételezhető kapcsolat a fekete-piacal.</p>	 <p>Németh Aranka</p> <p>Kor: 63 év Foglalkozás: ékszerértékelő Indíték: szenvedélyesen szereti az ékszereket, az egyik nyakéket mindig is magának akarta.</p>
<p>Németh Aranka nem elég magas a büntett elkövetéséhez.</p> <p>Pál Géza pedig egy kézműtém miatt nem tudta volna betörni az üzlet ablakát.</p>	<p>Süle Mihály térde egy tenisz meccsen megsérült két héttel a bűncselekmény előtt és azóta is mankóval jár.</p> <p>Nagy Anikó nem ismerhette az ékszerbolt védelmi rendszerét.</p>	<p>Antal Tiffany tériszonyos, így nem ugorhatott ki a 3. emeletre.</p> <p>Kiss Béla nem ismerhette annyira az ékszerbolt tervrajzát, hogy megtalálja az elrejtett lépcsőt a 3. emeletre.</p>	<p>Piti Attilának nincs kocsija.</p>

Kinematika szabadulószoza (ékszerrablás, tettesek és nyomok listája) – összefoglaló

vetlen célt – a jó jegyen és tudáson kívül – amiért érdemes elvégezni a feladatokat. Pedagógiai szempontból kijelenthető, hogy van létjogosultságuk az oktatásban az ehhez hasonló tevékenységeknek.

A sokszor felmerülő kifogás az idő, amire a pedagógusok hivatkoznak a folyamatos időszűke miatt. Eddig 8. 9. és 10. évfolyamon tartott a szabadulószozákhöz hasonló tematikus órák alapján azt mondhatom, hogy a gyerekek körülbelül ugyanannyi feladat megoldására képesek így, mintha csak simán kiadnám a feladatokat. Bár a kiegészítő játékelemek plusz időt jelentenek, de nagyobb az ösztönzés az elvégzésükre, és a játékelemek az óra azon részeit is hasznosítják, amiket a diák a természetes koncentrációkieséssel töltene.

Miért hasznos a fizikatanításban?

A tudományok terén még ezeken felül további előnyöket is mutatnak a rejtvényfejtő játékok. Az ilyen feladatok tökéletesen alkalmasak arra, hogy megmutassák, azt, miként használják a tudományokat a különböző szakmák, vagy a hétköznapi eszközök működésében, tervezésében milyen fontos szerepe van a

fizikának. Arról a fontos előnyről nem is beszélve, hogy mindeközben gyakorlati feladatokat, kísérleteket végezhetnek játékos köntösben. Sok esetben a motiválás szerepét tölthetik be az ilyen jellegű órák, hiszen a diákság érdeklődési körének megfelelő tematikát választhatunk, ami lehet az adott korosztályban felkapott sorozat, film vagy játék. Idősebb korosztályok esetén a pályaorientációt is lehet támogatni, megmutatva az egyes szakmák mindennapjait, amiben a fizikát hallgatólagosan is használják a munkában. A mindennapi témákat is elő lehet venni, főleg az energiateljesítmény, -termeléssel kapcsolatban, de a napjainkban egyre fontosabbá váló új technológiákat használó eszközök esetén is. Feladat megoldás során arra is felhívhatjuk a figyelmet, hogy a híreket mindig kritikusan értékeljük és ne higgyenek el mindent, amit olvasnak.

molnak be, akár olyan neves műsorokban is, mint a TED.² Az irodalomjegyzékben megadok három TED-epizódot, amelyet a gamifikációval kapcsolatban érdemes megnézni [4–6].

A már említett kreatív és gondolkodási képességfejlesztés mellett a kooperációt is segítik a szabadulószoza játékok. A gondolkodási képességeken belül a kombinatív és a logikai képességre fókuszál, de a játék jellegétől függően a konvertáló, rendszerező, induktív vagy deduktív gondolkodás képessége is fejleszthető. A játék keretében a diákok kevésbé érzik száraznak a feladatmegoldást, látnak egy köz-

²Konferenciasorozat, amelyben az előadóknak rövid idő áll rendelkezésükre. A szervezet jelszava: „ideas worth spreading”, vagyis azokat a témákat támogatják, amelyeket továbbadásra érdemesnek ítélek.

Eddigi munkáimról röviden

Eddigi munkáim elsősorban gyakorló vagy összefoglaló órára készültek, ugyanis a diákjaimon azt láttam, hogy a feladatmegoldására nehezen tudnak koncentrálni, ha nincsen rajtuk plusz nyomás (mint például a jegyszerzés).

Gondolkodni kezdtem, milyen plusz motivációval állhatnék elő, így készítettem első szabadulósobámat a 9. évfolyamos diákjaimnak a *Munka, energia* témakörben. E témához kapcsolódóan hamar adódott a kerettörténet ötlete, hiszen a ballisztikusok is hasonló számolásokat végeznek a fegyverek azonosításakor, így egy gyilkossági nyomozásban való részvétel volt a feladatuk. Én a rendőrkapitány szerepében „játszottam” velük. Az első feladatok még nem a büntetthez tartoztak, ezek helyes megoldását kellett a főkapitánynak bemutatniuk, hogy megbízza őket a nyomozással. Ezzel máris minden csapat megfejtett 3 feladatot, amelyek megoldását leellenőriztem. Ezt követően bíztam meg a csapatot a nyomozással és egy kezdő nyomot, vagyis 3 feladatot és instrukciókat kaptak, hogy a teremben elrejtve, a saját csapatszínüknek megfelelően 7 gyanúsított fegyvert és 2 feladatot kellett megtalálniuk. Innentől kezdve a feladatok lényege az volt, hogy ki tudjanak zárni fegyvereket a lehetőségek közül. Ehhez a lőfegyverek löereje, golyóméretek voltak adva, a feladatok során, pedig a büntetnél történt lövéshez kapcsolódó 6 feladat találtak. Ha ezeken végigértek, akkor újra jelentettek a kapitánynak a gyilkos fegyverről. Itt egy újabb ellenőrző pont volt a játékban. Eddig minden csapat eljutott, de az utolsó két feladat – amelyben már a büntény során használt fegyverrel kapcsolatos adatok kiszámításával segítettek a nyomozás menetét – megoldása már nem minden csapatnak sikerült. Ezen óra pozitív élményei és hasznosságán felbátorodva (hiszen az óra során minden csapat legalább 9, nem túl nehéz, de gyakorlásnak megfelelő feladatot oldott meg) próbáltam ki más évfolyamokon is az ilyen játékos tematikus órákat.

A 8. osztály esetén a *Kinematika* kapcsán szintén egy büntényben segítettek a nyomozást: egy ékszerabló kilétét kellett kideríteni a menekülési útvonalából és a sebességéből. Ez volt az első olyan szabadulósobás óra, ahol már dekódert³ is használniuk kellett. A feladatok eredményei – más számokkal együtt – egy hosszú papírcsíkra voltak felírva, amihez minden csapat megkapta a saját kódfejtőjét. Esetünkben egy WC-papírgurigát, amire pedig a „START” és a terem különböző helyei voltak felsorolva. Ha a papírt feltekerték a gurigára, akkor a feladatok megoldásaként kapott számok jelezték a következő feladatok helyét a teremben. E feladatkörben minden csapat 3 fős volt, minden körben 3 feladatot kaptak, amelyeket külön-külön is megoldhattak (ezt az óra elején jeleztem nekik), és akkor tudtak továbbmenni, ha az eredmények azonosak voltak. Ezáltal volt benne ön-



Kinematika szabadulósobába dekóderek (ékszerablás).

ellenőrzés, és én is láttam, hogy jó helyen keresik-e a következő feladatot.

A 10. évfolyam esetén a *Termodinamika* témakörrel próbálkoztam. Itt újabb problémával szembesültem: sokan tudják, nem fizikával szeretnének foglalkozni. Nyelvi előkészítősként úgy gondoltam egy vitarész jó lehet a játék során. Négy csapatot alakítottunk, de volt köztük egy álcsapat. Három csapat egy hőerőmű hamisított adatait kapta meg, amelyből azt tudták leszűrni, hogy a hőerőgép teljesítménye az adatok alapján 100%-os, míg az álcsapat – a lefizettek – tudták, hogy az erőmű alatt egy biológiai laboratórium van, ahol a rák ellenszerét fejlesztik. A vita fontos feltétele, hogy minden csapatban, azaz mindkét oldalon legyen fizikából jobb teljesítményű tanuló. A vita után, ami szerencsére azzal zárult, hogy a hőerőgéppel baj van, megkapták a valós adatokat, amiből már ki tudták számolni, hogy mennyi az a hő, amit a titkos labor hasznosít. Végül azt is megtudták, hogy a laborban nem a rák ellenszerével kísérleteznek, hanem egy gyilkos vírussal, amivel kapcsolatban a kinetikus gázmodellel kellett számolniuk. Jelen pandémiahelyzet mellett természetesen ez a téma nem lenne túl pozitív, de erre a játékra még a járvány előtt, novemberben került sor. Az utolsó feladatban – természetesen – a világot kellett megmenteni a vírustól úgy, hogy megfelelő kinetikus energiájú elektronnal kellett bombázni a vírust. E játéknál különösen kell figyelni, hogy a vita ne húzódjon el túl hosszán, bár hasznos, hiszen az adatok kritikus vizsgálatára tanítja őket az érvelés gyakorlása mellett.

Ezeket követően a 8. osztályban tartottam még egy szabaduló szobát a *Dinamika* témakörben, az erőtvényeket hangsúlyozva. Ebben piramist kellett építeniük. A témát az akkori projektnapjuk befolyásolta és az akkori matematikavizsgájuk miatt az utolsó feladatban egy kis gazdasági kérdés is szerepet kapott.

³Titkosírás megfejtésére alkalmas eszköz.



Dinamika szabadulószoza „pergamenbe” tekert nyomai (piramis-építés).

A játékokban minden nyomot egyszerre kaptak egy „pergamenbe” tekerve. Sznofru építészeiként kellett megtervezniük, hogy a piramis építéséhez milyen anyagokat, milyen kötelet és állványzatot használnak. Ehhez a kötélt szakítószilárdsága, a rabszolgák húzóereje, az állványzat és az építők között fellépő súrlódás szolgált segítségül. Az utolsó feladatban pedig már csak az határozta meg a döntést, hogy melyik a leggazdaságosabb választás a felsoroltak közül, de a feladatban a mennyiségek és az árak egyiptomi számokkal voltak megadva, amit meg kellett fejteniük.

És végül egy 9. évfolyamos *Körmozgás* témájú csillagászati szabadulószozában, a csillagászok egy furcsa kis égitestet találtak, amiről azt a feltevést tették, hogy a kisbolygóöv egy objektuma. A számítások során a kisbolygóöv pár nagyobb objektumát kellett kizárniuk a lehetőségek közül, míg végül arra a megdöbbentő megfigyelésre jutottak, hogy egyik objektumnak sem felel meg az új megfigyelés. Itt egy kicsit elakadtak, hiszen azt gondolták, hogy valahol valamit elrontottak, ezért nem jött ki egyik objektum sem. De miután ezen elbizonytalanodáson túljutottak, az ismeretlen objektumról kellett a lehető legtöbbet megtudniuk. Egy koncentrikus körökből álló dekóder segítségével megkapták a kisbolygó tömegét, majd a gravitációs törvényt felhasználva arra is rájöttek, hogy a kisbolygó nem körmozgást végez, hanem egyre közeledik a Föld felé. Utolsó feladatként ezt egy úrtárságnak kellett jelezniük, de csak egynek adhatták le a vészjelzést, hogy melyiknek, azt bináris ASCII kód⁴ megfejtésével tudták meg.

A távoktatásban is használtam szabadulószozákat GoogleForms és tömörítő program segítségével, de ezeket matematikaórán használtuk a 100. órán és az év végi összefoglalás során.

⁴American Standard Code for Information Interchange

Eddigi tapasztalataim alapján a gyerekek aktívabban oldják meg a feladatokat, mintha az nem lenne rejtvénybe öltöztetve, és a témaválasztással azt is mutathatjuk feléjük, hogy nem csak az órai munkájukkal vagyunk tisztában, de más tevékenységüket is követjük. Ilyen volt például más tárgyhoz (történelem) kapcsolódó kerettörténet választása: a piramisépítés, amivel segítjük a pozitívabb hozzáállást a fizikához.

Pár témaötlet adott témakörökhöz

A fizika alkalmazási területei:

- nyomás: orvoslásban a szikék milyen mély sebeket vágnak;
- statika: építészek, mérnökök milyen számításokat végeznek a födémek, tartószerkezetek tervezésekor (modellkészítés is tartozhat hozzá);
- kinematika: versenysportolóknak mennyi idő kell, hogy lehagyják az előttük lévő sportolót, hova kell célozni a labdával, hogy a csapattársunk érjen oda és ne az ellenfél játékos;

Globális kérdések:

- energiaprobléma: erőművekben az energiatermelés, az energiafelhasználás adataival való összevetés;
- környezeti problémák: vízszintemelkedés magyarázata a jégsapkák olvadásával. Mennyivel növeli a vízszintet a jég olvadás, mennyivel – a növekvő átlaghőmérséklet miatt kialakuló – hőtágulása;
- alternatív energiaforrások: biomassa, hulladékégetéssel keletkező energia mennyire hatékony? Legyenek ők az energia-szakértők, milyen erőforrással hajtsuk a város buszait? Majd összegzésként azt is gondolják meg – esetleg internet használatával, utánanéző –, hogy a tervük mennyire reális? Van-e elegendő hulladék hozzá? Vagy megoldható vízhejtással? Fel tud-e menni a busz a várhoz? Gyakorlottabb diákok esetén a kérdésfelvetéseket hagyjuk rájuk, ellenkező esetben segítsük őket pár minta kérdéssel.

Filmek, sorozatok, krimi:

- munka energia: milyen fegyverrel ölt a gyilkos? Ballisztikai vizsgálatok a bűnfelderítésben;

Körmozgások szabadulószoza dekóder (ismeretlen kisbolygó azonosítása).



- kinematika: *Harry Potter és az azkabani fogolyban* milyen gyorsan repül a cikesz? Mennyi idő alatt ér le a seprűjéről leeső Harry? Mekkora lenne a becsapódási sebesség, ha Dumbledore nem lép közbe? Milyen gyorsnak kell lennie Harrynek és Hermionénak, hogy kimenekítsék Siriust?
- hőtan: *Trónok harcában* milyen hőmérsékletű a sárkányok tüze? Lehet-e ezzel felégetni egy várost? Alkalmas-e kardkészítésre?

Saját munkáim alapján próbálok segítséget nyújtani a kollégáknak abban, hogy miként álljanak neki a tervezésnek és a megvalósításnak.

A tervezés menete

Ebben a részben azokat a fő pontokat mutatom meg, amelyek alapján gondolkodni szoktam és amelyek átgondolása a játék létrehozásának fontos mérföldkövei.

Témakör kiválasztása

- Szeretnénk-e visszatekinteni az előző anyagrészeire? Vagy céltudatosan csak ehhez az anyagrészhöz szeretnénk feladatokat?

A tanóra típusának megválasztása

- Új ismeret közvetítő játék: ekkor ugyanazon fogalom több oldalról való megvilágítása – alkalmazások megismerésével, kipróbálásával – a fontos.
- Gyakorló óra: ilyenkor úgy érdemes gondolkodni, hogy az ellenőrzést a tanulók maguk tudják végezni. Például felhívhatjuk a diákok figyelmét, hogy érdemes-e felosztani a feladatokat – ez esetben ugyanazok az értékek kell kijöjjenek a továbbhaladáshoz –, vagy inkább együtt csinálják a feladatokat, mert minden feladat más-más típusú, így biztosan nem marad le egyik csapattag sem.

Feladattípusok megválasztása

- Milyen feladatokat szeretnénk? Számológépeket oldjanak meg? Kísérleteket végezzenek el? Vagy keressenek alkalmazásokat, alkossanak modellt? Gyakorolják a tudományos érvelést? Válaszoljanak közben gondolkodtató kérdésekre?
- Ennél a pontnál azt is érdemes figyelembe venni, hogy a fontosabb feladatokat vegyük előre, hiszen előfordulhat, hogy nem minden csapat jut ki a szobából az óra végére. Nagyon fontos, és talán a legnehezebb is, hogy csak annyi feladatot adjunk, hogy az óra vége előtt legalább egy csapat kijusson. Hiszen az így szerzett pozitív tapasztalat az, ami a későbbi játékok elvégzését is motiválja.

Játékelemek kiválasztása

- Milyen típusú dekódert használjanak? Például papírfecnik feltekerésével kapják a nyomot, esetleg csak UV-lámpával megvilágítva látszik (UV-lámpát könnyen, akár maguk is készíthetnek)? Színszűrőt kell használniuk, vagy hőre előbukkanó írást rejtünk el. Hogy kapják a következő „nyomot”? Mi-

lyen titkosírást törjenek fel? Lakatos dobozokat kell-e kinyitni, vagy egy programba beírni a megoldást, hogy tovább engedjen? Ők keresik fel a nyomokat a teremben? Esetleg valamit szét kell szerelniük, hogy meglegyenek a nyomok? Vagy egy eszközön végzett mérés lesz a megoldás nyitja?

- Sok esetben ez a kerettörténet kitalálásával párhuzamosan történik. Például, ha a szabadulószoa az ókori Egyiptomban játszódik, akkor a titkosírás adja magát: az egyiptomi hieroglif írás. Vagy a körmozgás esetén magától adódó bolygómozgásos feladatok esetén az ASCII kódolás.

Kerettörténet – másodlagos cél választása

A feladatok elvégzésén kívül sokszor fogalmazunk meg más célokat is. Például, ha arra hívjuk fel a figyelmet, hogy az interneten mennyi valótlan adat van, akkor első lépésként keressenek ők adatokat a neten. Ha a megtevesztésre hívjuk fel a figyelmet, akkor a kerettörténetben egy ilyen adathamisítás felkutatása a feladat. Konkrétan például egy erőmű adataiban való hamisítás. De az érvelés is lehet egy cél.

Mindezeket átgondolva jöhet a kerettörténet kitalálása, milyen történetfonálra tudom ezeket mind felfűzni? Ez persze sok esetben az egész tervezést megelőzi. Olyakor a kerettörténetből indulunk ki és ahhoz igazítjuk a feladatokat és a játékelemeket.

A „szoba” létrehozása

Az elmúlt időszak tapasztalatai alapján itt is többféleképpen járhatunk el.

- Először nézzük meg, hogy milyen egyszerű megoldások vannak az online szabadulósobákra. Ezek közül a legtöbbször által ismert forma a *GoogleForms* segítségével létrehozott felület.
- Ez azért alkalmas a játék megalkotására, mert beállítható, hogy csak akkor engedje tovább a játékot, ha helyesen válaszolt, sőt segítségeket is lehet megadni, amelyek rossz válasz esetén megjelennek. Erre természetesen nem csak a *GoogleForms* alkalmas, bármilyen szavazórendszer-alapú programmal lehet próbálkozni. De előtte gondoljuk végig mit szeretnénk a felületről!
- Ellenőrizze a kérdéseket!
- Csak jó válasz esetén engedjen tovább. (Rossz válasz esetén dobja vissza a kérdést még egyszer.)
- Előnyös, ha nem csak a felsorolt válaszokból szemez a diák, hanem saját választ írhat.
- Hivatkozások, URL-címek megadására alkalmas, ha esetleg a játék más felületen van. Ilyen játékos felületek például az Okosdoboz [7] vagy a Learning-Apps [8]. Ezek önmagukban is alkalmasak játékok létrehozására.

Ezek a szobák mind a digitális oktatásban, mind tablettes órán jól alkalmazhatók. Léteznek specifikusan a távoktatáshoz szabott szabadulószoa-játékok is, amelyekhez nem szükséges végig online lenniük a diákoknak, csak a játék elküldéséhez és fogadásához kell internet. Ezek egyike a PPT-alapú, ahol szintén be lehet állítani, hogy adott helyen kattintva melyik



A bűvös kocka rejtélye

Elterjedt a híre egy bűvös kockának, amit minden kocka közül a legnehezebb kirakni. De nem csak kirakni nehéz, de megtalálni is. Ahhoz, hogy megtaláld, a következő feladatokat kell elvégezned. Légy figyelmes és óvatos, ki tudja mivel találkozol az úton.

Következő



A bűvös kocka rejtélye (matematika, nyelvi előkészítő évvégi ismétlés, online).

több nyomot is lehet hagyni, mint amire szükségük lesz, ezzel a kritikus gondolkodás fejleszhető, amivel elérhetjük, hogy ne gondolkozás nélkül húzzanak rá a feladat adataira egy általuk ismert összefüggést, hanem a feladat alapján gondolják meg, milyen összefüggésre lesz szükségük és kiszűrjék az esetleges felesleges adatokat. A tervek megvalósításánál érdemes először a kerettörténethez passzoló feladatokat megírni, majd azután létrehozni a játékelemeket, hogy azok mindenképpen alkalmazkodjanak a feladatok megoldásaihoz.

diára ugrik tovább a bemutató. Ehhez mélyebb PowerPoint-ismeret szükséges, hiszen a prezentációkészítő programnak nem ez az elsődleges funkciója, így kevésbé segíti az ilyen irányú felhasználást. Ennek ellenére gyorsan tanulható. A másik hasonló megoldáshoz tömörítőprogram szükséges, például a sokak által a hétköznapokban is ismert WinRAR. Ekkor a dokumentumok csomagolása jelszóval védett. Egy-egy pálya állhat a feladat leírásából, egy segítségfájlból, az esetleges játékelemhez szükséges fájlból (például titkosírás megfejtéséhez segítség, puzzle vagy útvesztő). Majd a feladat megoldásaként jutunk el a megfejtéshez, amit felhasználva tudják csak kicsomagolni a diákok a következő pályához tartozó tömörített fájlt. Az eddig felsorolt online vagy félig online szobáknál éppen a mozgásos, keresgélős része vész el, és a kísérlet elvégzése is kérdésessé válik. Azonban az egyszerű feladatmegoldásnál a kerettörténet és a játékoság miatt pozitívabban értékeli a diákok.

Tanárszemszögből kiemelendő pozitívum, hogy a szoba rejtvényeinek megoldásához elvégzendő feladatok ellenőrzöttek, így azzal a tanárnak már nem kell bajlódnia. Az utolsó feladat megfejtése után pedig lehet egy üzenet vagy kód, amelynek beküldésével ellenőrizhetjük, hogy a diák valóban megoldotta a feladatot.

A tantermi oktatás során a szabadulósobák sajátosságai jól megvalósíthatók. Tudnak elrejtett nyomokat keresni, kézi dekódereket használni, lakatokat kinyitni. *Vörös Alpár István Vita* korábbi, szabadulósobákkal foglalkozó cikkében [9] olvashatunk is arról, hogy mennyivel hatékonyabbak az olyan játékok, ahol lakatokat is használnak, mint a sima borítékos változatok. Ezek létrehozásához két segédweboldalt is ír, amelyek az irodalomjegyzékben megtalálhatók [10, 11].

Borítékos szabadulósobák esetén azzal lehet játszani, hogy a nyomokat felhasználva jöjjenek rá, hol kell keresni a következő feladatot, míg végül el nem jutnak a megoldáshoz. Ugyanakkor az is működőképes, hogy megmondjuk, hány nyomot kell megkeresniük a teremben, de nem adunk hozzá segítséget. Ekkor lehetőleg ne ugyanoda rejtjük el mindegyiket, hiszen a csapatok figyelik egymást. Mindeközben

Összegzés

Bár elsöre rémisztőnek tűnhet egy ilyen óra megtervezése és megvalósítása, ugyanakkor sokoldalú fejlesztést tesz lehetővé. A kerettörténet rávilágíthat, hogy a fizikának mennyi felhasználása van. A feladatok kiadása történhet úgy, hogy a diákok ellenőrizni tudják csapattársaik munkáját, sőt egymás segítségével, a feladat elmagyarázásával a tudás mélyítése is megvalósul, miközben a kommunikációs és kooperációs készségeiket fejlesztjük. Mindezek mellett a társtudományok bevonásával olyan tanulók is rávehetőek a feladatok megoldására, akik kevésbé érdeklődnek a fizika iránt.

A leírtak alapján úgy gondolom, hogy megéri a belefektetett munkát. Elkészített programjaimat szívesen megosztom az érdeklődőkkel és új szabadulósoba létrehozásában is segítek az érdeklődőknek, ehhez a nogradi.zsofia4@gmail.com címen tudnak keresni.

Irodalom

1. C. Hoellwarth, M. J. Moelter: The implications of a robust curriculum in introductory mechanics. *American Journal of Physics* 79 (2011) 540.
2. Vörös Alpár István Vita, Sárközi Zsuzsa: Physics escape room as an educational tool. *AIP Conference Proceedings* (2017), 1916. 050002. 10.1063/1.5017455., 050002-page 1–6.
3. Fülöp Csilla, Vörös Alpár István Vita, Sárközi Zsuzsa: Fluid Dynamics Knowledge Comparison of Students with Different Educational Background. *AIP Conference Proceedings* (2019), bekezdés 2019. szeptember.
4. Scott Hebert: *The Power of Gamification in Education*. <https://www.youtube.com/watch?v=mOssYTimQwM&list=PLFwx2P0-SMC1GAMhN5CVZejClTwbDf24U&index=2&t=0s> – TED-előadás
5. Andre Thomas: *The Effective Use of Game-Based Learning in Education*. <https://www.youtube.com/watch?v=-X1m7f9cRQ&list=PLFwx2P0-SMC1GAMhN5CVZejClTwbDf24U&index=3&t=0s> – TED előadás
6. Yu-kai Chou: *Gamification to improve our world*. <https://www.youtube.com/watch?v=v5Qjuegtiyc&list=PLFwx2P0-SMC1GAMhN5CVZejClTwbDf24U&index=4&t=0s> – TED előadás
7. Okosdoboz <http://www.okosdoboz.hu/>
8. LearningApps <https://learningapps.org/>
9. Vörös Alpár Vita: Szabadulósobák a folyadékok fizikájának tanulmányozására. <http://fiztan.phd.elte.hu/kozkincs/magypub/pub/kiserletek/szabaduloszoba.pdf>, *Fizikai Szemle* 59/2 (2019) 58–62.
10. <https://www.breakoutedu.com/>
11. <https://www.theescapeclassroom.com/>

EGY BIOLÓGIAÉRETTSÉGI-FELADAT BIOMECHANIKAI HIBÁI

A vádliizom húzása belső erőként hozzáadódik a bokát terhelő nehézségi erőhöz

Horváth Gábor
ELTE Biológiai Fizika Tanszék, Budapest

Vass Miklós
ELTE Apáczai Csere János Gyakorló Gimnázium, Budapest

Az idei, 2021. évi emelt szintű biológia írásbeli érettségi V/9. feladata (1. ábra) így szólt [1]:

„Számítsa ki, hogy a 80 kg-ot nyomó Sziszüphosz egyik vádlijában mekkora erő ébred abban a pillanatban, amikor talpa felemelkedik a földről! (Ekkor az erővonalak a vízszintes talpra merőlegesen hatnak.) Az ábrán a »T« [az idézőjelet magam raktam ki, műszaki szerkesztő] betű a lábujjhegyre álláskor a talp leghátsó alátámasztási pontját jelöli, »U« Sziszüphosz lábujjhegyét, »B« a bokán áthaladó szaggatott vonal a Sziszüphoszra ható gravitációs erő hatásvonalát jelöli, a »V« pedig a vádli erőhatásának vonalát. A »T«, »U« és »B« esetében tekintsen el az egyéb szövetek jelenlététől. Az ábra bal oldalán látható számadatok centiméterben megadott távolságok. Számításának eredményét két tizedesjegy pontossággal adja meg! (2 pont)

A feladat megoldása során felhasználható további információk:

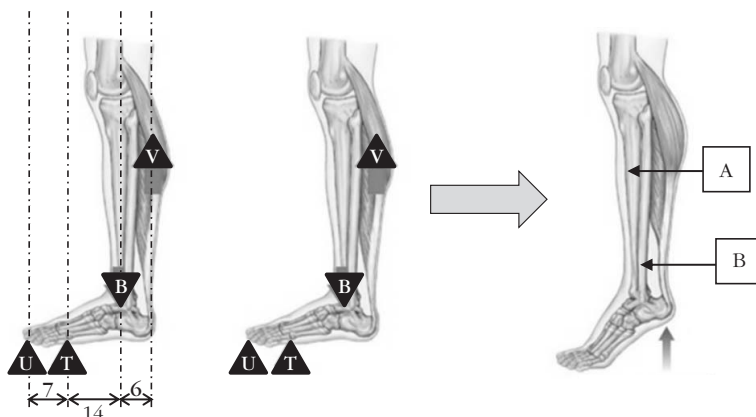
Cikkünket *Radnai Gyula* emlékének szenteljük, aki életének 83. évében, idén május 24-én távozott közülünk.



Horváth Gábor fizikus, az MTA doktora, egyetemi tanár, az ELTE Biológiai Fizika Tanszék Környezetoptika Laboratóriumának vezetője. A vizuális környezet optikai sajátosságait és az állatok látását tanulmányozza, továbbá biomechanikai kutatásokat folytat. Számos szakmai díj és kitüntetés tulajdonosa. Évtizedek óta aktív tudományos ismeretterjesztői munkát is folytat előadások és cikkek formájában.



Vass Miklós 2002-ben szerzett fizikatanári diplomát az Eötvös Loránd Tudományegyetemen. Az ELTE Apáczai Csere János Gyakorlógimnáziumban fizikatanár, szertáros, osztályfőnök és DÖK-tanár. A netfizika.hu működtetője.

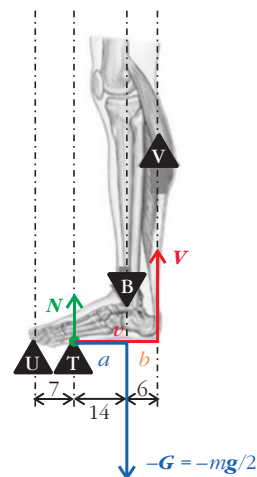


1. ábra. Az V/9. feladat eredeti ábrája.

- Mindkét lábát azonos mértékben terheli.
- Mind egykarú, mind kétkarú emelők esetében, egyensúlyban a forgatónyomatékok egyenlők.
- A forgatónyomaték az erő és az annak hatásvonalára vonatkozó erőkar szorzata.
- Sziszüphosz súlyát az $m \cdot g$ képlet alapján számíthatja ki.
- A nehézségi gyorsulás értéke: $9,81 \text{ m/s}^2$.

A kitzűzők által helyesnek vélt feladat biomechanikailag sajnos hibás! Cikkünkben e hibára mutatunk rá, közöljük a biomechanikai szempontból helyes feladatot és megoldását, végül elemezzük a szóban forgó problémát, ami jóval összetettebb az eredetinel. Szerintünk e javított feladat még az emelt szintű fizikaérettségin is nehezebb számított volna, no nem elemi matematikája, hanem bonyolult fizikája miatt.

Mielőtt azonban a lényegi hibát tekintenénk, *Gnädig Péter* javaslatára szólunk a feladat szövegének egy apró, de



2. ábra. Az emelt szintű biológia írásbeli érettségi feladat egyik ábrája a berajzolt erővektorokkal és erőkarokkal: V a vádliizom húzóereje, N a talpcsúcsnál fellépő nyomóerő és $-G$ a bokát érő fél testsúly.

zavaró pontatlanságáról: az „Ekkor az erővonalak a vízszintes talpra merőlegesen hatnak.” mondat a következőre javítandó: *Ekkor az erők a vízszintes talpra merőlegesen hatnak.*

A pozitív irányt fölfelé véve, a 2. ábra mutatja a „T” talpcsúcsnál (a talpba nem beleértve a lábujjakat) ébredő függőleges N nyomóerőt, a „V” vádliban feszülő függőleges V húzóerőt és a „B” bokát lefelé terhelő $-G$ fél testsúlyt (ami alatt természetesen a nehézségi erő értendő). A sarok fölemelése megvalósítható úgy, hogy az „U” pontban (lábujjak végén) nem hat erő és úgy is, hogy hat. Ezért az egyszerűség kedvéért a továbbiakban eltekinthetünk az ujjaktól, és a többi ábrán már nem szerepeltetjük a lábfej „T” talpcsúcs előtti részét. Mivel az egész ember (a feladatban Sziszüphosz) nyugalomban van, ezért számos lehetőségünk van a forgáspont megválasztására. Például attól függően, hogy a lábfej melyik pontjára írjuk fel a forgatónyomaték-egyensúlyt, három magától adódó megoldási mód is lehetséges.

1. megoldás

Először a bokára írjuk föl a forgatónyomatékok egyensúlyát (kétkarú emelő) a 2. ábra alapján:

$$Na = Vb, \quad (1)$$

ahol a N és V a megfelelő erők nagyságát jelöli. A lábfejre ható függőleges erők egyensúlya pedig ezt követeli meg:

$$N + V = G. \quad (2)$$

(1)-ből adódik, hogy $N = Vb/a$, amit (2)-be helyettesítve kapjuk a keresett vádliert:

$$V = \frac{Ga}{a+b}. \quad (3)$$

2. megoldás

A sarok fölemelése pillanatában „T” a lábfej forgáspontja. Második lehetséges megoldásként e pontra írjuk föl a forgatónyomatékok egyensúlyát (egykarú emelő, 2. ábra):

$$Vv = Ga. \quad (4)$$

Az erőkarok közti összefüggés a 2. ábra alapján:

$$v = a + b. \quad (5)$$

(4)-ből $V = Ga/v$ adódik, amibe (5)-t beírva, ismét a (3) szerinti V vádliert kapjuk.

3. megoldás

Harmadik lehetséges megoldásként a sarokpontra is fölírhatjuk a forgatónyomaték-egyensúlyt (egykarú emelő, 2. ábra):

$$Nv = Gb, \quad (6)$$

amiből $N = Gb/v$ adódik, amit (2)-be írva és (5)-öt használva, megint a (3) szerinti V vádliert jutunk.

Végeredmény

A feladat szerint a bokát a testsúly fele, azaz

$$G = \frac{mg}{2} \quad (7)$$

terheli, amit (3)-ba írva adódik a végeredmény:

$$V = \frac{mga}{2a + 2b}. \quad (8)$$

A feladatbeli

$$g = 9,81 \text{ ms}^{-2}, \quad m = 80 \text{ kg}, \quad (9)$$

$$a = 0,14 \text{ m}, \quad b = 0,06 \text{ m}$$

numerikus értékek mellett

$$V = 274,68 \text{ N} \quad (10)$$

vádliertre jutunk mindhárom megoldással, ami meg egyezik a hivatalos javítási útmutató eredményével.

A hibára utaló probléma:

hova tűnt a nyomóerő egy része?

Az (1) és (2) megoldásával adódik a „T” talpcsúcsot fölfelé nyomó N erőre:

$$N = \frac{Gb}{a+b}. \quad (11)$$

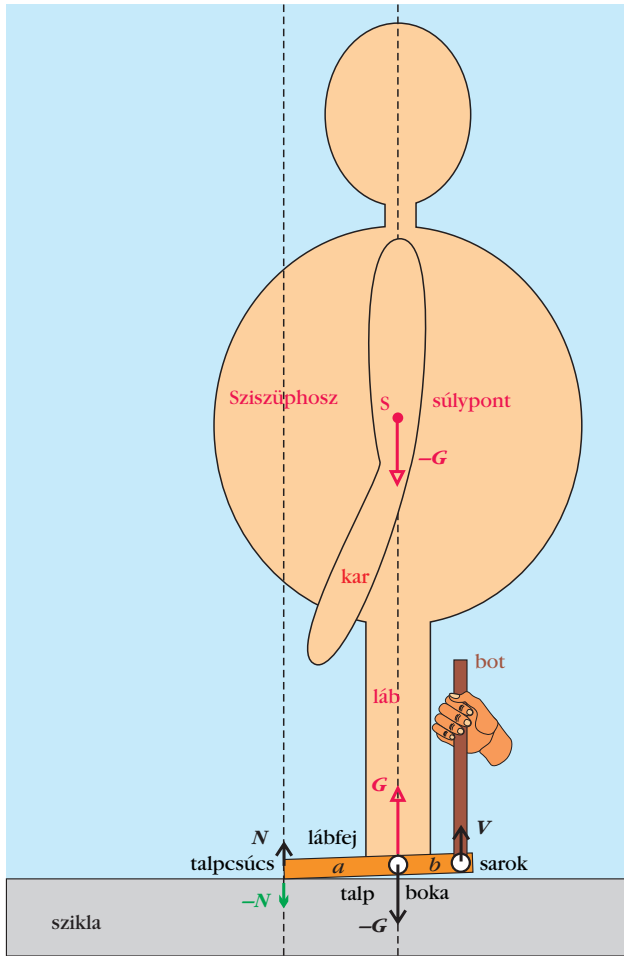
(11) szerint $N < G$, mert $b/(a+b) < 1$, mivel $a > 0$. A feladat 2. instrukciója szerint egyensúlyi esettel van dolgunk, ezért Sziszüphosz sarkának aljzattól (sziklától) való elszakadása gyorsulásmentes (a boka fölfelé nem gyorsul, a test tömegközéppontja pedig lefelé nem gyorsul). Ekkor a talpcsúcs szükségképpen pont G -vel nehezedik az aljzatra, s nem annál kisebb (vagy nagyobb) N erővel. Hiszen (1), (4) vagy (6) alapján nemcsak a forgatónyomatékok egyensúlyát tételeztük fel, hanem az erőket is (2) szerint. Hova tűnt a

$$G - N = G - \frac{Gb}{a+b} = \frac{Ga}{a+b} \quad (12)$$

nyomóerő a talpcsúcsról? Ennyi erő hiányzik ahhoz, hogy a talpcsúcs G erővel nyomja a sziklát. Miként nehezedhetne Sziszüphosz bármelyik lábával a súlya felénél ($G = mg/2$) kevesebbet a sziklára? Mivel a szóban forgó egyensúlyi körülmények között ez nyilvánvalóan nem fordulhat elő, ezért már maga a kitűzött feladat hibás!

A hiba háttere

Az említett hiba oka, hogy a feladat a V vádliert az ember testétől (lábától) független külső erőként kezelte, úgy, mintha a 2. ábra lábának vádlija csak a bokához csatlakozna, felső vége a csontoktól el lenne különülve (ellentétben a vádliizom anatómiailag helyes rajzától), s mintha valaki (például a Sziszüphosz)



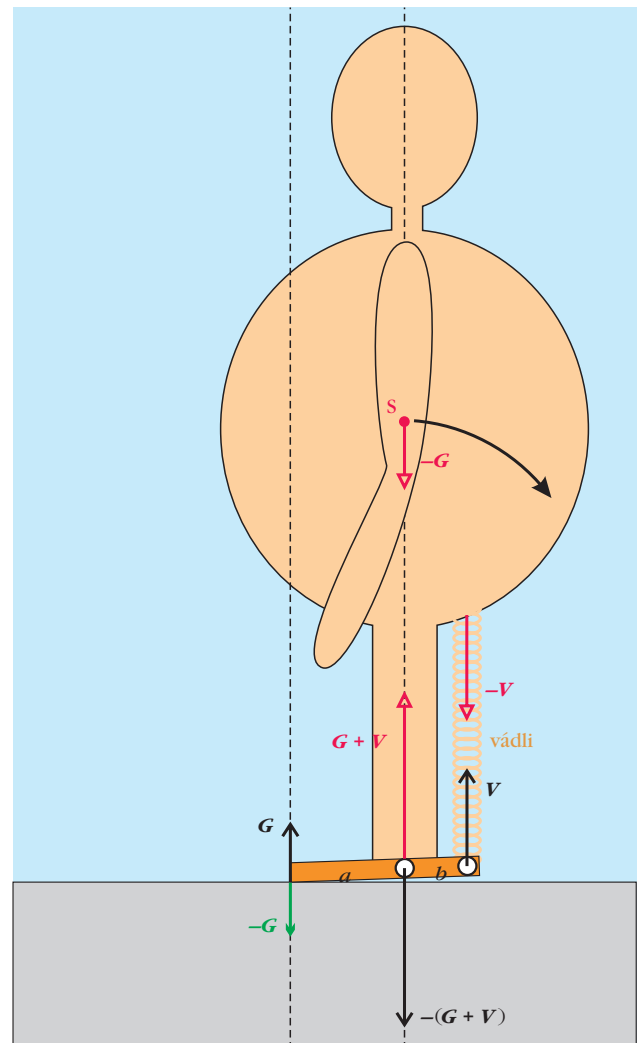
3. ábra. Egy vízszintes sziklaaljzaton stabil egyensúlyi helyzetben álló Szisüphosz-modell sarokemelését kezdő lábfejére, a test többi részére és a sziklára ható függőleges erők. N a sziklaaljzat külső nyomóereje, V a sarokot egy függőleges bottal fölfelé húzó külső erő, $-G$ az $mg/2$ nagyságú fél testsúly. Az „S” súlyponton átmenő függőleges egyenes a bokát metszi. A lábfejre ható erőket v fejtű nyilak jelölik, míg a test többi részére hatókat háromszögfejtűek. A boka a láb alsó végével és a sarok a bot alsó végével forgótengellyel csatlakozik.

örök sziklagörgetésre ítélő bírák/istenek egyike) kívülről húzná a bokát függőlegesen fölfelé V erővel. E valóságtól elrugaszkodott helyzetben érthető lenne, hogy a $G = V + N$ fél testsúlynak csak a V -vel könnyített, maradék $N (< G)$ összetevőjével nyomja egy láb a sziklát. A hiba szemléltetéséhez a 2. ábra lábát egészítsük ki Szisüphosz (a továbbiakban: ember) teste többi részének vázlatával, a sarokot egy függőleges bottal fölfelé húzó kézzel és a sziklaaljzattal a 3. ábrán látható módon, ami a feladatbeli képzeltek felelne meg, s vezetne a (3) szerinti vádlierőhöz. A továbbiakban ügyelni fogunk arra, hogy mi is a vizsgált rendszer. Amikor az egész ember, olyankor a lábfej súlyát is beleértjük a testsúlyba. Amikor pedig a lábfejre ható erőket vizsgáljuk, akkor pedig annak viszonylag kis súlyától eltekintünk, hogy a test többi részét az egyszerűség kedvéért az ember súlyával egyezőnek vehessük. Továbbá, végig szem előtt tartjuk, hogy $G = mg/2$ az egy lábra jutó fél testsúly, és mindig csak az egyik lábat ábrázoljuk a kettő helyett.

A vádliizom felső végének szükségszerű figyelembe vétele

Ezután a 3. ábra függőleges botját cseréljük ki a 4. ábra rugójával a sarok és az altest között, amely rugó a vádliizmot és testen (lábban) belüli csatlakozását mechanikailag modellezi. Ekkor a sarokot fölfelé húzó függőleges V vádlierő nem önmagában lép fel, hanem (a kötélerőhöz, rugóerőhöz hasonlóan) a vádliizom másik végén is ébred egy azonos nagyságú, azonos hatásvonalú, de ellentétes irányú erő. Ha a vizsgált rendszernek az ember boka fölötti részét tekintjük, akkor e rendszerre három függőleges külső erő hat: a fél testsúly lefelé, a fölfelé irányuló sarki vádlierő lefelé mutató ellenereje és a bokánál fölfelé irányuló erő. E három erőnek kell egyensúlyt tartania. Mivel a bokánál ébredő, fölfelé mutató erőnek egyedül kell két

4. ábra. Egy vízszintes sziklaaljzaton álló embermodell sarokemelését kezdő lábfejére és a sziklára ható függőleges erők. $-G$ az $mg/2$ nagyságú fél testsúly, V a sarokot fölfelé húzó belső vádlierő. Az „S” súlyponton átmenő függőleges egyenes a bokát metszi. A lábfejre ható erőket v fejtű nyilak jelölik, míg a test többi részére hatókat háromszögfejtűek. A görbe nyíl azt szemlélteti, hogy a bokán átmenő függőleges egyenes mentén ható $-G$ fél testsúlynak a talpcsúcsra gyakorolt Ga forgatónyomatéka hátrafelé döntené a testet.



A (9) szerinti numerikus értékek mellett (13)-ból

$$V = 915,6 \text{ N} \quad (18)$$

nagyságú vádlierőt kapunk, ami 3,3-szer nagyobb, mint a (10) szerinti.

Következtetések

Hol csúszott félre a feladat? Leginkább ott, hogy nem vette figyelembe, hogy a V vádliizom alsó végénél ébredő, a sarkot fölfelé húzó V vádlierő nem önmagában lép fel, hanem (a kötélerőhöz vagy rugóerőhöz hasonlóan) a vádliizom felső végén is ébred egy azonos nagyságú, azonos hatásvonalú, de lefelé mutató $-V$ vádlierő. Összességében a következő három hibától terhes a szóban forgó biológiaérettségi-feladat:

1. A súlyponton átmenő függőleges egyenes nem a bokát metszi, hanem a „T” talpcsúcsot, különben az ember hanyatt dőlné.

2. A bokára nem a G fél testsúly nehezedik, hanem a V vádlierővel több, azaz $G+V$, mivel a sarokra ható vádlierővel azonos nagyságú V erő hozzáadódik a boka terheléséhez.

3. A „T” talpcsúcs a G fél testsúllyal nehezedik az aljzatra és nem annál kisebb

$$N = \frac{Gb}{a+b} \quad (19)$$

erővel, mert egy nyugalomban lévő test (Sziszüphosz) nem nyomhatja a súlyánál kisebb erővel az alátámasztást.

Ha az egész ember a vizsgált rendszer, akkor a vádliizom miatt (lent és fent) ébredő erők belső erők, amelyek páronként kioltják egymás hatását, tehát az ember egyensúlyára nincsenek közvetlen hatással. Míg, ha a vizsgált rendszer csak a lábfej, akkor a felső vádlierő többletterhelést okoz a bokánál.

A feladat azon hibás állítását, miszerint a G fél testsúly hatásvonalára az ember bokáján megy át, a legegyszerűbben úgy cáfolhatjuk, ha az egész embert tekintjük rendszernek. Ekkor ugyanis a nehézségi erőnek a talpcsúcsi „T” alátámasztási pontra vonatkoztatva lenne forgatónyomatéka, a többi erőnek viszont összességében nincs, emiatt az ember nem lehetne forgatónyomaték-egyensúlyban. Általában a hibás elképzelések kifejlődését segíti, ha nem tisztázzuk, hogy mit tekintünk vizsgálandó rendszernek.

A fentiek alapján az eredeti feladat hibás mondatát – „Az ábrán a »T« betű a lábujjhegyre álláskor a talp leghátsó alátámasztási pontját jelöli, »U« Sziszüphosz lábujjhegyét, »B« a bokán áthaladó szaggatott vonal a Sziszüphoszra ható gravitációs erő hatásvonalát jelöli, a »V« pedig a vádli erőhatásának vonalát – a következőre kell javítani, hogy a feladat biomechanikailag helyes legyen (a lényegi javítások dőlt betűkkel):

Az ábrán a „T” betű a lábujjhegyre álláskor a talp leghátsó alátámasztási pontját jelöli, a „T”-n áthaladó szaggatott vonal azonos a Sziszüphosz súlypontján átmenő függőleges egyenessel, „U” Sziszüphosz

lábujjhegye, a „B” bokán áthaladó szaggatott vonal a bokát terhelő függőleges erő hatásvonalára, a „V” pedig a vádli erőhatásának vonala.

Megemlítjük, hogy időnként a korábbi évek érettségi feladatai között is sajnos előfordultak hibásak. A 2004. május 26-án megírt próbaérettségi közép- és emelt szintű fizikafeladatainak szövegében és/vagy megoldásában található hibákat Vankó Péter [2] elemezte. Többek között hibás volt a 16. feleletválasztós tesztkérdés megoldása is, amely feladat szövege így szólt: „Hova kell nyúlnia a folyóban lazacra halászó medvének, ha sikeres akar lenni?” A helyes megoldás [3]-ban található. Másik példának a 2006. május 15-i gimnáziumi fizikaérettségi-feladatsor egyik kérdését idézzük, aminek megoldása Gnädig Péter észrevétele szerint szintén hibás volt: „Nyáron, déli napsütésben nem ajánlatos a kertben locsolni, mert »megégnék« a növények levelei. Az alábbi magyarázatok közül csak egy fogadható el, melyik?” A helyes megoldást [4, 5] közölte.

Mindkét említett példa egyik tanulsága az volt, hogy a helytelen megoldások a szakirodalomban makacsul rögzült tévhiteken vagy hibás információkon alapultak, amelyeket külföldi [6, 7] és magyar [3–5] folyóiratokban és tankönyvekben [8, 9] is megcáfoltak és helyesbítettek, de mindezek még nem váltak széles körűen ismertté.

Végül hangsúlyozzuk, hogy a kétszintű érettségi-rendszer 2005. évi indulása óta kitűzött több, mint 2300 fizikaérettségi-feladatban örvendetes módon csak igen ritkán fordultak elő hibák [10].

Irodalom

- https://dload-oktatas.educatio.hu/erettsegi/feladatok_2021_tavasz_emelt_e_bio_21maj_fl.pdf
- Vankó P.: Próbaérettségi: elégtelen. *Fizikai Szemle* 54 (2004) 240–244.
- Horváth G., Barta A., Buchta K., Varjú D.: Binokuláris ferde pillantás a vízfelszínen át: a vízfelületen túli világ fénytöréstől torzult bonyolult szerkezete, avagy egy klasszikus optikai probléma helytelen megoldásairól és azok kijavításáról. *Fizikai Szemle* 55 (2005) 172–181.
- Egri Á., Horváth G., Horváth Á., Kriska Gy.: Beégethetik-e napsütésben a leveleket a rájuk tapadt vízcseppek? Egy tévhittel terhes biooptikai probléma tisztázása. 1. rész: Napfény forgáshoz szimmetrikus vízcseppek általi fókuszálásának számítógépes vizsgálata. *Fizikai Szemle* 60 (2010) 1–10.
- Horváth G., Egri Á., Horváth Á., Kriska Gy.: Beégethetik-e napsütésben a leveleket a rájuk tapadt vízcseppek? Egy tévhittel terhes biooptikai probléma tisztázása. 2. rész: Napfényes besugárzási kísérletek sima és szőrös leveleken ülő vízcseppekkel. *Fizikai Szemle* 60 (2010) 41–49. + színes borító 3. oldal.
- Horváth G., Buchta K., Varjú D.: Looking into the water with oblique head tilting: revision of the aerial binocular imaging of underwater objects. *Journal of the Optical Society of America A* 20 (2003) 1120–1131.
- Egri Á., Horváth Á., Kriska G., Horváth G.: Optics of sunlit water drops on leaves: Conditions under which sunburn is possible. *New Phytologist* 185 (2010) 979–987.
- Horváth G.: *A geometriai optika biológiai alkalmazása: Biooptika*. ELTE Eötvös Kiadó, Budapest (2004).
- Horváth G.: *Biomechanika: A mechanika biológiai alkalmazásai*. ELTE Eötvös Kiadó, Budapest (2009).
- <https://www.netfizika.hu/node/2697>
<https://www.netfizika.hu/node/3790>
<https://www.netfizika.hu/node/2863>
<https://www.netfizika.hu/node/389>
<https://www.netfizika.hu/node/14424> utolsó kérdése

MODELL KVANTUMMECHANIKA KÖZÉPISKOLÁBAN

Tóth Kristóf

Czuczor Gergely Bencés Gimnázium, Győr

A kvantummechanika matematikai apparátusa látszólag elvont, az egyetemisták számára is kihívást jelent. A cikkben bemutatom, hogyan tárgyalja a kvantummechanikát egy olaszországi¹ tananyag [1–4], amelynek elsődleges célja, hogy a középiskolás diákok kísérletezés révén fedezzék fel a kvantumvilág alaptörvényeit és matematikai formalizmusát kétállapotú rendszerekben (*Dirac* fotonpolarizációs megközelítése [5]). Ezt az egyszerűsített tárgyalást modell kvantummechanikának nevezem, arra utalva, hogy a fotonok leírását nagymértékben egyszerűsítettük, így segítve a felfedezést könnyebbé. ² A tananyag a nem relativisztikus elektronra elvégzett Stern–Gerlach-kísérletet fordítja le fotonokra. A fény elemi részecskéinek két valódi spinsajátállapota a cirkuláris polarizációknak felel meg, ezért az anyag nem adja vissza a fotonok teljesen helyes leírását – pedagógiai okokból a függőleges és vízszintes polarizációs állapotokat használjuk –, de elsődleges célunk nem a foton, hanem a kvantummechanika, főként a spin matematikai leírásának kézzelfogható szemléltetése. Jövőbeli cél végiggondolni, hogy miként tárgyalhatnánk a cirkuláris polarizációt, amely fizikailag helyes írásmód mélyebb üzenetet is hordoz. Számos kvantummechanikára szakosodó középiskolás oktatási anyaghoz hasonlóan csak valós számokkal dolgozunk [6, 7]. Az eredeti anyagot tanítási tapasztalataim alapján számos helyen módosítottam, illetve saját ötleteimmel gazdagítottam. Tapasztalataim szerint az írás tartalma egy átlagos diák számára is érthető lehet, mert az anyag mindössze két egyszerű kísérletre épül, továbbá a matematikai ismeretek leszűkülnek a koszinuszfüggvény használatára. Ezt, a ma-

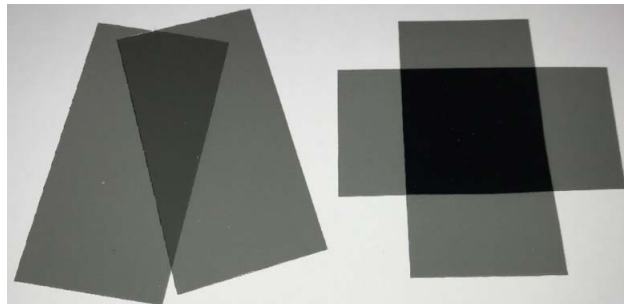
Köszönettel tartozom témavezetőimnek, *Cynolter Gábornak* és *Tél Tamásnak* támogatásukért és a hasznos eszmecsereikért, ezen felül hálás vagyok a cikk alapjául szolgáló eredeti olasz tananyagot megalkotó udinei kutatócsoport tagjainak, főként *Marisa Michelíninek* és *Alberto Stefanének*. Köszönöm *Patkós Andrásnak*, *Zimborás Zoltának* és *Bakosné Novák Andreának* az írás átolvasását és ehhez fűzött kiváló megjegyzéseiket. A tanulmány elkészítését a Magyar Tudományos Akadémia Tantárgy-pedagógiai Kutatói Programja támogatta.

¹Az udinei egyetem Physics Education Research Unit fejlesztésében.

²A „modell kvantummechanika” elnevezést *Tél Tamás* professzor úrtól vettem át.



Tóth Kristóf 2020-ban végzett az ELTE-n, mint középiskolai matematika- és fizikatanár. Jelenleg az ELTE Fizika Tanítása Program elsőéves doktorandusz hallgatója és a győri Czuczor Gergely Bencés Gimnázium fizikatanára. Kutatási területe a kvantummechanika és kvantuminformatika középiskolás tanítása.



1. *ábra*. A két polarizátorlemezen áthaladó fény intenzitása függ a polarizátorlemezek egymással bezárt szögétől.

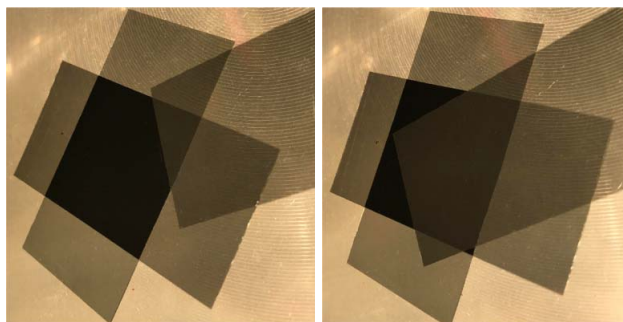
gyorsországi egyetemeken és középiskolákban szokatlan tananyagot többször kipróbáltam a közoktatásban [8], s a világjárvány miatt digitalizáltam [9] is. Az oktatási anyag az itt leírtakban nem ér véget, a témakör folytatásának lehetőségét tehetséges diákoknak ajánlom, az írás a [10] linken folytatódik a fotonok statisztikájára vonatkozó számításokkal és a kétállapotú rendszerek kvantumfizikájának formalizmusával.

A fénypolarizáció jelensége

Diákjainkkal lényeges megállapításokat tehetünk néhány polarizátorlemez segítségével. Kísérleteinkkel felfedezhetjük, hogy ha két polarizátorlemez egymásra teszünk és a kettő egymással bezárt szögét változtatjuk, akkor az áthaladó fénynyaláb intenzitása változik (1. *ábra*).

Kísérleteinkből levonhatjuk a következtetést, hogy az áthaladó fény intenzitása akkor maximális, ha a két polarizátorlemez párhuzamos egymással, és akkor minimális (nulla), ha a két polarizátorlemez egymásra merőleges irányú. Azt is felfedezhetjük, hogy a polarizátorlemezek sorrendje nem hagyható figyelmen kívül, mert ha két egymásra merőleges polarizátorlemez közé egy harmadikat megfelelően beteszünk, akkor lesz áthaladó fény (2. *ábra*).

2. *ábra*. A polarizátorlemezek sorrendjének fontosságát bemutató kísérlet.





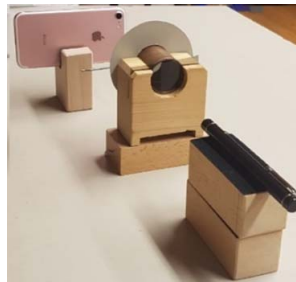
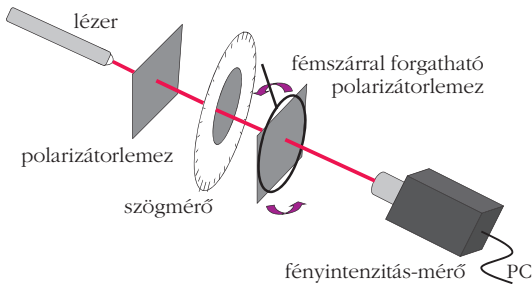
3. ábra. Paul Dirac arcképe egy számítógép monitorán [11]. A képernyőből kijövő fény polarizációs tulajdonságát egy polarizátorlemez segítségével vizsgáljuk. A polarizátorlemez különböző állásai esetén figyeljük az áthaladó fény intenzitását. Ha a fény polarizálatlan, akkor polarizátorlemezünk semmilyen állásban sem fogja elnyelni a fény teljes hányadát. Ha azonban a fény polarizált (ezt mutatja a fotó), akkor a teljes elnyelődésre merőleges állású polarizációs irány tulajdonságával rendelkezik a fény. A számítógépünk monitorja polarizált fényt bocsát ki, amelynek polarizációs irányát ellenőrizhetjük.

A kísérleteken keresztül diákjainkkal megismerhetjük a fény egy, a fényerősségtől eltérő tulajdonságát, amelyet *polarizációs tulajdonságnak* nevezünk. A fény ezen, emberi szemmel közvetlenül nem érzékelhető tulajdonságát mindig ellenőrizhetjük egy polarizátorlemezzel, amelyet a 3. ábra szemléltet.

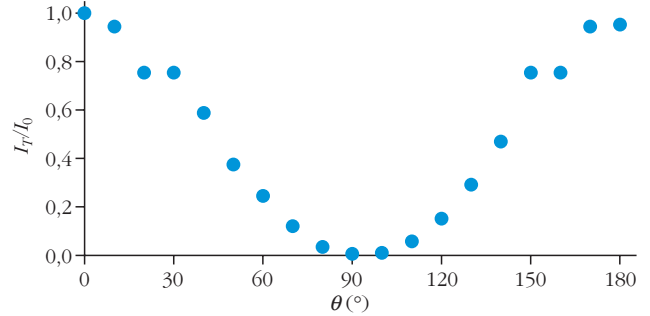
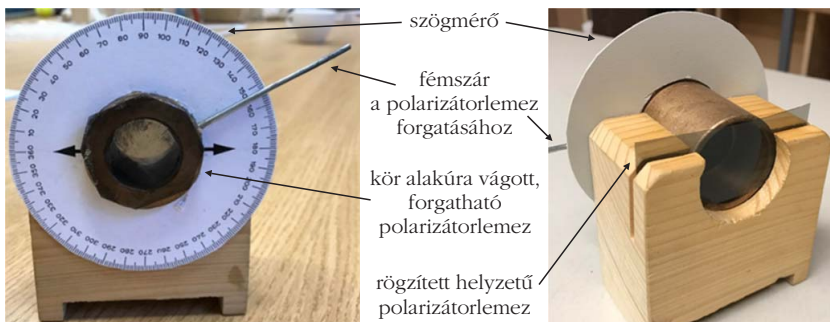
Vizsgáljuk meg, vajon miként függ a polarizátorlemezeken áthaladó fény intenzitása a polarizátorlemezek egymással bezárt szögétől? Erre egyszerű mérési kísérletet végezhetünk, amelynek összeállítását a 4. ábra és az 5. ábra mutatja be.

Az 5. ábrának megfelelően egy fogantyúval forgatható fémcsőre polarizátorlemez rögzítünk. Az eszköz másik végére egy rögzített állású polarizátorlemez helyezünk. A két polarizátorlemez egymással bezárt szögét egy, az ábrán látható módon elhelye-

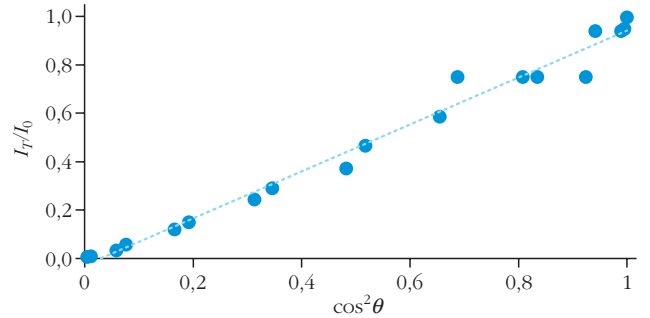
4. ábra. A mérés elvi elrendezése.



5. ábra. Az általunk használt eszköz (elöl- és hátulnézetből).



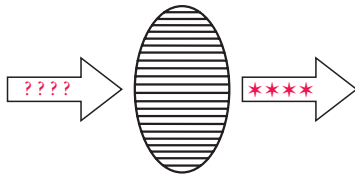
6. ábra. Az ábrán a telefonnal végzett egyik mérésünk eredménye látható. Megfigyelhető, hogy 90°-nál az áthaladó fény intenzitása zérus, azaz a fény nem halad át.



7. ábra. A mérési pontok közel egyenesre illeszkednek, vagyis a polarizátorlemezek által bezárt szög koszinuszának négyzete adja meg az áthaladó fény intenzitásának arányát.

zett szögmérővel mérjük. A polarizátorlemez forgatására használt fémcső mutatja a két lemez egymással bezárt szögét. A beállítás olyan, hogy a polarizátorlemezek maximális fényáteresztésnél 0°-os helyzetet mutatnak. A fényintenzitást telefonunk kamerájával is mérhetjük, ha letöltjük a *LightMeter* alkalmazást, de lehetőség van számítógépre köthető fényintenzitás-mérő készülék használatára is.

A mérési eredmény számszerűsítéséhez a diákok által is ismert *Microsoft Excel* programot használhatjuk. Jelöljük I_0 -val a két polarizátorlemez egyirányú állásánál kapott fényintenzitás-értéket, azaz azt, amikor a fényáteresztés maximális (így a polarizátorlemezek fényszűrő hatását kiküszöböljük). Legyen I_T pedig az a fényintenzitás-érték, amelyet a forgatható polarizátorlemez különböző szögei esetén mérünk. Ha ábrázoljuk az I_T/I_0 arányszámot a polarizátorlemezek fokban mért θ szögének függvényében, akkor a 6. ábrának megfelelő grafikont kapunk, amiből megsejthetjük, hogy a két mennyiség közötti kapcsolatot a $\cos^2\theta$ függvény adja meg. Ezt úgy ellenőrizhetjük, hogy a $\cos^2\theta$ függvényében ábrázoljuk az I_T/I_0 -t, s ha a kapott mérési pontok egyenesre illeszkednek akkor a két mennyiség között lineáris a kapcsolat (7. ábra).



8. ábra. A példán jól látjuk, hogy a kezdetben ismeretlen tulajdonságú beeső fotonok vízszintes (★) polarizációs tulajdonsággal rendelkeztek, mert teljes hányadukban áthaladtak egy vízszintes polarizációs irányú polarizátorlemezre.

Kísérleteink alapján felírhatjuk a Malus-törvényt:

$$I_T = I_0 \cos^2 \theta,$$

amely törvényt többféleképpen értelmezhetjük.

- Essen egy tetszőleges fénynyaláb egy polarizátorlemezre, amelyen áthaladva a már polarizált fénynyaláb I_0 fényintenzitású lesz. Ezt követően ez a fénynyaláb egy újabb polarizátorlemezre esik, amelyen áthaladva a fény intenzitása $I_T = I_0 \cos^2 \theta$ lesz. A θ szög itt a két polarizátorlemez egymáshoz viszonyított polarizációs szögét jelenti.

- Egy eredendően polarizált I_0 fényintenzitású nyaláb esik egy polarizátorlemezre, amelyen áthaladva a fénynyaláb intenzitása $I_T = I_0 \cos^2 \theta$ lesz, s ekkor θ a fény polarizációs iránya és a polarizátorlemez által bezárt szöget adja meg. Ez az értelmezés hasonlít az előzőre, mert a polarizált fénynyalábot úgy is elképzelhetjük, mint ami egy számára megfelelően beállított polarizátorlemezre már áthaladt fénynyaláb.

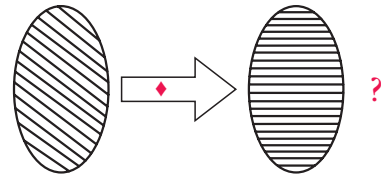
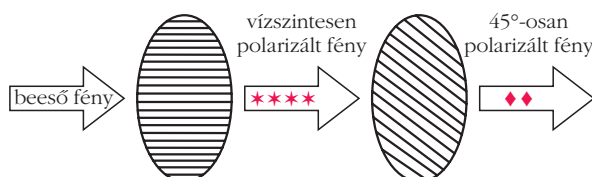
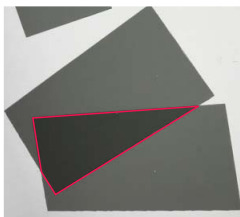
Fotonkép

A tananyag ezen a ponton leszögezi: fogadjuk el azt a tényt, hogy a fény fotonokból áll, amelyek oszthatatlan, diszkrét egységek. Továbbá azt is, hogy monokromatikus fényben a fényintenzitás a fotonok számával arányos. Ekkor a fotonok számával is felírhatjuk a Malus-törvényt:

$$N_T = N_0 \cos^2 \theta.$$

A korábban felfedezett polarizációs tulajdonságot felidézve mondhatjuk, hogy e tulajdonsággal a fényt alkotó elemi egységeknek, a fotonoknak is rendelkezniük kell. *A fotonok mindig akkor rendelkeznek egy adott polarizációs tulajdonsággal, ha az annak megfelelő polarizátorlemezrel végrehajtott mérés során az azonos módon előkészített fotonok teljes hányada*

9. ábra. A bal oldali képen egy vízszintes polarizátorlemezre helyeztünk egy 45°-os polarizátorlemez, a jobb oldali képen pedig a kísérletet bemutató sematikus ábrát láthatjuk. A Malus-törvény szerint a 45° irányú polarizátorlemezre eső vízszintes polarizált fénynek a $\cos^2 45^\circ = 1/2$ -ed része halad át, mert a vízszintes a 45°-os iránnyal 45°-os szöget zár be.



10. ábra. Ha csak egy foton érkezik egy polarizátorlemezre (jelen esetben a polarizátorlemez vízszintes, a beérkező foton pedig ♦ tulajdonságú, azaz 45°-osan polarizált), akkor a Malus-törvényben szereplő $\cos^2 45^\circ = 1/2 = p(\theta)$ tényező a fotonok áthaladásának valószínűségét jelenti az ismételt kísérletek során.

dában áthalad (8. ábra). Annak érdekében, hogy ezeket az információkat rajzainkban is meg tudjuk jeleníteni, éljünk a következő jelölésekkel:

- ★: vízszintesen polarizált foton szimbóluma,
- ▲: függőlegesen polarizált foton szimbóluma,
- ♦: 45°-osan polarizált foton szimbóluma.

A fotonok számát, azaz a fénynyaláb intenzitását pedig a szimbólumok száma jelzi.

A Malus-törvény ebben az értelmezésben úgy fogalmazható meg, hogy a kilépő fotonok száma általában kisebb, mint a beesőké, s természetesen a kilépő fotonok polarizációja is általában más. A sematikus 9. ábra erre ad példát.

A valószínűségi értelmezés

Izgalmas kérdés, hogy mi történne akkor, ha egy olyan gyenge intenzitású fénynyalábot bocsátanánk egy polarizátorlemezre, hogy egyszerre csak egy foton esne rá. Mivel a fotonok oszthatatlanok, ezért a polarizátorlemezrel történő mérés végeredménye vagy egy elnyelt vagy egy áthaladt foton (10. ábra). De akkor mit fejezhet ki a Malus-törvényben szereplő \cos^2 ? Ez a szorzótényező ugyanis alacsony fényintenzitásnál a fotonok oszthatatlanságát sértheti. Diákjaink rövid elmélkedés után megadhatják erre a helyes választ: ha a kísérletet sokszor ismétljük, akkor az egyes fotonok áthaladásának p valószínűsége jelenik meg a Malus-törvényben, azaz $p(\theta) = \cos^2 \theta$.

Egymást kizáró tulajdonságok, kvantumhatározatlanság

A fotonok polarizációs tulajdonságát már értjük: egy foton akkor rendelkezik az adott polarizációs tulajdonsággal, ha az azonos módon előkészített fotonok minden elemi egysége 100%-os valószínűséggel halad át a polarizációs tulajdonságának megfelelő polarizátorlemezre (8. ábra), illetve egy foton akkor *nem* rendelkezik egy adott polarizációs tulajdonsággal, ha az azonos módon előkészített fotonok 0%-os valószínűséggel halad át a polarizációs tulajdonságának megfelelő polarizátorlemezre.

Tapasztaltuk, hogy a függőlegesen polarizált foton sokaság nem képes áthaladni a vízszintes polarizátorlemezen (és fordítva). Ekkor azt mondjuk, hogy a függőleges és vízszintes polarizációs tulajdonságok egymást kizáró tulajdonságok. Ezzel azt fejezzük ki, hogy ha egy foton rendelkezik a függőleges polarizációs tulajdonsággal, akkor a vízszintes polarizációs tulajdonsággal biztosan nem rendelkezik (és fordítva). Általánosabban, ha egy foton rendelkezik egy adott polarizációs tulajdonsággal, akkor a rá merőleges polarizációs tulajdonsággal már biztosan nem rendelkezik.

Felmerülhet bennünk a kérdés, mi a helyzet akkor, ha a fotonnak van esélye egy adott polarizátorlemezen áthaladni, de ez az áthaladás nem 100%-osan biztos? Például vajon rendelkezik-e egy \star (vízszintes) tulajdonságú foton a \blacklozenge (45°) tulajdonsággal is? Ekkor a kvantumvilág egyik meglepő tapasztalati tényét fedezhetjük fel: további tulajdonságokat nem társíthatunk a fotonokhoz, mert ha ezt megtennénk, azzal biztos jóslatot tehetnénk a polarizátorlemezen való áthaladására. Jelen példában ez azt jelenti, hogy egy \star (vízszintes) tulajdonságú foton nem lehet egyben \blacklozenge (45°) tulajdonságú is, mert akkor előzetesen tudnám, hogy a \star tulajdonságú foton biztosan áthalad egy 45° -os polarizációs irányú polarizátorlemezen. Azonban azt sem mondhatom, hogy egy \star tulajdonságú foton nem rendelkezik a \blacklozenge tulajdonsággal, mert ezzel pedig az elnyelődésre tennék biztos jóslatot. *A kvantummechanika egyik meglepő törvénye éppen az, hogy képes vagyok olyan tulajdonságok mérésére, amelyekkel a részecskék eredetileg nem is rendelkeztek.*

Ezt a gondolatmenetet folytatva azt is mondhatjuk, hogy ha egy foton rendelkezik egy polarizációs tulajdonsággal, akkor az azt kizáró tulajdonságpárján kívül az összes más polarizációs tulajdonság megfigyelése mérésel lehetséges, azonban azt, előzetesen még elvi szinten sem társíthatjuk hozzá a fotonokhoz, ugyanis azzal sérülne a valószínűségi értelmezés. Ha pedig elvégzek egy tulajdonságra vonatkozó mérést, akkor azzal már megváltoztatom a fotonok polarizációs tulajdonságát. Ezért kimondhatjuk, hogy *bizonyos tulajdonságpárokat nem lehet együtt megfigyelni, s ezt kvantumhatározatlanságnak nevezünk.*³ A kvantumhatározatlanságot kétféle szemlélettel is kimondhatjuk, megvilágíthatjuk a mikrovilág „hiányosságát” és „gazdagságát” is a klasszikus világunkhoz képest:

- A makroszkopikus világból szemlélve korlátozottan érezhetjük, hogy bizonyos tulajdonságokat nem társíthatok a rendszerhez, azaz általában nem tudok konkrétan „igennel” vagy „nemmel” felelni a „rendelkezik-e a részecske egy adott tulajdonsággal?” kérdésre. Azaz a felfedező diák könnyen érezheti azt, hogy a mikrovilág a természet megismerésére korlátot szab.

³Ezt részletesebben kifejtem a [12] cikkben is, amelyben a határozatlansági reláción elmélkedek.

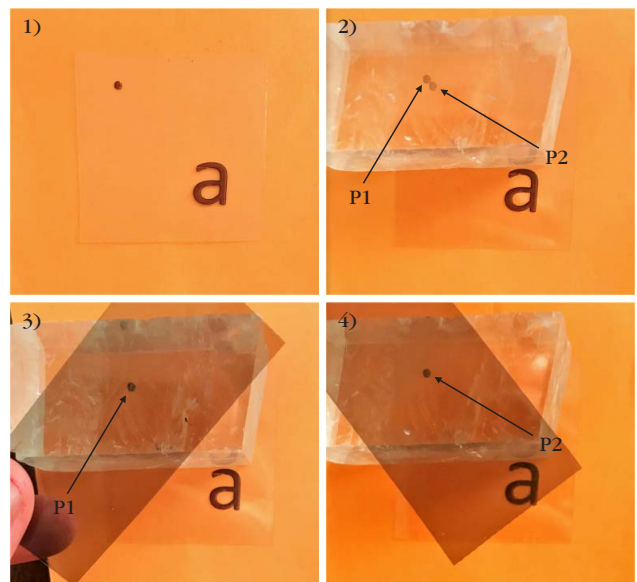
- Azonban fordítva is megközelíthetjük a kvantumhatározatlanságot, ugyanis a kvantumvilágból szemlélve unalmasnak és korlátozottan tűnhet mindaz, amit a klasszikus fizikában tapasztaltunk. A klasszikus fizikában csakis azokat a tulajdonságokat mérhetem, amelyekkel a részecske már eredetileg is rendelkezett. Ellenben a kvantummechanika lehetőséget teremt azon tulajdonságok mérésére is, amelyekkel a részecske nem határozottan rendelkezik. Innen vizsgálva a kvantummechanika egy sokkal gazdagabb világ felfedezésének élményét adhatja számunkra.

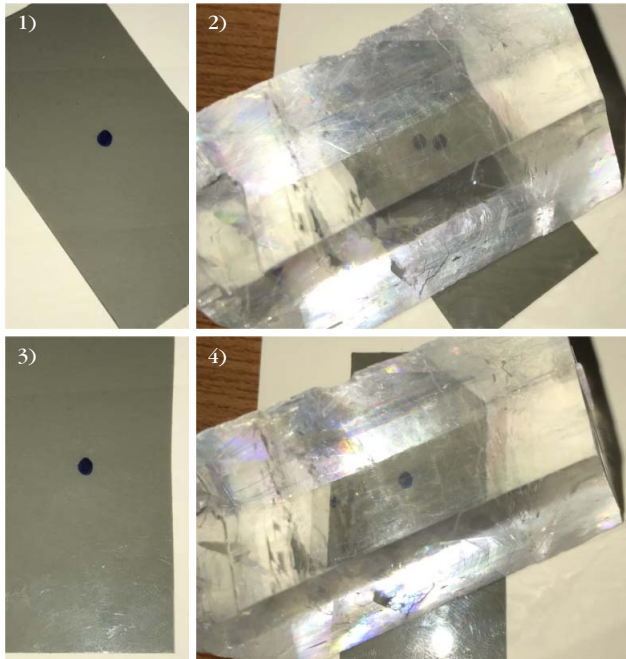
Tapasztalataim alapján a kvantumvilág felfedezése során sokszor az első, negatívabb szemléletet hordozzuk, hiszen a megszokott, klasszikus fizikán kialakult intuíciónkra hallgatunk. Azonban fontosnak tartom, hogy diákjainkkal érezzük át: a kvantummechanika egy gazdag és izgalmas világot tárhat elénk, amelyet felfedezve, a rajta alapuló mérnöki tudományok új eszközökkel ruházhatják fel az emberiséget.

A fotonok megkülönböztethetetlenek

A korábbi gondolatmenetből azt a következtetést is leszűrhetjük, hogy az azonos módon előkészített foton sokaság esetén egy polarizátorlemezzel való mérés során a fotonokra vonatkozó jóslataink teljes mértékben azonos valószínűségűek. Ez megerősíti, hogy a fotonok *megkülönböztethetetlenek*, ugyanis a megkülönböztethetőség éppen a fizikai tulajdonságokban való eltérés alapján volna lehetséges.

11. ábra. Diákjainkkal narancssárga háttérre helyeztünk egy fóliát, amelyen egy sötét pont (és egy „a” betű) látható (1. kép). Ha a sötét pontra egy kettőtörő kalcitkristályt helyezünk, akkor a sötét pont elhalványodik és megkettőződik (P1 és P2), azaz a beeső fénynyalábot a kristály kettéválasztja (2. kép). A 3. és 4. képen a két sötét pont fénynének polarizációs tulajdonsága polarizátorlemezekkel ellenőrizhető. Azt tapasztaljuk, hogy a két fénynyaláb polarizációs tulajdonsága egymást kizáró, mert a polarizátorlemezek helyzete ilyenkor egymásra merőleges.





12. ábra. Polarizált beeső fénynyaláb esetén a kalcitkristály több esetet is adhat. A \blacklozenge tulajdonságú (45° -osan polarizált) fénynyalábot két halványabb fénynyalábra bontja a kristály (1. és 2. kép). Ezen kilépő két nyaláb polarizációs tulajdonsága ellenőrizhető, \star (vízszintes) és \blacktriangle (függőleges), azaz egymást kizáró tulajdonságúak. Azonban, ha a kalcitkristály éppen olyan polarizációs tulajdonságú (például \blacktriangle) fénynyalábbal találkozik, amely a rajta kilépő sugárnyalábok polarizációs tulajdonságának megfelelők, akkor a kristály hatástalan (3. és 4. kép).

A pályafogalom hiánya

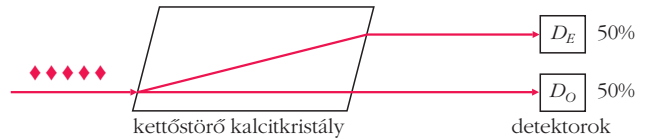
Az alábbiakban az a megdöbbentő felfedezés tárul a tisztelt Olvasó elé, hogy a mikrovilág leírásában nem használható a pálya fogalma. A felfedezéshez mindekelőtt egy új kísérleti eszközt kell megismernünk, a kettőtörő kalcitkristályt, amelynek különlegessége, hogy a beeső fénynyalábot általában két olyan halványabb fénynyalábbá bontja szét, amelyek polarizációs tulajdonságai egymást kizárók. Ezt kísérletileg is ellenőrizhetjük (11. ábra és 12. ábra).

A beérkező fénysugár útvonalának meghosszabbítását ordinárius sugárnak, a másikat extraordinárius sugárnak nevezzük (13. ábra).

A kísérletek megmutatják, hogy a foton pályája és polarizációja között szoros kapcsolat áll fent. Helyezzünk a 12. ábrának megfelelően egy \blacklozenge (45°) tulajdonságú fotonnyaláb útjába egy kalcitkristályt, majd az ordinárius és extraordinárius sugarak irányába egy-egy detektort (D_O és D_E), amelyek képesek érzékelni a beeső fotonokat (14. ábra). Legyen az ordinárius nyaláb polarizációs tulajdonsága \blacktriangle (függőleges), az extraordináriusé pedig \star (vízszintes), így ezek éppen egymást kizáró tulajdonságok. Ilyen összeállítás esetén a



13. ábra. Sematikus rajz a kalcitkristály fénytöréséről.



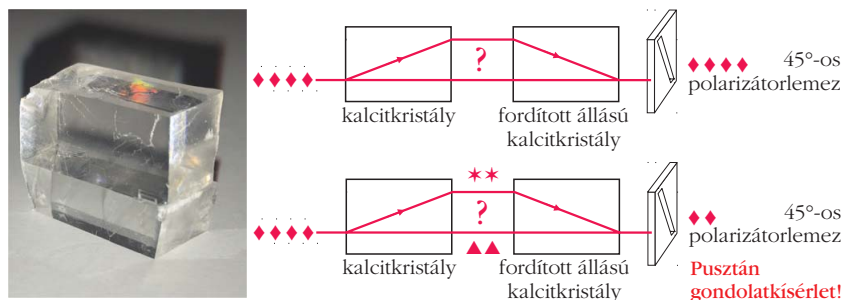
14. ábra. Az egyes fotonokat a detektorok 50%-os valószínűséggel találják meg (Malus-törvény).

két kilépő fénynyaláb intenzitását a Malus-törvény adja meg. Mivel a beeső fotonok polarizációs iránya 45° -os szöveget zár be mindkét kilépő sugárnyaláb polarizációs irányával, ezért a Malus-törvény értelmében a két kilépő fénynyaláb egyenlő fényintenzitású ($\cos^2 45^\circ = 1/2$). Azaz 50-50%-ban osztoznak a beeső fénynyaláb intenzitásán.

Képzeld el, hogy egyszerre csak egy foton érkezik a kalcitkristályra. Mivel a pálya és a polarizációs tulajdonság szoros kapcsolatban áll, a Malus-törvény valószínűségi értelmében 50%-os valószínűséggel mértem a fotonokat az egyes detektorokkal (14. ábra). A detektor jelzése információt ad a beeső foton polarizációs tulajdonságáról, hasonlóan a polarizátorlemezrel való méréshez. *Azonban a valószínűségi értelmezés miatt nem tudom megmondani, hogy az egyes fotonok melyik útvonalon fognak haladni.* Ha előzetesen tudnék pályát rendelni a fotonokhoz, akkor a kalcitkristályra beeső fotonok polarizációs tulajdonságához előzetesen egy másik polarizációs tulajdonságot is rendelnék. Ez azonban ellentmond a kvantumhatározatlanságnak és így a valószínűségi értelmezésnek is.

A kalcitkristály mögé – képzeletben – tegyünk egy ugyanolyan, de azzal fordított állásút. Fogadjuk el, hogy e kísérletben a második kristály hatására a két szétvált fotonnyaláb újra egyesül, ahogy azt a 15. ábrán látjuk. Ha nem végzek mérést a két kalcitkristály között, akkor a fotonok pályájáról nincs információnk, ezért egyik útvonalat sem követik. Éppen ezért, amikor a fotonok a második kristályon áthaladnak, akkor

15. ábra. A bal oldali képen két, egymásra fordított állású kalcitkristályt látunk, a jobb oldali ábrán pedig a két kalcitkristállyal történő egyik kísérlet sematikus rajzát. Ha feltételezhetjük (jobb alsó ábra), hogy egy foton polarizációs tulajdonsága meghatározott a két kristály között, akkor pályájukat is meg tudjuk mondani. Azonban ekkor olyan eredményt kapnánk, amelyről tudjuk, hogy téves.



◆ tulajdonságúak lesznek. Ezért a 45° -os polarizációs irányú polarizátorlemezén teljes hányadukban áthaladnak. Ha valamiképpen kiderítem, hogy az egyes fotonok melyik pályán haladnak, akkor e tudással megváltoztatom a mérés kimenetelét, ugyanis ekkor az egyesült fénynyaláb a * és ▲ tulajdonságú fotonokra bomlik szét. Mivel a kalcitkristály – a 12. ábra 3. és 4. képen bemutatott kísérletek szellemében – ezen tulajdonságokat nem változtatja meg, ezért ezek keveréke fog ráesni a 45° -os polarizátorlemezre, amelyen azonban csak e fotonok fele jutna át. Az eredeti kísérlet szerint viszont mindannyian átjutnak. Azaz, ha valahogyan kiderítjük (vagy akár csak feltételezzük), hogy a fotonok egy konkrét útvonalon haladnak, akkor a mérés eredménye megváltozik. Így a pálya feltételezése téves eredményre vezet. El kell fogadnunk, hogy a pálya rossz fogalom a mikrovilágban.

Összefoglalva, *gondolatmenetünk megmutatta, hogy a pálya fogalma a fotonok esetén nem alkalmazható. A mikrovilágban ezért nem használhatjuk a pálya fogalmát.* Ha én akármilyen módon is, de információt szerzek a két kalcitkristály között a fotonok helyéről, azzal már megváltoztatom a részecskék tulajdonságát, így a mérés kimenetelét is. *A kvantummechanikai mérés ezért általánosabban egy a részecskére vonatkozó információ megismerését jelenti.*

A tananyag Magyarországon

Az eredeti tananyagot eddig két csoportban próbáltam ki. A tapasztalataim alapján módosított verziót további oktatási kísérletekben tervezem kipróbálni. Véleményem szerint a cikkben megfogalmazott anyag a közoktatásban megállja helyét. A diákok a kísérleteket élvezik, a számításos feladatok mérsékelt matematikai ismereteket igényelnek, azonban mély fizikai mondanivalót rejtenek magukban. A diákok érdeklődését fokozza, hogy a modern fizikának egy különösen szép és innovatív fejezetét ismerhetik meg, a kvantummechanikai világ „csodái” pedig a humán érdeklődésű diákok számára is érdekesítő kérdéseket emelhet be a tanórákra, hiszen a világról alkotott képünkre is jelentős hatással van. A konkrét tanítási tapasztalatokból egy angol nyelvű cikkben írok részletesebben [8].

Az új 2020-as Nemzeti alaptanterv [13] egyik hatása éppen az, hogy a hullámtan tárgyalási lehetősége beszűkült, ezért a kvantummechanika hullám-részecske kettősségen történő tanítása is nehezebbé válik. Mivel a koszinusz derékszögű háromszögekre vonatkozóan továbbra is tananyag matematikából, a Malus-törvény és így a tananyag sem tartalmaz olyan matematikai ismereteket, amelyek kihívást jelentenének a diákoknak.

Összefoglalás és a továbbhaladás útja

A bemutatott tananyag itt nem ér véget, további felfedezésre is lehetőség van. A következő fejezetek elvontabbak, ezért a tehetséges és érdeklődő diákok számára ajánlottak, így ezeket e cikkben sem közlöm. Azonban, ha a tisztelt Olvasó érdeklődik aziránt, hogyan lehet a kvantummechanika e területén várható értéket és szórást számolni, érdeklí a kvantumhatározatlanság megnyilvánulása a fotonok szórásában, szeretné megtudni, hogy a klasszikus törvények miként jelennek meg a mikrovilág átlagaként, továbbá szeretné a diákokkal együtt felfedezni a mikrovilágra jellemző matematikai struktúrát, amelynek megkoronázása a sajátérték-egyenlet felírása, akkor ajánlom a honlapomon az itt leírtak folytatását [10].

Zárszóként pedig szeretném a diákok által a fentiek során felfedezett ismereteket pontokba szedni:

- Bizonyos mérések sorrendje nem cserélhető fel.
- A mikrovilág egyik alaptörvénye a valószínűségi értelmezés.
- A részecskékhez bizonyos fizikai tulajdonságok nem társíthatók, amelynek következménye a kvantumhatározatlanság.
- A fotonok megkülönböztethetetlenek.
- A kvantumrészecskékhez nem rendelhető pálya.
- A mérés jelentése és hatása a kvantummechanikában a megszokottaktól eltérő.

Irodalom

1. M. Micheleni, A. Stefanel: *Fisica Quantistica, una proposta per la didattica*. Università di Udine, Litho Stampa, Udine (2004) http://fiztan.phd.elte.hu/pdf/QM_Marisa_Micheleni.pdf
2. A. Stefanel: *Physics didactic innovation materials to support initial and in-service teacher education*. (2006) http://www.fisica.uniud.it/URDF/interreg/quanto/schede_stu/schede_stu_it.htm
3. M. Micheleni, R. Ragazzon, L. Santi, A. Stefanel: Proposal for quantum physics in secondary school. *Physics Education* 35/6 (2000) 406–410.
4. Tóth Kristóf: *Kvantummechanika a középiskolában*. TDK dolgozat (2019) <https://physics.elte.hu/content/fizikatanar-kepzes.t.3002?m=1516>
5. P. A. M. Dirac: *The Principles of Quantum Mechanics*. Clarendon Press, Oxford (1958).
6. Quiskit Bronz fokozat: <https://qworld.net/workshop-bronze> (2021. 04. 27.)
7. Tóth Eszter: *Fizika IV*. Tankönyvkiadó, Budapest (1984).
8. M. Micheleni, A. Stefanel, K. Tóth: *Joint effort in teaching/learning quantum mechanics through light polarization in secondary school*. (2021) Beküldött cikk, <https://kvantummechanikus.files.wordpress.com/2021/03/qm-paper-2.pdf>
9. <https://kvantummechanikus.wordpress.com/> (2021. 05. 02.)
10. Tóth Kristóf: *Modell kvantummechanika a középiskolában, 2. rész*. <https://kvantummechanikus.files.wordpress.com/2021/05/toth-kristof-modell-qm-2.pdf>
11. <https://youtu.be/Et8-gg6XNDY> (2021. 03. 31.)
12. Tóth Kristóf: A kvantum-határozatlanság a kvantummechanika fénypolarizációs modelljében. *Fizikai Szemle*, megjelenés előtt.
13. https://www.oktatas.hu/koznevelas/kerettantervek/2020_nat (2021. 04. 27.)

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

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

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

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

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

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

Megjelenik havonta (nyáron duplaszámmal), egyes szám ára: 1000.- Ft (duplaszámé 2000.- Ft) + postaköltség.

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

KOVÁCH ÁDÁM (1933–2021)

Kovách Ádám, az ATOMKI nyugalmazott főmunkatársa, volt főtitkára, az ELFT volt alelnöke életének 88. esztendejében elhagyott minket. Ádám fizikusi pályafutása szinte teljes egészében az Atommagkutató Intézethez kapcsolódik. Egész élete során mind az oktatás, mind a kutatás irányában mutatott elkötelezettség jellemezte. Széles látókörű tudós volt, sokoldalú érdeklődés vezette pályáján, és a tudományos közélet fáradhatatlan munkásaként is elévülhetetlen érdemekeket szerzett.

Kovách Ádám kitüntetéses matematika–fizika szakos tanári diplomájának megszerzése után négy hónapig tanított a debreceni Fazekas Mihály Gimnáziumban, majd 1955 novemberétől az akkoriban alakuló Atommagkutató Intézet tudományos segédmunkatársaként kezdte tudományos pályafutását. 1964-ben doktorált, 1967-ben szerezte meg a fizikai tudomány kandidátusa fokozatot, 1977-ben pedig címzetes egyetemi docensi címet kapott. Tudományos kutatóként kiemelkedő eredményeket ért el a magfizikai módszerek és a tömegspektrometria geokémiai és földtani alkalmazása területén.

Pályája elején a dunántúli kőszenek urántartalmának felmérését végző csoport munkája keretében fúrásmin-ták urántartalmának béta-sugárzásmérés útján történő meghatározásával foglalkozott. 1957-től 1966-ig az ATOMKI-ban végzett csapadék-radioaktivitási vizsgálatokat irányította. Vizsgálta a Way–Wigner-formula érvényességét, valamint annak alkalmazhatóságát kísérleti atombomba-robbantások időpontjának meghatározására. A folyamatosan végzett mérések alapján lehetővé vált a sztratoszféra és a troposzféra légrétegei átlagos kicserélődési arányának megbecslése is.

1967-től kezdve tevékenysége elsősorban a Rb-Sr kormeghatározási módszer alkalmazására irányult. Hazai magmás és átalakult kőzeteink keletkezési és átalakulási korviszonyainak tisztázásával foglalkozott. Sok földtani feltárást látogatott meg geológuskalapáccsal, hogy terepen is tanulmányozhassa az előfordulási környezeteket, a kőzetek állagát, szöveti bélyegeit, mállottságát, mintázhatóságát. Igyekezett elsajátítani a lényegi geológusi szempontokat, ismereteket. Ebben az időben a geológia megválaszolásra váró kérdéseinek egyike volt az észak-keleti országresz idős kőzeteinek származása, kora, metamorfózisának mértéke, jellege, melynek megválaszolásában *Balogh Kadosával* és *Sámsoni Zoltánnal* vett részt. A következő években a Tokaji-hegység harmadidőszaki kőzeteinek stronciumizotóp-tartalmát tették vizsgálat tárgyává. Több éven át rendszeresen végeztek kormeghatározásokat a Mongóliában működő Nemzetközi Földtani Expedíció részére. 1974–75-ben ösztön-

díjasként a Massachusetts Institute of Technology (USA) földtudományi intézetében dolgozott, ahol az Amazonas-medence (Brazília) kristályos aljzatának és a venezuelai Andok egyes területeinek kormeghatározásával foglalkozott. 1976-tól tevékenysége ismét a hazai területek és a környező országok egyes földtani objektumai kormeghatározására összpontosult. Munkatársaival, többek között *Sudárné Svingor Évával* együtt vizsgálatokat végzett a déli és délkeleti Alföld kristályos aljzatának eredet és átalakulási korviszonyainak tisztázására, részletesen vizsgálták a Soproni hegység és a fertőrákosi palasziget átalakult kristályos kőzeteit, különös tekintettel a többszörös átalakulást tükröző, polimetamorf ásványképződés jelenségeire. A Magyarhoni Földtani Társulat tagjaként gyakran részt vett annak rendezvényein, ahol az új, a geológusok számára érdekes és hasznos fizikai módszerekről, berendezésekről tartott előadásokat. *Schlenk Bálinttal* és *Székyné Fux Vilmával* egy érdekes kísérletet végeztek a nagyfrekvenciás és nagyfeszültségű fényképezés (Kirilan-fényképezés) ásvány-kőzettani alkalmazási lehetőségének a feltárására.

Tudományos és egyetemi oktatói tevékenysége mellett a magyar és nemzetközi tudományos közélet aktív szereplője, szenvedélyes tudománynépszerűsítő és tudománypolitikus volt. Meghatározóan hosszú időn át (1976–1981, majd 1987–2005 között) volt az intézet tudományos főtitkára és a *Debreceni Szemle* szerkesztőbizottságának tagja. Intézményi kiadványok szerkesztése, szabályzatok megalkotása, kollektív szerződések előkészítése fűződik nevéhez.

A társadalmi problémák iránt érzékeny, a közösséggért tenni akaró emberként a rendszerváltás idején megalakuló Tudományos Dolgozók Szakszervezetének – első pillanattól kezdve – 15 éven át elnökségi tagja volt. Munkaügyi és bérkérdésekben formálta a szakszervezet álláspontját, tagja volt a Költségvetési Intézmények Munkaügyi Érdekegyeztető Tanácsának, részt vállalt az Értelmiségi Szakszervezeti Tömörülés megalapításában, kiállt amellett, hogy a kutatók közvetlen érdekvédelme helyett a tudomány általános elismertése érdekében kell küzdeni a TUDOSZ-nak. Azon dolgozott, hogy az autonómia az egész tudománypolitikai modell általános érvényű rendezőelve legyen.

Tagként, tisztségviselőként és elnökként számos bizottság munkájában vett részt a Magyar Tudományos Akadémia bizottságaitól az EURATOM fúziós szakterületének munkabizottságán át a Science on Stage Europe e.V. végrehajtó bizottságáig. A magyar tudományért, a magyar természettudományos oktatásért és a magyar fizikáért legtöbbit mégis az Eötvös Loránd Fizikai Társulat kebelében tette, amelynek 1953

óta volt tagja, és ahol rengeteg feladatot vállalt és számos vezető tisztséget töltött be. Elévülhetetlen érdemeket szerzett a fiatal generációk természettudományos képzése, nevelése érdekében kifejtett tevékenységével: huszonnégy alkalommal volt irányító szervezője a Társulat Hajdú-Bihar Megyei Csoportja és az ATOMKI közös rendezésében megrendezett Debreceni Fizikus Napok egyhetes rendezvénysorozatának. Egy évtizeden át volt mentora a Nyíregyházi Evangélikus Kossuth Lajos Gimnázium által szervezett Országos Szalay Sándor Fizika Elmlékversenynek.

Három perióduson át volt az Eötvös Loránd Fizikai Társulat alelnöke (2003–2005, 2007–2011), három perióduson át főtitkára (1999–2003, 2005–2007) és többször volt az ellenőrző bizottság tagja (1995–1999, 2011–2015). Főtitkári tevékenysége első periódusának kezdetén történt meg a Társulat új alapszabályának véglegesítése és bírósági egyeztetése. Az újabb főtitkári megbízatás alatt készítette el a Társulat új ügyrendjét. Főtitkári tevékenysége során sikerült megállítania a Társulat alapítókéje korábban tapasztalt csökkenésének folyamatát, elsősorban pályázatok benyújtása révén stabilizálva a Társulat költségvetésének helyzetét.

A főtitkári tevékenységből adódó általános feladatok magas szintű ellátása mellett a nemzeti szervezőbizottság elnökeként 2006-ig irányította, illetve szervezte a magyar küldöttség kiválasztását és részvételét a *Physics on Stage*, majd az ennek helyébe lépett *Science on Stage* nemzetközi konferenciákon, valamint irányította az e programokhoz kapcsolódó, a programok által anyagilag is támogatott hazai rendezvények

szervezését. Tagja volt a Németországban bejegyzett Science on Stage Europe e.V. nemzetközi társaság Végrehajtó Bizottságának. Tevékeny részt vállalt az Európai Fizikai Társulat által szervezett *Science and Society* fórumok munkájában.

Kovács Ádám 2013-ban kapta meg az Eötvös Loránd Fizikai Társulat Érmét. Pontosan illett rá a Társulat Érméhez kapcsolódó feltételrendszer minden szava: a fizika területén hosszú időn keresztül folytatott magas szintű kutatási, alkalmazási és oktatási tevékenységével, valamint a társulatban kifejtett értékes, sok területre kiterjedő munkásságával valóban kiemelkedően hozzájárult a fizika hazai fejlődéséhez. Emlékét közvetlen és társulatbéli kollégái, barátai mellett tanárok és diákjaik, a természettudományok szeretetére nevelt nemzedékek is őrzik.

Kovács Ádám és a *Fizikai Szemle*

- Meteoritok, a világműr kutatásának eszközei (társszerzők: Szalay Sándor, Gyarmati Borbála, Sámsoni Zoltán) — 1961/227
 Atommagfizikai módszerek a geológiai kormeghatározásban — 1962/369
 Az egyesített kémiai és fizikai atomsúlyskáláról — 1963/195
 Geokémiai és geológiai irányú vizsgálatok atommagfizikai módszerekkel — 1964/386
 GIREP szeminárium a fizika iskolai oktatásáról, 1981 — 1983/239
 Ciklotron-laboratórium Debrecenben — 1986/80
 Kitajgorodszkij A. I.: Fizika mindenkinek II. (könyvismertetés) — 1986/119
 Tanári továbbképzés kutatóintézetben (Vitaülés) — 1986/153
 Szalay Sándor, 1909–1987 (társszerző: Koltay Ede) — 1988/42
 Lakossági sugárterhelések orvosi vonatkozásai — 1989/196
 Szalay Sándor 80 éves lenne, és az ATOMKI 35 éves — 1990/29
 Teller Ede Debrecenben — 1991/148

RADNAI GYULA (1939–2021)

2021. május 24-én, 82 éves korában koronavírus-fertőzés következtében elhunyt *Radnai Gyula*, az Eötvös Loránd Tudományegyetem Anyagfizikai Tanszékének (korábban Kísérleti, majd Általános Fizika Tanszék) nyugalmazott egyetemi docense, lapunk egyik legaktívabb szerzője, bírálója, kritikusa. Radnai Gyula 1957-ben a Fürst Sándor Gimnáziumban érettségizett, majd az ELTE matematika–fizika-tanári szakán folytatta tanulmányait. Diplomamunkájában a színrendszerek és a színérzékelés fizikájával foglalkozott. A diploma megszerzése után azonnal, 1962-ben az ELTE oktatója lett, ahol közel 60 éven át tanította a fizikus és különösen a fizikatanár szakos hallgatókat. Ezalatt az idő alatt a fizikatanár-képzés meghatározó alakjává vált. Oktatóként különösen a termodinamika alapjai, a fizikatörténet és a fizikatanítás hagyományostól eltérő, új módszerei érdekelték. 1990-ben nyerte el a fizikai tudomány kandidátusa fokozatot, értekezésében a fizikai szemléletmód kialakításához vezető oktatási folyamat lehetőségeivel foglalkozott. A szakmódszer-tan mellett számos kapcsolódó területen is fontos és

eredményes tevékenységet folytatott. Bár pályája mindvégig az egyetemi oktatáshoz kötődött, fontosnak tartotta a középiskolások felkészítését a továbbtanulásra. Azokban a boldog időkben, amikor még felvételizni kellett fizikából a műszaki, természettudományi, sőt az orvosi egyetemi szakokra is, több tízezer diák készült a vizsgára a legendás Dér–Radnai–Soós példatár segítségével. Hosszú ideig dolgozott az országos fizika felvételi bizottságban, amelynek 1995 és 2004 között elnöke is volt.

Munkásságának fontos részét képezte a tehetséggondozás. A *Középszintű Matematika és Fizika Lapok* fizika szerkesztőbizottsági elnökeként fáradhatatlanul dolgozott azon, hogy a megjelenő fizikafeladatok színvonalasak, tanulságosak és érdekesek legyenek. Sokezer középiskolás fiatal Radnai tanár úr *KöMaL*-beli tevékenységének köszönhetően szerette meg a fizikát.

1988-tól 25 éven át dolgozott az Eötvös Loránd Fizikaverseny feladatkitűző bizottságának elnökeként, lényegében ő szervezte meg a versenyek lebonyolítá-

sát és értékelését. Ezen a versenyen a fizikából legtehetségesebb középiskolás és elsőéves egyetemista diákok mérhetik össze tudásukat. Az ünnepélyes eredményhirdetésekre Radnai tanár úr évről évre meghívta a 25 vagy 50 évvel korábbi győzteseket, akikből nagyon sokan jelentős tudósokká váltak. Az Eötvös-versenyen kívül is zsűrielnöke volt több országos fizikaversenynek, így a nagykanizsai Zemplén Győző, a székesfehérvári Lánzos Kornél és a szolnoki Tarján Imre fizikaversenynek.

Az 1980-as években kezdett el mélyebben foglalkozni fizikatörténettel, különösen a fizika magyarországi legjelentősebb alkotóinak munkásságával és életével. 1988-ban az Európai Fizikai Társulat Kondenzáltanyag Divíziója Budapesten tartott konferenciájának alkalmából a North Holland kiadó megjelentette *Physics in Budapest: A Survey* című, *Kunfalvi Rezsővel* közösen írt könyvét. Ugyancsak számos folyóiratcikkre jelent meg a 19. és 20. század kiemelkedő fizikatanáiról, bemutatva egyebek között a nagyhatású tanárok és a legeredményesebb tanítványok közötti szoros kapcsolatot. Fizikatörténeti kutatásairól 100-nál több publikációja jelent meg. Lapunknak is rendszeres szerzője volt. 2017-ben *Centenáriumi megemlékezések 2016* című négyrészes cikksorozatával elnyerte a *Fizikai Szemle* nívódíját. Írásaival – folyóiratunkat több mint negyvennel ajándékozta meg –, bírálói tevékenységével és a legutolsó ideig hónapról-hónapra közölt kritikai megjegyzéseivel jelentősen hozzájárult a *Fizikai Szemle* színvonalának megőrzéséhez. Cikkeit körültekintő, alapos kutatómunka alapján élvezetes stílusban írta meg. Az egész országban és a határon túl is rengeteg előadói meghívásnak tett eleget.

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulatnak 1990–93-ig és 1996–99-ig főtitkár-helyettese, 1999–2003 között elnökhelyettese volt.

Munkásságát több kitüntetéssel jutalmazták, így elnyerte a Prométheusz-éremet (1989), a Zemplén Jolán-émlékéremet (1989), az Eötvös Loránd Fizikai Társulat Érmét (1994) és legutoljára a „Bonis Bona – A nemzet tehetségeiért” életműdíjat (2020).

Radnai Gyula cikkeivel és a *História* tudósnaprabeli szócikkeivel is segített megőrizni a hazai fizikai kutatás és oktatás jelentős alakjainak emlékét. Szomorú, hogy most már ő is bekerült azok közé, akiknek emlékét nekünk, az utódoknak kell ápolunk.

Lendvai János

Radnai Gyula és a *Fizikai Szemle*

A vetítés — 1965/320

A termodinamikai fundamentális egyenletek tanításához — 1966/41
Egy érdekes rezgésköri jelenségről (társszerző: Schusztér Ferenc) — 1966/381

Fizikai optikai kísérletek bemutatása televízióval (társszerzők: Hajdu János, Schusztér Ferenc) — 1967/249

Egyszerű rendszerek egyensúlyi állapota és a termodinamikai állapotfelület — 1978/223

Rezgések és hullámok – I–VIII. (társszerzők: Kovács István, Sas Elemér, Brájer László, Skrapits Lajos, Gyarmati Csaba, Poór István, Főzy István) — 1980/104, 149, 188, 190, 230, 235, 258, 311

Párkányi László, 1907–1982 — 1982/223

Mitől függ a levegő viszkozitása? — 1982/270

Kontinuumok mechanikája – I–IX. (társszerzők: Kovács István, Bérczes György, Brájer László, Skrapits Lajos, Sas Elemér, Poór István, Juhász András, Tasnádi Péter) — 1982/424, 1983/26, 78, 92, 149, 183, 227, 260, 303

Hogyan vezette be Clausius az entrópiát? — 1984/91

A Joule–Thomson-effektus — 1985/306

Szemelvények a termodinamikából és a statisztikus fizikából. Kvantumstatisztikák — 1986/263

Csekő Árpád 85 (társszerző: Kunfalvi Rezső) — 1987/269

A spontán növekvő hőmérséklet — 1988/404

Vermes Miklós, 1905–1990 — 1990/257

Magyar nyelvű nemzetközi fizikaverseny Sopronban — 1991/94

Az eötvösi kísérleti fizika szelleme a Középiskolai Matematikai és Fizikai Lapokban — 1994/29

A hatás megsokszorozása — 1995/424

Madas László, 1910–1997 — 1997/285

Közszolgálati dolgok 2000-ben — 2000/180

Képriport a 2004. évi Eötvös-verseny ünnepélyes eredményhirdetéséről (társszerző: Harkai Zsolt) — 2005/79

Vermes Miklós és az Egyetem — 2005/166

Száz éve született Vermes Miklós — 2005/441

A rugalmas fonálú ingáról – mai szemmel (társszerzők: Gruiz Márton, Tél Tamás) — 2006/337

Wigner Jenő iskolás évei — 2007/62

Perdület paradoxonok, (a)vagy: paradoxonok a perdületre (társszerző: Tichy Géza) — 2007/244

Séta az Aulában — 2009/190

Mayer Farkas (1929–2010) — 2010/104

Nobel-díjas családok – I–II. — 2010/300, 343

A mikrovilág első felfedezői – I–II. — 2011/123, 156

Az első Solvay-konferencia centenáriumán – I–II. — 2011/250, 316

Károlyházy-feladatok az Eötvös-versenyen – I. rész, mechanika; II. rész, termodinamika; III. rész, elektrosztatika; IV. rész, elektromos áram — 2012/313, 383, 417, 2013/18

Száz éve történt: hazai tudósítás Laue briliáns ötletéről — 2013/311

A kétszáz éves Brewster-törvény — 2015/83

Fizikus tehetségpont a két háború között — 2015/249

Einstein Nobel-díjáról négy tételben — 2015/410

Inspiráció a tudományban — 2016/83

Centenáriumi megemlékezések, 2016 – 1–4. rész — 2016/266, 311, 336, 378

A másképp gondolkodás bővületében — 2017/429

Feynman Magyarországon — 2018/154

Hogyan kezdte tanítani Eötvös Loránd a fizikát? – 1–2. rész — 2019/295, 331

Nagy Elemér 100 — 2020/219

Versenyfeladatok az Eötvös-inga bővületében – 1–2. rész (társszerző: Cserti József) — 2020/375, 403

MEZEI FERENC KAPJA A 2021. ÉVI LISE MEITNER-DÍJAT

A Göteborgi Fizikai Központ bejelentette, hogy a 2021. évi Lise Meitner-díjat *Mezei Ferenc* professzor kapja. Az indoklás szerint Mezei Ferenc találmányai, a neutron spin echo módszer és a szupertükör áttörést jelentettek a neutronszórási módszerek területén. Az indoklás kiemeli a hosszú impulzusú neutronforrás koncepciót is, amely a Lundban (Svédország) jelenleg épülő Európai Spallációs Forrás alapját jelenti. Mezei

professzor neutronfizikai felfedezései a neutronos anyagvizsgálati módszerek új területeit nyitották meg sebességük és pontosságuk javításával. Mezei professzor jelenleg – egyebek mellett – új típusú nagyintenzitású kompakt neutronforrások kifejlesztésén is dolgozik, amelyekről lapunk tavaly januári számában írt (Fejlődő perspektívák a neutronnyalábok széleskörű használatában. *Fizikai Szemle* 70 (2020) 6–9.).

TANÁRTÓL TANÁRNAK

MAGYAR SZÍNPADON A TUDOMÁNY FESZTIVÁL

SZEGED, AGÓRA
2021. SZEPT. 17–18.

SCIENCE ON STAGE 2021
SZEGED
THE EUROPEAN NETWORK OF SCIENCE TEACHERS

Természettudományos fesztivált és kiállítást rendez az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, az Informatika-Számítástechnika Tanárok Egyesülete, a Bolyai János Matematikai Társulat, a Magyar Kémikusok Egyesülete és a Magyar Biológiai Tanárok Országos Egyesülete 2021. szeptember 17–18-án Szegeden, a Szent-Györgyi Albert Agórában. Előzetes jelentkezés 2021. július 2-ig: <https://forms.gle/RtB7atM24v5N6F5P8>

További információk: <https://szinpadon-a-tudomany.hu>

Szervezők:

