

fizikai szemle

2018/5

Magyar diákok sikere az „Ifjú Kutatók Nemzetközi Konferenciája” versenyen

Tíz éremmel tértek haza Belgrádból a magyar diákok a 2018. április 19. és 25. között megrendezett, 25., jubileumi International Conference of Young Scientists, ICYS (Ifjú Kutatók Nemzetközi Konferenciája) tanulmányi versenyről.

A matematikából, fizikából, informatikából, környezet- és élettudományokból meghirdetett, angol nyelven folyó versenyen 7 szekcióban 29 országból érkezett középiskolás diákok előadásában 192 prezentáció hangzott el. A diákok teljesítményét nemzetközi zsűri minősítette, s a nyerteseket éremmel és oklevéllel jutalmazták.

Az ICYS2018 rendezvényén részt vevő magyar csapat eredménye

Fizika szekció

Stiga Viktória – III. díj, bronzérem (Budapest, Német Nemzetiségi Gimnázium és Kollégium, 11. osztály)

Nagy Dániel – III. díj, bronzérem (Budapest, Balassi Bálint Nyolcévfolyamos Gimnázium, 12. osztály)

Környezettudomány szekció

Csigi Gergely – II. díj, ezüstérem (Gödöllő, Premontrei Szent Norbert Gimnázium, 12. osztály)

Kalászi Aliz – II. díj, ezüstérem (Kisvárd, Kisvárdai Bessenyei György Gimnázium és Kollégium, 11. osztály)

Rappay Bence – III. díj, bronzérem (Szekszárd, I. Béla Gimnázium Kollégium és Általános Iskola, 12. osztály)

Az idei évtől kezdődően a diákok az előadásokat kötelezően poszter formájában is feldolgozták, amit a nemzetközi zsűri a rövid szóbeli bemutatással együtt értékelt. A bemutatott posztereket harminc díjjal jutalmazták, amelyből öt érmet szereztünk, diákjaink mindegyike megkapta a „Best poster” feliratú érmet is. A diákok pályamunkájukkal az iskolájukban, illetve különböző kutatóhelyeken készültek. Az előadások és a poszterek az ELTE Anyagfizikai Tanszékén többnapos foglalkozások során nyertek végleges formát. A felkészítő foglalkozásokon a diákok munkáját **Rajkovits Zsuzsanna** ny. egyetemi docens (ELTE Fizikai Intézet), **Kirchkeszner Csaba**, PhD-hallgató (ELTE, Kémiai Intézet) és **Bényei Éva**, orvostanhallgató (SOTE) irányította. A szakterületektől független sikeres szereplés bizonyítja, hogy munkájuk nem volt hiábavaló.

Megjegyezzük, hogy az ICYS versenyt, amelyből e belgrádi volt a 25-ik, egy belorusz kollégájával közösen Rajkovits Zsuzsanna alapította, és az egész nemzetközi mezőnyben ő az egyedüli, aki mind a 25 versenyen részt vett. Gratulálunk neki, a többi felkészítőnek és természetesen a sikeres diákoknak.



A képen balról jobbra: Bényei Éva (felkészítő), Nagy Dániel, Karászi Aliz, Stiga Viktória, Rappay Bence, Csigi Gergely (versenyzők), Kirchkeszner Csaba és Rajkovits Zsuzsanna (felkészítők).

RICHARD P. FEYNMAN 100



Száz éve, 1918. május 11-én született *Richard Phillips Feynman*, a 20. század egyik legnagyobb hatású fizikusa. Mostani számunk központi témájaként két írásban tisztelgünk e korszakalkotó fizikus emléke előtt, hangsúlyozva a híres *Feynman-előadások* és más, általa írt, vagy róla szóló művek hazai kiadásainak történetét és szerepét a magyarországi fizikaoktatásban és ismeretterjesztésben. Feynman 1965-ben Nobel-díjat kapott (*Schwingerrel* és *Tomonagával* közösen) a hivatalos indoklás szerint „kvantum-elektrodinamikai munkásságukért, amely mélyreható következményekkel járt az elemi részecskék fizikájában”. Ebben az időben már valószínűleg a világ legismertebb tudósa volt, valóságos tudományos szupersztár.

A fizika számos területén alkotott maradandót. Részt vett a Manhattan-projektben, a kvantummechanikában is új megközelítést talált, ami elvezetett a Feynman-gráfokhoz, ezután a kvantumgravitációhoz fordult, majd foglalkozott az erős és gyenge kölcsönhatás fizikájával, így a természet mind a négy kölcsönhatásának területén ért el eredményeket. Kvantummechanikai magyarázatát adta *Landau* hélium szuperfolyékonyágát leíró elméletének. 1986-ban felkérték a Challenger-katasztrófa okainak feltárására alakított bizottság munkájában való részvételre. Itt ő állapította meg, hogy a katasztrófának anyagtudományi oka van: a szigetelő O-gyűrűk hidegben elvesztik rugalmasságukat, rideggé válnak. Elsők között ismertte fel a kvantumszámítógép megalkotásának lehetőségét és ugyancsak az ő előadásában hangzott el az a nanotudomány és -technológia kiindulópontjaként sokszor idézett megállapítás, hogy „sok hely van még odalent”. A hatalmas terjedelmű és jelentőségű tudományos munkásság mellett a fizika oktatásában és a tudomány népszerűsítésében is kimagasló teljesítményt nyújtott. Így számos magas tudományos díja mellett, a fizika oktatásában kifejtett munkásságáért elnyerte az Amerikai Fizikatanárok Egyesülete Oersted-érmét. Az angol *Physics World* folyóirat 1999-ben 130 vezető fizikus véleménye alapján minden idők 10 legjelentősebb fizikusa közé sorolta. Feynman ekkor, sajnos, már több mint tíz éve halott volt. Lapunk mindkét írása – kimondva, vagy kimondatlanul – arra keresi a választ, hogy mi a háttere e tudományos sikernek és az emellett (vagy ennek ellenére?) elért népszerűségnek. A tehetség mellett az okok között biztosan ott van Feynman hozzáállása, miszerint neki mindent meg kell értenie, amit a világban tapasztal, és ezt a megértést tovább is kell adnia. Feynman érdeklődési és problémamegoldási területe nem korlátozódott a fizikához hagyományosan tartozó tárgykörökre, hanem kiterjedt bármilyen természeti, vagy akár társadalmi folyamat megértésére. Ez a szemléletmód tükröződik a fizika alapjainak teljességét felölelő Feynman-előadásokban is. Felfogása szerint a jelenségek fizikájának megértése, a fizika látásmódjának elsajátítása fontosabb annál, mint hogy a dolog matematikai leírását reprodukálni tudjuk. Ennek ellenére az Előadásokban mindig megtalálhatók a bevezetések a szükséges matematikai módszerekbe is.

Az interneten – szerencsére – nagyon sok Feynman-videó található, amelyek közelebb visznek személyiségének megismeréséhez, bár élete végéig megőrzött brooklini akcentusa némi megszokást igényel. Megtudhatjuk például, hogy nagyon érdekelt a kémia, a biológia, a bongó-dobolás és tehetségesen festett is. Ugyancsak tiszteletreméltó szerepe volt a Challenger-katasztrófa már említett vizsgálatában, aminek lezárásakor megakadályozta a NASA vezetőinek felelősségét némileg takargatni szándékozó változat elfogadását. Egyébként a Challenger-katasztrófa általa feltárt egyik okát bemutató, mindössze egy pohár jeges vizet és egy kis szorító bilincset felhasználó demonstrációja is megtalálható az interneten: <https://www.youtube.com/watch?v=6Rwcbn19c0>.

Vajon van-e, lesz-e a 21. századnak hasonlóan nagy hatású fizikusa?

Rövid film Feynman rajzairól:
<https://www.youtube.com/watch?v=IKZ0mjmXCNg>



Lendvai János
Lendvai János
főszerkesztő

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat havonta megjelenő folyóirata.

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

Főszerkesztő:
Lendvai János

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

Műszaki szerkesztő:
Kármán Tamás

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

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

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



A címlapon:
Richard Phillips Feynman

A hátsó fedélen:
Torricelli-cső a Szegedi Tudományegyetem Juhász Gyula Pedagógusképző Kar főépületének udvarán
(fotó: Karancsi Zoltán, JGYPK)

<i>Lendvai János: Richard P. Feynman</i>	100	145
<i>Horváth Dezső, Trócsányi Zoltán: Müon: mi az és mire jó?</i>		147
<i>A nagy- és kisenergiás kísérletekben müonok által szolgáltatott fizikai információk áttekintése</i>		
<i>Radnai Gyula: Feynman Magyarországon</i>		154
<i>A 100 éve született fizikus magyarországi látogatása és műveinek magyarázata</i>		

<i>Patkós András: Feynman-előadások fizikából – előszó az új magyar kiadásához</i>		162
<i>Mi teszi egyedülállóvá a Feynman-előadásokat?</i>		

<i>Szörényi Tamás, Pereszlényi Ádám, Horváth Gábor, Barta András, Gerics Balázs, Hegedűs Ramón, Susanne Ákesson: Miért kell polarizáció-érzékelés a gazdaállat-kereséshez?</i>		164
<i>A gazdaállat-kereső nőtények viselkedésének hipotetikus magyarázata</i>		

A FIZIKA TANÍTÁSA

<i>Szabó László Attila: Ne habozz! Kísérletezz!</i>		171
<i>Folyadékok felszíni tulajdonságainak bemutatása kísérleteken keresztül, kisiskolás kortól a gimnáziumi szakköri szintig</i>		

<i>Farkas Zsuzsanna, Mező Tamás, Torma Gábor: Torricelli megidézése</i>		176
<i>11 méter magas, vízzel töltött Torricelli-cső a Szegedi Tudományegyetem Juhász Gyula Pedagógusképző Kar főépületének udvarán</i>		

HÍREK – ESEMÉNYEK

<i>Magyar diákok sikere az „Ifjú Kutatók Nemzetközi Konferenciája” versenyen</i>		145
--	--	-----

<i>Bartos-Elekes István: Gábor Zoltán, 1924–2018</i>		180
--	--	-----

<i>J. Lendvai: Feynman's centenary</i>		
<i>D. Horváth, Z. Trócsányi: Müon: what is it and what good is it?</i>		
<i>G. Radnai: Feynman in Hungary</i>		
<i>A. Patkós: Preface to the new Hungarian edition of "The Feynman Lectures on Physics"</i>		
<i>T. Szörényi, Á. Pereszlényi, G. Horváth, A. Barta, B. Gerics, R. Hegedűs, S. Ákesson: Why do horseflies need polarization vision for host detection?</i>		

TEACHING PHYSICS

<i>L. A. Szabó: Do not hesitate! Experiment!</i>		
<i>Zs. Farkas, T. Mező, G. Torma: Recalling Torricelli</i>		

EVENTS

<i>Successful participation of Hungarian students at the 25th International Conference of Young Scientists</i>		
<i>I. Bartos-Elekes: Zoltán Gábor, 1924–2018</i>		



MÜON: MI AZ ÉS MIRE JÓ?

Horváth Dezső, Trócsányi Zoltán
MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest,
MTA Atommagkutató Intézet, Debrecen és
Debreceni Egyetem, Kísérleti Fizikai Tanszék

A müon anomális mágneses momentuma egyike a legpontosabban mért részecskefizikai mennyiségeknek. Az első kísérletek óta eltérés van az elméleti és kísérleti eredmény között, amely jelenleg a teljes bizonytalanság (elméleti és kísérleti) 3,5-szerese. Új jelenség megfigyeléséhez a részecskefizika a zaj felett a teljes bizonytalanság ötszörösének megfelelő többleteléslést követel, a 3,5 tehát csábító jele lehet valamilyen új jelenségnek, de nem igazán perdöntő. Ennek ellenére az értelmezésre – természetesen – sok elméleti javaslat született. 2018 januárjában három japán kutató elméleti számítást publikált arról, hogy az észlelt különbség a müonok és a Föld gravitációs tere közti kölcsönhatással értelmezhető, ami óriási izgalmat váltott ki a fizikusok között: napokon belül számos cáfolat született rá. Volt, aki eleve hibásnak, volt aki csak létező hatás sokszoros túlbecslésének ítélte a számítást. Mindenesetre jó alkalmat szolgáltat áttekinteni a kérdéskört. Az olvasó megtalálja a mindenkori legújabb, elfogadott adatokat a *Particle Data Group* két évente megjelenő, de évente frissülő [1] kiadványában. A cikkhez a szerzők felhasználtak vonatkozó részleteket a nemrég megjelent [2] tankönyvből.

A müon keletkezése: paritásértés

A müon története *Hideki Yukawával*¹ kezdődik. A magerők véges hatótávolságát 1935-ben azzal magyarázta, hogy azt – a zérus tömegű foton által közvetített elektromágnességgel szemben – viszonylag nagy, 100

és $300 \text{ MeV}/c^2$ közötti tömegű² részecskének kell közvetítenie. A következő évben *C. D. Anderson* a kozmikus sugarakban egy megfelelő (100 MeV körüli) tömegű részecskét fedezett fel, el is nevezték μ -mezonnak, de arról kiderült, hogy nem közvetítheti a magerőket, mert nem bozon, hanem fermion, és ráadásul lepton, azaz nem vesz részt erős kölcsönhatásban. 1947-ben viszont *C. Powell* ugyancsak kozmikus sugarakban kimutatta a piont, amely már megfelelőnek látszott. Ma már tudjuk, hogy a magerőket nem a pion közvetíti, de ez a pioncserés kép kis energián jó közelítés³. Mindhárom fenti fizikus elnyerte a fizikai Nobel-díjat: Anderson 1936-ban (a pozitron felfedezéséért), Yukawa 1949-ben, Powell pedig 1950-ben.

Kinek kell a müon?

A Nobel-díjas *Sheldon Glashow* 2007-ben, a CERN-i Nagy Hadronütköztető (LHC) indulásának szentelt [3] gondolatgyűjteményben a következő eszmefuttatást közölte az LHC által megoldandó kérdések között: „És a müon, egy csacska részecske, amelyet a 30-as években láttak először, miért 200-szor nehezebb, mint az elektron, és egyáltalán, miért van ott? Kinek kell a müon?”

Erre egyszerű a válasz: a részecskefizikának igazán csak kell a müon. Mindjárt a megfigyelése áttörést jelentett, hiszen a sztratoszférában keletkezve, $\tau_\mu = 2,2 \mu\text{s}$ élettartamával – relativisztikus időnövekedés nélkül – nem érhetne volna el a földfelszínt, bizonyítva tehát *Einstein* elméletét. Müonok segítettek felfedezni a gyenge kölcsönhatás paritásértését, a neutrínók ízelegését és a Higgs-bozont. Mivel nehéz és viszonylag hosszú élettartamú lepton, a müon a legátalozhatóbb töltött részecske, a nagyenergiás kísérletekben új fizikai jelenségek legmegbízhatóbb hírvivője: a gyorsító kísérletek valamennyi óriás észlelőrendszerét müondetektorok burkolják. Végül müonok segítenek abban, hogy protongyorsítóknál neutrínónyalábot alakítsunk ki: gyors protonok ütközéseiben keletkező relativisztikus pionok bomlásakor, a $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ reakcióban a müon és neutrínója kis szögben előre szóródik; a müon észlelése jelzi, hogy elindult a neutrínó, amelyet azután a kiválasztott távolságban (lehet



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



Trócsányi Zoltán fizikus, az MTA rendes tagja, a DE Fizikai Intézetének igazgatója, az erős kölcsönhatás elméletének nemzetközileg elismert kutatója. *Demény András*-sal társszerzője a *Fizika I.* egyetemi tankönyv *Mechanika* részének, *Horváth Dezső*vel pedig a *Bevezetés az elemi részék fizikájába* című tankönyvnek. Emellett ismeretterjesztő előadások és művek rendszeres szerzője. Tudományos közleményeire ötvenezernél több független hivatkozást kapott.

¹ A japán neveket angol átírásban közöljük, így könnyen utánuk lehet keresni.

² A részecskefizika (szokásos arroganciájával) az E energiát elektronvolt (eV) egységben, a tömegeket pedig az $E = mc^2$ formula alapján E/c^2 alakban kezeli és a c fénysebességet általában egységnyinek tekinti. 1 eV energiát nyer egy elektron 1 volt potenciálkülönbség átszelésekor, $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$. A proton tömege $938 \text{ MeV}/c^2$.

³ Most magfizikus kollégáink bólogatnak, a részecskefizikusok meg rázzák a fejüket.

pár száz méter vagy km) elhelyezett detektorok észlelnek. A müon lelassul a Föld anyagában és elbomlik. A CERN ilyen neutrínónyalábot küld 732 km távolságra, a Rómától délre fekvő Gran Sasso föld alatti laboratórium detektoraihoz, a neutrínók egymásba alakulása (ízrezgés) tanulmányozására.

A Higgs-bozon felfedezéséhez a CMS (Compact Muon Solenoid) kísérlet közel tízezer tonnányi vasba beékelt müondetektorokat használt, és mindkét nagy LHC-kísérlet legmeggyőzőbb méréseit a Higgs-bozon 4 leptonra, müonra vagy elektronra történő bomlása szolgáltatta.

A müon mágneses momentuma

Tükrözési szimmetria: paritásértés

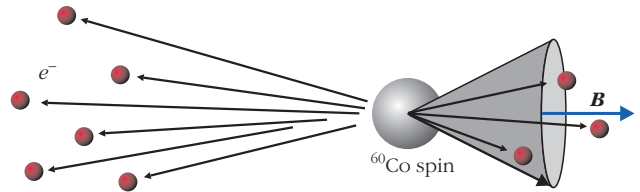
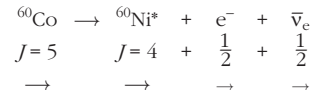
A részecskefizika alapvető elmélete feltételezi, hogy háromféle egyidejű tükrözés, töltésé, téré és idő nem változtatja meg a mérhető mennyiségeket, ezt az angol rövidítések alapján *CPT*-szimmetriának hívjuk. A tértükrözés – mindhárom koordinátatengely ellenkező irányba fordítása – annak felel meg, mintha a jobbkézes Descartes-koordináta-rendszerből balkezsesbe térnénk át, tehát amikor az x tengelyt y -ba forgatva nem $+z$, hanem $-z$ felé mutatna a jobbszár. Tapasztalat szerint a mikrovilágban a fizikai állapotfüggvények tértükrözéskor megőrzik abszolút értéküket, esetleg előjelük változik csupán.

Egészen 1956-ig mindenki hitt abban, hogy a részecskereakciók megőrzik ezt a tulajdonságot, a *paritást*. Kísérletezők azonban megfigyeltek két hasonló mezont: a paritáson kívül minden tulajdonságuk azonos volt. A τ^+ két pionra bomlott, $\tau^+ \rightarrow 2\pi$, a másik pedig háromra, $\theta^+ \rightarrow 3\pi$. A pion *pszeudoskalár* állapot, azaz nulla spinnel és negatív paritással rendelkezik ($J^P = 0^-$), így a τ^+ és a θ^+ ellentétes paritással rendelkező, egyébként azonos részecskék, hacsak a gyenge kölcsönhatás nem sérti a paritásmegmaradást.

Tsung-Dao Lee és *Chen-Ning Yang* a Columbia Egyetemen 1956-ban megvizsgálták a kérdést és megállapították, hogy a paritásmegmaradás valamennyi bizonyítéka elektromágneses jelenségen alapul. Feltételezték, hogy a τ^+ és a θ^+ ugyanaz a részecske (valóban, ma ez a K^+ mezon vagy pozitív kaon, τ és θ ma más részecskék jele) és a gyenge kölcsönhatás nem őrzi meg a paritást. Néhány kísérletet is javasoltak az ellenőrzésre. Az elméletet kísérletileg igazolták, és Lee és Yang Nobel-díjat kapott 1957-ben.

A Wu-kísérlet

Chien-Shiung Wu, aki szintén a Columbia Egyetemen dolgozott, egy washingtoni csoporttal közösen, viszonylag bonyolult kísérlettel ellenőrizték Lee és Yang elméletét. A ^{60}Co izotóp spinjét – igen alacsony hőmérsékleten ($T < 0,1$ K) – mágneses mezővel adott irányba állították be, és észlelték az atommagbomlásból származó elektronokat. Az alacsony hőmérséklet a mágneses precessziót hivatott mini-



1. ábra. A Wu-kísérlet: mágnesesen orientált kobalt-atommagok bomlása.

malizálni. A ^{60}Co J perdülete 5, és amikor az a $J = 4$ spinű $^{60}\text{Ni}^*$ -re bomlik, a kimenő elektron és neutrínó spinjének a ^{60}Co -éhoz, azaz a mágneses mező irányához kell igazodnia (1. ábra).

A kibocsátott elektronok intenzitásának szögeloszlása tökéletesen antiszimmetrikus volt (1. ábra):

$$I(\theta) = 1 + \alpha \frac{v}{c} \cos\theta,$$

és az eloszlás α iránytényezője negatívnak, -1 -nek adódott. Később, amikor hasonló β^+ reakciót vizsgáltak, a pozitronkibocsátáskor $\alpha = +1$ lett az eredmény.

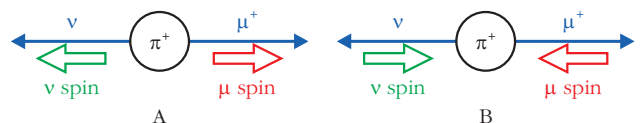
A gyenge kölcsönhatás ezek szerint a balra (mozgásiránnyal szemben) polarizált részecskéket és a jobbra polarizált antirészecskéket *kedveli*, azaz nem törődik a kiinduló paritással: maximálisan sérti annak megmaradását. Amikor *Wolfgang Pauli*, a neutrínó, a kizárási törvény és a spinmátrixok Nobel-díjas atyja meghallotta a Wu-kísérlet eredményét, állítólag kifakadt: „Nem tudom elhinni, hogy Isten gyenge balkezses!”

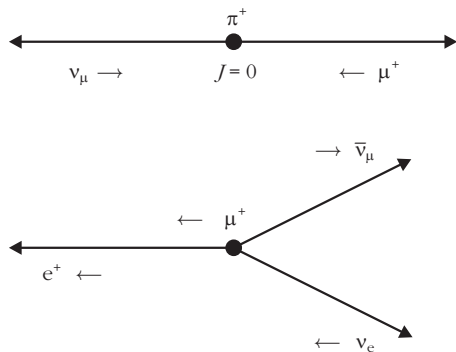
Paritásértés pionbomlásban

A müonok is gyenge kölcsönhatásban bomlanak, így a paritásértés a $\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu$ folyamatban is jelentkezik: a müon a polarizációnak megfelelő irányban bocsátja ki a pozitront, vagy negatív müon esetén az elektront. A müon viszont leggyakrabban pionok bomlásakor keletkezik, $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$, ugyancsak gyenge kölcsönhatásban. A pion nulla spinje miatt a két feles spinű kimenő részecskének csak két lehetséges spiniránya van, egymásnak háttal vagy szemben („A” és „B” a 2. ábrán), de a természet csak „B” esetet engedi meg, ami maximális paritásértést jelent. A zérus perdületű pion tehát polarizált müonra bomlik, az pedig a polarizációnak megfelelő irányban bocsátja ki az elektronokat (3. ábra).

R. L. Garwin, *L. M. Lederman* és *M. Weinrich* (ugyancsak Columbia Egyetem, nagy volt ott a Nobel-díjasok sűrűsége) pionbomlásban ellenőrizték a pari-

2. ábra. Paritásértés pionbomlásban müonra és neutrínóra: csak a „B” folyamat valósul meg.





3. ábra. A pozitív pion balra polarizált pozitív müonra bomlik (fölül), és bomlásakor az a polarizációja irányában bocsátja ki a pozitronot (alul).

tásmegmaradást: pozitív piont állítottak meg mágneses mezőben tartott szén céltárgyban, és egy adott irányban kilépő pozitronokat számláltak a mágneses térerősség (azaz a mágnes árama) függvényében. Az észlelt pozitronszám ingadozása követte a müon precesszióját, azaz a tükörszimmetria sértését, a paritás-sértést mutatta. Ez a kísérlet sokkal egyszerűbb volt, mint Wu asszonyé, ezért hamarabb befejezték, de ugyanakkor publikálták az eredményeket. Lederman csoportja megvárta, hogy Wu csoportja befejezze a munkát, mielőtt beküldték volna a publikációt, és köszönetet mondtak a cikkben Wu asszonynak, amiért közölte velük az előzetes eredményeket.

Müonpolarizáció mérése

Amikor tehát pozitív pionokat fékezőnk le anyagban, azok $\tau_\pi = 26$ ns élettartammal müonra bomlanak, $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$. Mágneses mezőben a lassú müon $\tau_\mu = 2,2 \mu\text{s}$ élettartammal bomlik, miközben spinje a mágneses térerősséggel arányos frekvenciával forog, *precesszál*:⁴

$$\omega \approx \frac{eB}{m_\mu c},$$

a pozitronokat a polarizációja irányában bocsátva ki (3. ábra).

A kísérlet negatív müonokkal sokkal bonyolultabb, mert az anyagban lefékeződött negatív pionokat atomi befogás után elnyelik az atommagok, az csak vákuumban elbomló pionokkal végezhető.

A müon anomális mágneses momentuma

A töltött részecskék $\boldsymbol{\mu}$ mágneses momentuma arányos az \boldsymbol{S} perdületvektorral, és rendkívül fontos fizikai mennyiség, mivel igen érzékeny nehezebb részecskék hatására, azaz új fizikai jelenségekre. A müon esetén

$$\boldsymbol{\mu}_\mu = -g \frac{e\hbar}{2m_\mu} \boldsymbol{S},$$

⁴ A szokásos $\hbar = 1$ egységrendszert használva.

ahol g és m a müon giromágneses tényezője és tömege, e és \hbar pedig az egységtöltés és a redukált Planck-állandó. A Dirac-egyenlet $g = 2$ -t feltételez, de virtuális Feynman-hurkokon keresztül a nehezebb részecskék jelentős járulékokat adnak hozzá. A töltött müon ugyanis, miközben külső mező hat rá, virtuális fotonokat bocsát ki és nyel el. A fotonok pedig virtuális részecske-antirészecske párokká alakulhatnak, amennyire mindezt Heisenberg határozatlansági összefüggése megengedi.

A mágneses momentum anomális része,

$$a = \frac{g-2}{2}$$

a fenti hatások járuléka. A standard modell szerint nemcsak virtuális γ -fotonok, hanem a gyenge kölcsönhatást közvetítő W - és Z -részecskék is keletkezhetnek közben, illetve a részecske-antirészecske párok nemcsak elektron-pozitron (vagy más lepton-antilepton), hanem az erős kölcsönhatásban részt vevő kvark-antikvark ($q\bar{q}$) párok is keletkezhetnek. Ezért

$$a(\text{SM}) = a(\gamma) + a(W, Z) + a(q\bar{q})$$

alakú. Ha viszont vannak a standard modellen túli erők vagy részecskék, azok járulékanak is meg kell jelennie benne, tehát az anomális mágneses momentum rendkívül fontos, komoly alacsonyenergiás felfedezési potenciállal rendelkező mennyiség, amelyet vissza-visszatérően, egyre nagyobb pontossággal igyekeznek meghatározni. Ha találunk benne eltérést a standard modelltől (eddig még mindig volt), az lehet hibás mérés vagy hiányos számítás következménye, de ha mindkettő helyességéről meggyőződünk, akkor csakis új fizika jele lehet, tehát mindenképpen hasznos. A pontos mérések *mindig* hasznosak a fizikában, sok felfedezés született csak azért, mert a kísérletezők pontosították eredményeiket. Így fedezték fel például a kozmikus háttérsugárzást és a CP -szimmetria sértését: mindkettő olyan Nobel-díjas eredmény volt, amely megváltoztatta a világlétezésünket.

$(g-2)_\mu$: nemrelativisztikus mérés

Tehát a müon mágneses momentuma

$$\boldsymbol{\mu} = g \frac{e\hbar}{2m c} \boldsymbol{S},$$

és a Dirac-egyenlet $g = 2$ -t feltételez. Nemrelativisztikus esetben a müon Larmor-precessziója B térerősségű mágneses mezőben

$$\begin{aligned} \omega_s &= \frac{g}{\hbar} \left(\frac{e\hbar}{2m c} \right) B = \frac{eB}{m c} \frac{g}{2} = \frac{eB}{m c} \left(1 + \frac{g-2}{2} \right) = \\ &= \frac{eB}{m c} (1 + a) \end{aligned}$$

frekvenciájú. Ha a müon a lendületével párhuzamosan polarizált (töltésének megfelelően, azzal egyező

vagy ellenkező irányban), ami mindig igaz, ha pionbomlásban keletkezett, akkor megfelelően megépített, kör alakú tárológyűrűben a müon lendülete térben állandó spinirány mellett el kell forduljon, ezért keringésének

$$\omega_c = \frac{eB}{mc}$$

ciklotronfrekvenciája levonódik a Larmor-frekvenciából. Tehát a müon teljes precessziós frekvenciája

$$\omega_a = \omega_s - \omega_c = \omega_s - \frac{eB}{mc} = a \frac{eB}{mc}.$$

A tárológyűrűben tartott müon pozitronra bomlik, $\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu$, és a pozitron a müon polarizációja irányában lép ki. A müonbomlás észlelése adott irányban időben oszcillál:

$$N(t) = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}} [1 - A \cos(\omega_a t + \phi)],$$

ahol $\tau = 2,2 \mu\text{s}$ a müon élettartamát és ϕ a mérés szögét jelenti a körpálya érintőjéhez képest.

Szerencsés, hogy a mágneses mezőben körpályán haladó müon esetében a kétféle forgás, a müon lendületéé és spinjéé ilyen előzékenyen kivonódik egymásból, lehetővé téve az anomális tényező közvetlen mérését, és így sok nagyságrenddel növelve a mérés pontosságát. Nagyon lényeges körülmény, hogy mindez független a müon lendületétől.

Az első ilyen kísérletet 1965-ben a CERN-ben végezték *Georges Charpak* vezetése mellett (aki nem ezért, hanem a sokszálas proporcionális kamráért kapott Nobel-díjat 30 évvel később). A kísérletet $p_\mu = 90 \text{ MeV}/c$ lendületű müonokkal végezték, $B = 1,6 \text{ T}$ erősségű mágneses mezőben és eredménye $a = 1162(5) \cdot 10^{-6}$ lett, tehát jelentős anomaliást mutatott a Dirac-elmélethez képest.

$(g-2)_\mu$ relativisztikus müonokkal

A mérés pontosságának növelésére magától értetődő lehetőség, ha a müonok élettartamát a relativitáselmélet segítségével megnöveljük. A relativisztikus müon spinprecessziós frekvenciájában megjelenik egy relativisztikus korrekció, a Thomas-járulék:

$$\omega_s = g \frac{eB}{mc} + (1 - \gamma) \frac{eB}{mc\gamma},$$

ciklotronfrekvenciája pedig

$$\omega_c = \frac{eB}{mc\gamma}$$

lesz, ahol

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

a szokásos relativisztikus tényező. Végeredményképpen a mérhető különbség ugyanaz marad:

$$\begin{aligned} \omega_a &= \omega_s - \omega_c = \frac{eB}{mc} \left(\frac{g}{2} + \frac{1 - \gamma}{\gamma} - \frac{1}{\gamma} \right) = \\ &= a \frac{eB}{mc}. \end{aligned} \quad (1)$$

Ezt a kísérletet is a CERN-ben végezték (*J. Bailey* és társai, 1972), $p_\mu = 1,9 \text{ GeV}/c$ lendületű müonokkal, amelyekre a γ relativisztikus tényező 12 volt, a müonok élettartama tehát egy nagyságrendet, $\gamma\tau_\mu = 26 \mu\text{s}$ -ra nőtt. Sajnos, a hosszabb keringés során a müonok pályája deformálódik, ami a szögmérés növekvő bizonytalanságához, sőt a müonok keringés közbeni elvesztéséhez is vezet. Valamilyen módon fókuszálni kellett őket, és arra $B = 1,7 \text{ T}$ inhomogén mágneses mezőt használtak. A sugárirányban változó mágnesség segítette a körpályára visszaterelni a müonokat, bár egy kicsit elkente az eredményt, de az így is nagyot javult, $a = (116616 \pm 31) \cdot 10^{-8}$ -ra. Öt év munkája tehát a pontosság egy nagyságrendi javulását jelentette.

$(g-2)_\mu$ mágikus lendülettel

Az inhomogén mágneses mező ugyan fókuszálja a müonokat, de szélesíti azok impulzuseloszlását, növeli a kísérleti bizonytalanságot. A megoldás a fókuszálás és a müonok körpályán tartó mágneses mező elválasztása, amelynek lehetséges módja az elektrostatikus fókuszálás. \mathbf{E} elektromos mezőben \mathbf{v} sebességű müon számára az anomális mágneses momentumhoz rendelhető frekvencia:

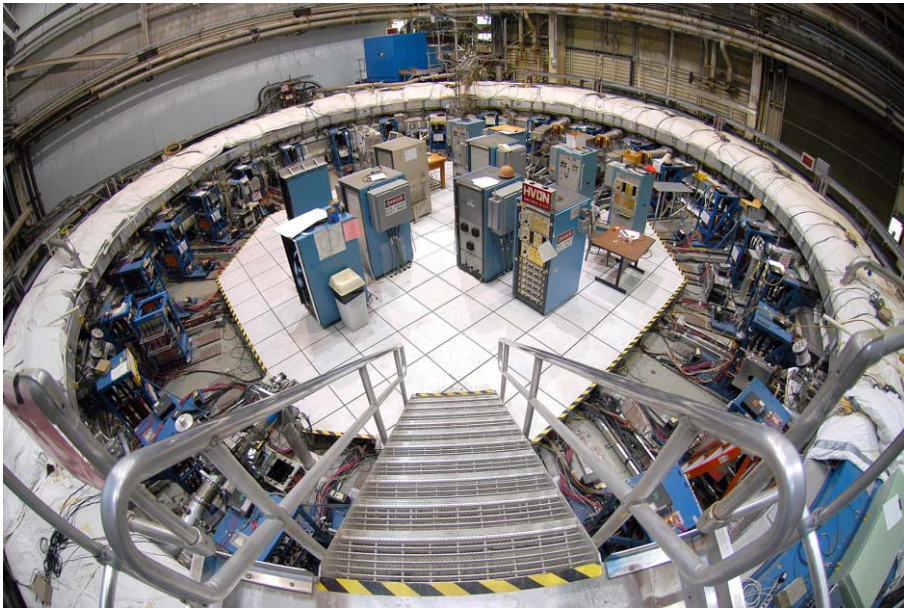
$$\omega_a = \frac{e}{mc} \left[a\mathbf{B} - \left(a - \frac{1}{\gamma^2 - 1} \right) \frac{\mathbf{v} \times \mathbf{E}}{|\mathbf{v}|} \right]. \quad (2)$$

A fenti egyenletről azonnal látszik, hogy létezik egy *mágikus lendület*, amelyre

$$a - \frac{1}{\gamma^2 - 1} = 0,$$

tehát az elektromos mező hatása eltűnik a precessziós frekvenciából. Ezt a kísérletet is a CERN-ben végezték először (*J. Bailey* és társai, 1979), $B = 1,5 \text{ T}$ homogén mágneses mezőben, a müonok lendülete a mágikus $p_\mu = 3,094 \text{ GeV}/c$ és a relativisztikus tényező $\gamma = 29,37$ volt, amely a müon élettartamát $\gamma\tau_\mu = 64,4 \mu\text{s}$ -ra növelte. Ezzel a módszerrel a negyedére sikerült csökkenteni a mérési bizonytalanságot: $a = (1165924 \pm 85) \cdot 10^{-9}$ volt az eredmény.

A legutóbbi ilyen kísérlet 2006-ban fejeződött be a Brookhaveni Nemzeti Laboratóriumban. A tárológyűrűben bomló müonokat (4. ábra) 24 detektor figyelte, észlelve a μ^- bomlásából származó elektronokat és a μ^+ -ból eredő pozitronokat. Az eredmények azonosak voltak a kétféle müonra (ami igen fontos ellenőrzése a mérési módszernek) és átlagukra $[11\,659\,2089 \pm 54 \text{ (stat)} \pm 33 \text{ (szisz)}] \cdot 10^{-11}$ érték adódott [4]. Az első bizonyta-



4. ábra. A Brookhaveni Nemzeti Laboratórium tárológyűrűje a müon $g-2$ méréséhez, 1999–2006.

lanság statisztikus, csak az észlelt eseményszámtól függ, a második szisztematikus, a kísérlet és értelmezés valamennyi körülményét figyelembe vevő. Ez az eredmény két nagyságrenddel pontosabb, mint a korábbi és a brookhaveni csoport 20 évi munkájába került.

Mit mond az elmélet?

A standard modell jóslata

Az 5. ábrán a legalacsonyabb rendű járulékok láthatók a müon anomális mágneses momentumához a Feynman-gráfok nyelvén kifejezve.

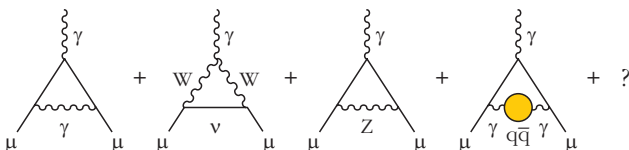
$$a(\text{SM}) = a(\gamma) + a(W^\pm, Z) + a(q\bar{q}) + a(??).$$

Ha léteznek részecskék a standard modellen kívül (azt fellengzősen *új fizikának* nevezzük), azok járulékaik is meg kell jelenjenek a magasabb rendű korrekciókban, a kérdőjeles tag azt jelképezi.

A modellszámítások nehézségeinek illusztrálására tekintsük át azok jelenlegi állását (6. ábra) [1]:

- Kvantumelektrodinamikai járulékok (a perturbációs számítás $(\alpha/\pi)^5$ rendjéig, ahol $\alpha/\pi \approx 0,0023$): $a(\text{QED}) = 116\,584\,718,95(8) \cdot 10^{-11}$.
- Elektrogyenge járulékok (két W^- , Z^- , és a Higgs-bozon hurokig): $a^{\text{EW}} = 153,6(1,0) \cdot 10^{-11}$.

5. ábra. Az anomális mágneses momentum összetevői: elektromágneses virtuális fotonnal (1. tag), a gyenge kölcsönhatás járulékaik (2. és 3. tag) W^\pm és Z -bozonnal, valamint kvarkhurokokkal járó hadronos tagok (4. tag). Magasabb rendben ezek természetesen kombinálódnak. A standard modellen kívüli részecskék további járulékokat adhatnak, a kérdőjeles tag azt jelképezi.



- A hadronos járulékok a perturbációs számítás legalacsonyabb rendjében: $a^{\text{had}(1)} = 6931(34) \cdot 10^{-11}$.

- Hadronos járulékok 2. és 3. rendű korrekciói: $a^{\text{had}(2-3)} = 19(26) \cdot 10^{-11}$.

Jó látszik, hogy a számítási bizonytalanságban a hadronos járulékok dominálnak.

A teljes számítási eredmény [1] a jelenleg ismert összes korrekcióval

$$[1\,165\,918,23(1)(34)(26)] \cdot 10^{-11},$$

ahol a háromféle bizonytalanság az elektrogyenge, a vezető hadronos és a magasabbrendű hadronos járulékoktól ered. A legutóbbi kísérleti érték μ^+ és μ^- átlagában és az elméleti számítás különbsége

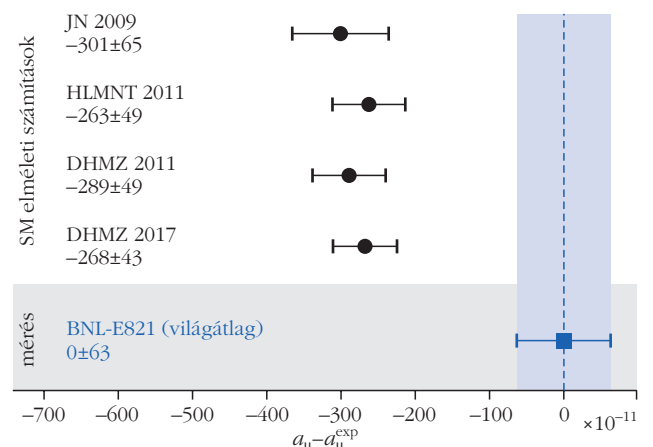
$$\bar{a}_\mu^{\text{exp}} - a^{\text{SM}} = (268 \pm 63 \pm 43) \cdot 10^{-11},$$

ahol az első bizonytalanság a kísérleti, a második pedig az elméleti értéké. Az eltérés a teljes – négyzetesen felösszegzett – bizonytalanság 3,5-szerese (azaz $3,5\sigma$).

Túl a standard modellen?

Habár a müon mért anomális mágneses momentumának eltérése a standard modell jóslatától nem eléggé jelentős, hogy felfedezésnek tekintsük, sokan próbálták új fizika feltételezésével értelmezni. A standard modellel végzett számítások remekül egyeznek a kísérleti adatokkal, van azonban jó pár jelenség, amely túlmutat rajta, ilyen a galaxisok sötét anyaga, valamint a neutrínók tömege és ízrengése. Csaknem valamenny-

6. ábra. A különböző módszerekkel végzett elméleti számítások összehasonlítása a brookhaveni kísérlet eredményével [1]. A müon anomális mágneses momentumára a standard modell a teljes bizonytalanság 3,5-szeresével kevesebbet ad, mint a legutóbbi kísérleti érték.



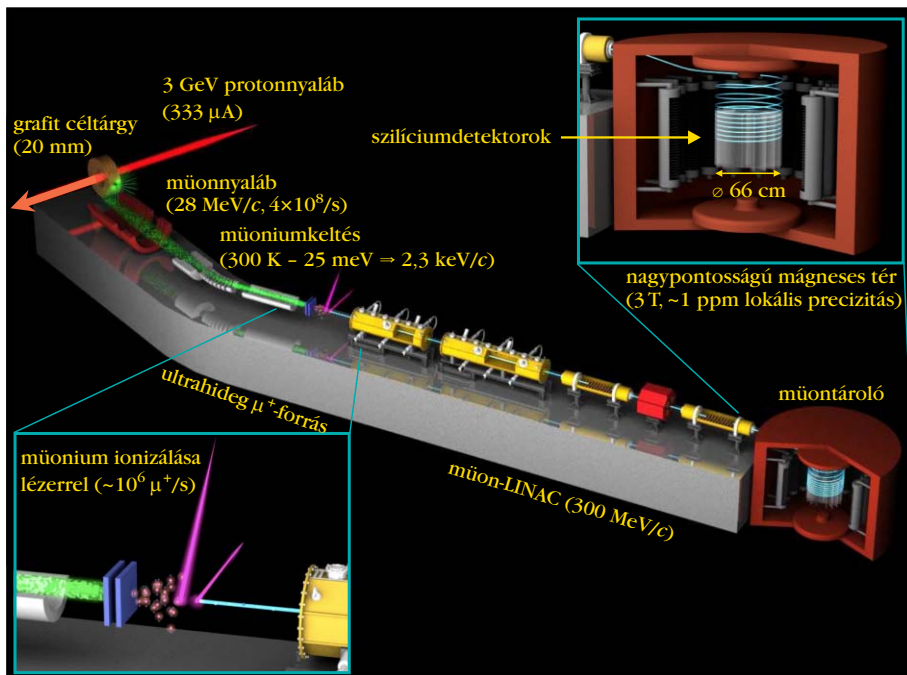


7. ábra. A müöngyűrű szállítása a New York melletti Brookhaven Nemzet Laboratóriumból a Chicago közelében levő Fermilabba vízen és közúton. Az utakon éjjel közlekedtek, és gyakran kellett leszerelni lámpaoszlopokat és útjelző táblákat.

nyi problémát megoldaná a *szuperszimmetria*, az elemi fermionok és bozonok páros létezése. Sajnos, ilyen új részecskék nyomát nem látni a kísérletekben, bár nagy erővel keresik. A SUSY-nak becézett modell megmagyarázná a müön ($g-2$) eltérését is a kísérlet-től, az új részecskék járulékaival, de az ehhez szükséges, viszonylag kis tömegű ($m = 100 \dots 500 \text{ GeV}/c^2$

közötti) SUSY-részecskék létezését kizárják az LHC-kísérletek.

Felvetődött egy magyarázat a *sötét fotonnal* kapcsolatban [5] is: a Debrecenben megfigyelt részecske, ha kissé keveredik az elektromágnesség fotonjával, megmagyarázhatja a ($g-2$) eredményt is, de annak létezését még független kísérletnek kell megerősítenie.



8. ábra. A japán J-PARC laboratórium készülő műon-kísérlete.

lézerrel ionizálva rendkívül monoenergiás műonok szabadulnak fel, amelyeket utána 320 MeV energiára gyorsítanak fel. Ezzel olyan polarizált műonnyalábot nyernek, amelynek rendkívül kicsi lesz lendületszórása (ebben az értelemben lesznek *hidegek* a műonok), a gyorsítás után a mozgásirányra merőleges lendülete marad a szobahőmérsékletnek megfelelő 0,25 eV. Ezeket a gyors műonokat egy $B = 3 \text{ T}$ erősségű mágneses mezőben 33 cm sugarú pályára juttatják. A szimulációk szerint ez fókuszálás nélkül biztosítja, hogy a műonok a 6,6 μs -ra növelt élettartamuk alatt megtett mintegy 4000 fordulat során nem szóródnak ki a mágneses vákuumteréből. A műonbomlás pozitron-

jait a műonpályán belül elhelyezett vékony félvezető detektorok észlelik (8. ábra).

A kísérlet folytatása

Fermilab

Az elméleti számítások kissé eltérnek a méréstől, a különbség $3,5\sigma$ (ahol σ a különbség teljes bizonytalansága), de a hadronos járulékok nagy bizonytalansága miatt mind az elméleti számításokat, mind pedig a mérést érdemes pontosítani.

A brookhaveni kísérletet a Fermilabban folytatják, és ahhoz a tárológyűrűt a New York melletti Brookhavenből a Chicago-környéki Bataviába kellett szállítani. Az azonban túlságosan nagy volt és nagyon érzékeny rázkódásra, illetve csavarodásra. Több, mint 5000 km-t utazott [6] főként hajón: New Yorkból az Atlanti-óceánon a Mexikói öbölbe, majd fel a Mississippin és az Illinois folyón (7. ábra). A gyűrűt üzembe helyezték, az első eredmények hamarosan várhatók. Várkozásuk szerint a brookhavenihez képest 21-szeres eseményszámot, 1/4-rész szisztematikus bizonytalanságot és az eddigivel azonos elméleti és kísérleti középérték mellett 7σ pontosságot fognak elérni.

Készülő japán kísérlet hideg műonokkal

A Brookhaven–Fermilab tárológyűrűs kísérletének egyik nehézsége az egyenletes, állandó mágneses tér biztosítása a műonok 52 méteres pályája mentén. A Tokaiban épült J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) egyik tervezett kísérlete a műon anomális mágneses momentumára irányul, radikálisan más módszerrel, mint a korábbiak [7]. Protonnyalábbal pozitív pionokat állítanak elő, lelassítják őket és a bomlásukban kibocsátott kisenergiás műonokkal műonium atomot, a pozitív műon és elektron kötött állapotát ($\text{Mu} = [\mu^+ e^-]$) hoznak létre. A műoniumot

Zárszó: miért pont a műon?

Az írásunk címében felvetett kérdésre tehát az a válasz, hogy a műonok mind a nagyenergiás kísérletekben, mind kis energián rendkívül fontos fizikai információt szolgáltatnak. Jogos a kérdés, mi a helyzet a másik két leptonnal, miért nem mérjük az elektron és a tau-lepton mágneses momentumát. A válasz, sajnos, egyszerű. A műonnál sokkal könnyebb elektron anomális mágneses momentuma rendkívül pontosan számolható és mérhető, de ahhoz az esetleges új fizika hírnökei, a nehezebb részecskék nagyon kicsi járulékokat adnak, a határozatlansági reláció azt túlságosan megköti. Ezek a járulékok a műonnál sokkal nehezebb tau-lepton esetén nyilván nagyok, csak hogy a tau-lepton nagyon sokféleképpen tud bomlani, élettartama tehát igen rövid és polarizációja egyáltalán nem mérhető. Tehát maradnunk kell a műonnál.

Irodalom

1. C. Patrignani et al. (Particle Data Group): The Review of Particle Physics. *Chin. Phys. C* 40 (2016) 100001 and 2017 update; <http://pdg.web.cern.ch/pdg>
2. Horváth Dezső, Trócsányi Zoltán: *Bevezetés az elemi részecskék fizikájába*. Typotex, 2017, 10. fejezet
3. Sheldon Glashow in *The Big Deal*. <http://www.pbs.org/wgbh/nova/sciencenow/3410/02-bigd-text.html>
4. J. P. Miller, E. de Rafael, B. L. Roberts: Muon ($g-2$): Experiment and theory. *Rept. Prog. Phys.* 70 (2007) 795–897.
5. Krasznahorkay Attila: Az ötödik kölcsönhatás nyomában. *Fizikai Szemle* 66 (2016) 248–253.
6. <http://muon-g-2.fnal.gov/bigmove/>
7. M. Abe et al.: Magnetic design and method of a superconducting magnet for muon $g-2$ / EDM precise measurements in a cylindrical volume with homogeneous magnetic field. *Nucl. Instrum. Meth. A* 890 (2018) 51.

Richard Phillips Feynman száz éve, 1918. május 11-én született, ez ad alkalmat a megemlékezésre. A róla szóló irodalom a Gutenberg-galaxisban és az interneten is bőséges, ki kell választani valamilyen érdekes részterületet. A hazai fizikusokat és tanárokat feltehetően a címben megfogalmazott vonatkozás érdekli a legjobban, ezért erről szól a cikk első és harmadik része. Közben persze megkerülhetetlen a kivételes tudós személyisége, élete, erről lesz szó a középső, második részben.

A *Mai fizika*

1956 után a hazai könyvkiadásban a fizikai ismeretek terjesztésének két zászlóvivője volt: a Gondolat és a Műszaki Könyvkiadó. A Gondolatnál jelentek meg többek között *Heisenberg*, *Bohr*, *Planck*, *Einstein* válogatott tanulmányai egységes A/5-ös formátumban, a Műszaki pedig nevezetes kis „kék könyv” sorozatában, B/6-os formátumban adta ki *Marx György Kvantummechanikáját*, *Keszthelyi Lajos Atomok és atomi részecskék* című könyvét, *Györgyi Géza Elméleti magfizikáját*.

A hatvanas évek második felében a Műszaki Könyvkiadó érzékenyen reagált a fizika oktatásának akkor már az egész világon elterjedő megújulására, és 1966-ban *Svékus Olivér* fordításában, *Modern fizika* címmel, 4000 példányban kiadta *Jay Orear Fundamental Physics* című sikerkönyvét. A könyv itthon is gyorsan elfogyott, 1971-ben újra ki lehetett adni az átdolgozott, bővített 2. kiadást, immár 9800 példányban!

Mi történt e két időpont között? A Műszaki Könyvkiadó gondozásában ekkor jelent meg – már a Szovjetunióban is kiadott – *The Feynman Lectures on Physics* B/5-ös formátumban, *Mai fizika* címmel. Akárcsak a Szovjetunióban, itthon is kilenc kötet tartalmazta az Egyesült Államokban háromkötetes sorozatot. Az első két kötet 1968-ban egyenként 3500 példányban, utána 1969-ben három kötet 7100 példányban, majd a befejező négy kötet 1970-ben egyenként 10 100 példányban jelent meg! Feynman neve így lett széles körben ismert Magyarországon a fizikát tanuló egyetemi hallgatók és oktatók körében.



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



Röviden tekintsük át, hogy kik voltak azok – főleg fizikusok – akik e könyvek fordítását végezték. Az első három kötetet (*A modern természettudomány alapjai*, *A mechanika törvényei*; *Relativisztikus mechanika*, *Forgó- és rezgőmozgás*; *Optika*, *Anyaghullámok*) Györgyi Géza ellenőrzése mellett *Bozóki György*, *B. Gombosi Éva* és *Nagy Elemér* fordította. A negyedikben (*Statistikus mechanika*, *Termodinamika*, *Hullámntan*, *Szimmetriák a fizika törvényeiben*) Nagy Elemér *Király Péter* váltotta, az ellenőrzést pedig *Szűcs Ervin* végezte, akinek a Műszaki Könyvkiadónál nem sokkal korábban jelent meg könyve a hasonlóságelméletről. Az ötödik kötet (*Elektromágnesség*, *Elektrosztatika*, *Dielektrikumok*, *Magnetosztatika*) fordítói *Somogyi Antal* és *Telbisz Ferenc* voltak, a hatodik kötetet (*Elektromágneses indukció*, *Maxwell-egyenletek*, *Relativisztikus elektrodinamika*) *Benkő Lázár*, Nagy Elemér és *Vesztergombi György*, a hetediket pedig (Kristályszerkezetek, Dia-, para- és ferromágnesség, Folyadékok áramlása) *Telbisz Ferenc*, *T. Pósch Margit* és *Vesztergombi György* fordította. E három utóbbi kötet fordításait *Simonyi Károly* ellenőrizte. A befejező két kötetet (*A kvantumfizika alapjai*, *Kétállapotú rendszerek*, illetve *A szilárdtest-fizika alapjai*, *A hidrogénatom*, *A szupravezetés*) – *Marx György* felügyelete mellett – *Sebestyén Ákos* egyedül fordította. Nem lehet véletlen az sem, hogy a belső szerkesztő az első három kötetnél középiskolai tanár, a következő négynél mérnök, az utolsó kettőnél pedig fizikus volt.



Az 1968 és 1970 között megjelent kilenc kötet kiadása dicséretes vállalkozás volt. Egyben sikeres is, amit a növekvő kiadási példányszámok bizonyítanak. Mind a kilenc kötet címlapján nagy betűkkel szerepel: „Feynman Nobel-díjas”. Sokkal kisebb betűkkel áll ez: „R. P. Feynman – R. B. Leighton – M. L. Sands”.

E két utóbbi személy vajon ki lehetett?

Robert Benjamin Leighton (1919–1997) elismert tanár volt a California Institute of Technology (amelyet csak Caltechként emlegettek arrafelé) fizika-matematika-csillagászat tanszékén. Végzettségét tekintve vilamosmérnök, rendkívül jó kísérletező készséggel. 1959-ben jelent meg *Modern fizikai elvek* című könyve, amelyet tankönyvként használtak ott, az egyetemen. Egyike volt azoknak, akik rábeszéltek Feynmant arra a négy féléves előadásra, amelyet végig követett,

Richard Feynman egy tanársegéddel konzultál, a háttérben a *Mai Fizika* sorozat két társszerzője: Robert Leighton és Matthew Sands (1963. április 29.).

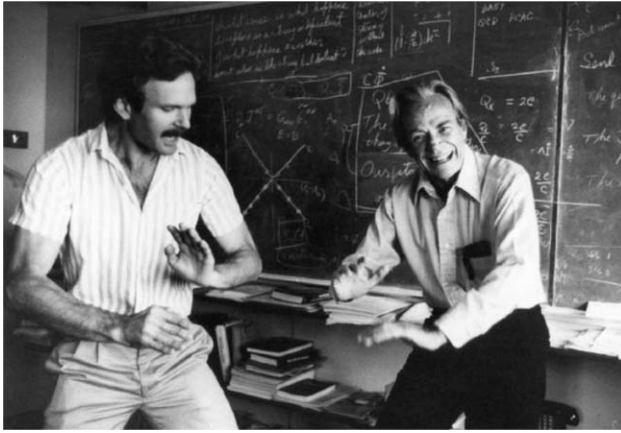


majd a magnófelvételek alapján írásba is foglalt Feynmannel közös barátjuk, **Matthew Sands** segítségével.

Matthew Linzee Sands (1919–2014) egy hónappal volt fiatalabb Leightonnál. Hozzá hasonlóan ő is jó kísérleti fizikus volt: már kisfiú korában, régi rádiók-ból kibányászott alkatrészekből, saját rádióvevőt szerelt össze. Mint elektronika-szakértőt alkalmazták Los Alamosban, itt ismerkedett meg Feynmannel. A háború után néhány évvel a Caltechen találkoztak újra, ahol Matthew Sands az 1,5 GeV-es elektronszinkrotron segített megépíteni és működtetni. 1960 és 1966 között azon Felsőoktatási Fizikai Bizottság tagja volt, amelyik a főiskolai és egyetemi fizikaoktatást volt hivatva modernizálni az Egyesült Államokban, így lett Sands is Feynman előadásainak szorgalmazója, majd a születő tankönyv egyik társszerzője.

A *Mai fizika* sorozathoz visszatérve még el kell mondani, hogy a magyart megelőző szovjet kiadáshoz *N. A. Szomorogyinszkij*, nagy hírű szovjet elméleti fizikus írt előszót, a magyar kiadáshoz pedig a Műszaki Egyetem Fizika tanszékének akkori vezetője, **Gombás Pál**. A *Feynman Lectures* szerte a világon olyan sikeres lett, hogy más kiadók is megpróbálkoztak bizonyos kiválasztott fejezetek külön könyvben való közlésével. Nálunk *Hat könnyed előadás* címmel 2000-ben jelent meg az 1., 2., 3., 4., 7. és 37. fejezet, amelyeket közösen adott ki a Park és az Akkord Könyvkiadó, *Ill Márton* új fordításában, **Paul Davies** bevezetőjével. Majd 2004-ben *Hat majdnem könnyű előadás* címmel, **Rogers Penrose** bevezetésével, az Akkord kiadónál a 11., 15., 16., 17. és az 52. fejezet jelent meg az eredeti fordításokban, egyetlen új fejezettel, amelyet *Görbült tér* címen **Gajzágó Éva** fordított le.

Ma már az interneten is elérhető a teljes sorozat – kérdés, hogy volt-e rá engedélye annak, aki feltette...



Ralph Leightonnal, életrajzírójával „légdobolnak”. Valódi dobolásuk megtekinthető a <https://youtube.com/watch?v=HKTSaezB4p8> helyen.

Itt érdemes szólnunk *Ralph Leighton*ról, R. B. Leighton 1949-ben született fiáról is, akinek rendkívül nagy szerepe volt abban, hogy az 1980-as években megszülettek Feynman „önéletrajzi” írásai. Az egyik még Feynman életében, 1985-ben, a másik csak halála után, 1988-ban, mindkettő a Norton kiadónál. Az elsőben, melynek címe *Surely You're Joking, Mr. Feynman!* Ralph Leighton időrendi sorrendbe téve foglalta írásba azokat a sztorikat, amelyeket Feynman mesélt el neki – egy-egy közös dobolás során... Ez a könyv *Tréfál, Feynman úr?* címen került a hazai olvasók kezébe 2001-ben, *ifj. Vitray Tamás* fordításában, a Park Könyvkiadó gondozásában, *Seres Iván* szerkesztésében. Ott szerénykedik a címlapon a kötet alcíme: „Egy mindenre kíváncsi pasas kalandjai – ahogy Ralph Leighton lejegyezte...”

Ki volt hát Richard Feynman, a Nobel-díjas fizikus, a sikeres egyetemi előadó, matematikai és nyelvtelenség, a maja írásjelek megfejtője, titkos páncélszekrények sikeres feltörője, a bongó-dobolás elkötelezett művésze, aki már idős korában fejlesztette tökélyre rajz tehetségét? Tekintsük át élete első ötvenhárom évének érdekesebb eseményeit. (Azért éppen ötvenhármát, mert 54 éves volt Feynman, amikor személyesen ellátogatott Magyarországra, s erről a harmadik, befejező részben lesz szó.) Minden fejezet elején egy-egy mondat szerepel e könyvből.

Az első ötvenhárom év

Far Rockaway

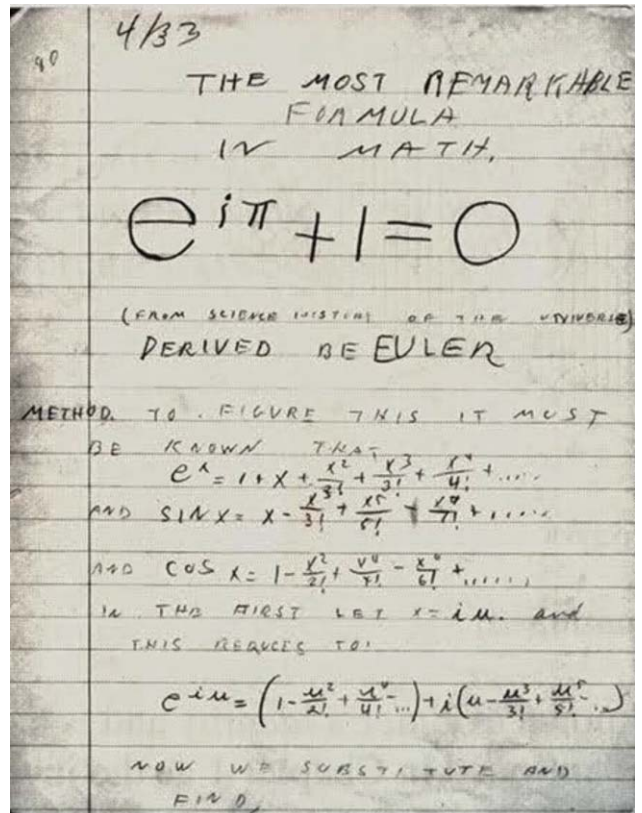
„Még kislány vagy, hogyhogy értesz a rádiókhoz?”¹

Feynman, szüleinek első gyermekeként New Yorkban, Manhattan egyik kórházában látta meg a napvilágot. Hat éves volt, amikor fiútestvére született, aki azonban hamarosan meghalt. Kilenc éves korában született lánytestvére, *Joan*, aki felnőve maga is asztrofizikus lett, a napszél kutatója. A szülők Európából jött zsidó bevándorlók gyermekei voltak. Az apa, *Mel-*

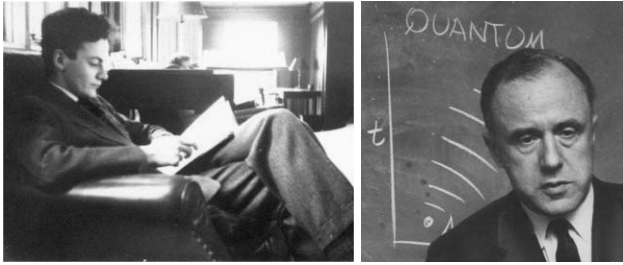
ville Feynman öt éves korában Minszkből érkezett szüleiével az Egyesült Államokba, édesanyja, *Lucille Phillips* pedig már Amerikában született, az ő szülei az akkor még a cári Oroszországhoz tartozó lengyel területekről jöttek. (Richard P. Feynman nevében a P betű utal édesanyja vezetéknevére.) Mindkét család eredetileg Litvániából származott.

Égész gyerekkorát New York délkeleti részén húzódó szigeten, Long Islanden élte le, egy Far Rockaway nevű kis településen. Itt járt középiskolába, s egész életében Long Island-i akcentussal beszélt. Az iskolában nem volt kitűnő tanuló, különösen a nyelvtannal gyűlt meg a baja. Matematikából azonban sokkal többet tudott, mint az osztálytársai: önállóan vásárolt könyvekből sajátította el még a felsőbb matematikát, a differenciál- és integrálszámítás technikáját is. Saját jelölésrendszert vezetett be, amellyel csak akkor hagyott fel, amikor rájött, hogy így nem tudja másokkal megértetni saját gondolatait, számításait. Szülei okosan nevelték: büszkéek voltak fiúk sikereire és nem hibáztatták feleslegesen az iskolai kudarcokért. Édesapja megvette az *Encyclopaedia Britannicát*, amely kedves olvasmányává vált. Apa a fiát hosszú sétákra vitte a természetbe, ahol a gyerek figyelmét a legkülönbözőbb jelenségek felé terelte. Feynman egész életére kiható tapasztalat lett, élethivatásává vált a természet megfigyelése, titkainak kifürkészése. Otthon sajtó kémiai-fizikai labort rendezett be, megtanult és megszeretett kísérletezni, imádozott rádiót szerelni, amellyel azután némi pénzt is tudott keresni.

Egy oldal a 12 éves Dick Feynman noteszából.



¹ Ralph Leighton: *Tréfál, Feynman úr?* Park Könyvkiadó, Budapest (2001) 14. old.



A PhD-hallgató Feynman és témavezetője, John Wheeler.

Massachusetts Institute of Technology (MIT),
majd Princeton University

„Feynman, maga még fiatal, szüksége van rá,
hogy előadói rutint szerezzen!”²

New York leghíresebb egyetemére, a Columbia Egyetemre nem vették fel, felvételijének bölcsész része nem sikerült valami jól. Apja javaslatára ekkor Bostonba jelentkezett az MIT-re, ahová azután matematika szakra simán felvették. Bár évfolyamelső volt matematikából, ez mégse elégítette ki, gyakorlatibb képzésre vágyott. Átment villamosmérnöki szakra, de ez meg túlságosan kötött volt számára, ezért átiratkozott fizikára, ahol végre jól érezte magát. Már első évesként felsőbb éveseknek szánt elméleti fizikai tárgyakat vett fel, és gyors felfogásával, ragyogó ötleteivel kivívta tanárai elismerését. Itt szeretett volna doktorálni is, de ezt oktatói nem pártolták. Helyette rábeszéltek, hogy Princetonba jelentkezzen PhD-tanulmányokra. Itt is volt felvételi, újra gond volt a bölcsész tantárgyakkal, de végül felvették.

John Wheeler lett a témavezetője, igazi elméleti fizikus, akitől a „black hole”, magyarul „fekete lyuk” elnevezés is származik. 1939-et írtunk, fekete évek elé nézett a világ, de ebből akkor még Princetonban nem sok érződött. A Feynmannál csak hét évvel idősebb Wheeler abba is beleegyezett, hogy doktori témája az elektron elektrodinamikai kvantumelmélete legyen, amelyen Feynman már Massachusettsben elkezdett gondolkodni. Mikor itt elkészült a klasszikus fizikai levezetéssel, Wheeler rábeszélte, hogy előadást tartson erről az intézeti szemináriumon. A szeminárium programját Wigner Jenő állította össze, s Feynman

Első feleségével, a fiatalon elhunyt Arline Greenbaummal.



előadására meghívta Neumann Jánost, Paulit és Einsteint is. Feynman reszkető térdekkkel előre teleírta a táblát képletekkel, de ahogyan az várható is volt, Pauli kifogásokat emelt az elhangzottak ellen. Feynman egész életén át borzongva emlékezett vissza erre a szemináriumra, ahol azért – Wheelerrel együtt – mégis csak sikerült megmenteni a helyzetet.

Később, miközben még a doktoriján dolgozott Princetonban, egyszer bejött hozzá a Berkeley-ből érkezett Robert Wilson, hogy rábeszélje, vegyen részt egy titkos kutatásban, amelynek célja az urán kétféle izotópjára szétválasztására szolgáló új módszer kifejlesztése. Itt találkozott Feynman először a Manhattantervvel, s néhány órai habozás után vállalta is a részvételt a kutatásban. De előbb még kivett hat hét szabadságot és elkészítette doktoriját *A legkisebb hatás elve a kvantummechanikában* címmel. Miután pedig megszerezte a PhD-t, úgy érezte, végre megnősülhet, elveheti feleségül diákkori szerelmét, évek óta menyasszonyát, Arline Greenbaumot. Sajnos, a lány ekkor már súlyos tüdőbeteg volt, ezért Feynman családja ellenezte ezt a házasságot. 1942. június 29-én titokban házasodtak össze úgy, hogy Feynman egy kórházból hozta ki Arline-t az esküvőre.

Los Alamos

„Tudja, az embernek nem kell felelősséget vállalnia a világerért, amelyben él.”³

1943-ban Robert Oppenheimer Feynmant is megkereste Princetonban azzal, hogy az itteni titkos Manhattanbizottság többi tagjával együtt költözzön át a most épülő atomvárosba, Los Alamosba, ahol el fogják készíteni a világ első atombombáját. Megígérte Feynmannak, hogy tüdőbeteg feleségét Új Mexikó fővárosának kórházában helyezze el, és ott hetente meglátogathatja, hiszen Los Alamosban – természetesen – nem épül kórház. A fiatal házaspár annak ellenére belement ebbe a megoldásba, hogy Los Alamos és a kórház több mint száz kilométerre volt egymástól.

Richard Feynman nagy szerencséjére Los Alamosban Hans Bethe lett a Teller Edét is foglalkoztató elméleti fizikai osztály vezetője. Bethe rendkívüli számolási képessége rokon volt az övével, másrészt kiegyensúlyozott, barátságos természete megnyugtató háttérrel biztosított számára. Hamarosan őszinte, baráti kapcsolat alakult ki kettőjük között. Négy segéderőt is kapott a munkájához, amely olykor kifejezetten matematikai jellegű volt. Hozzá volt beosztva a fiatal Kemény János, a Basic nyelv későbbi megalkotója és Nicolas Metropolis, a Maniac számítógép későbbi mestere, de közeli munkakapcsolatban állt Neumann Jánossal is, akitől az a mondat származik, amelyet fent idéztünk, s amellyel Neumann megnyugtatta Feynman lázongó lelkiismeretét. „Nekem mindig nagy élmény volt, amikor vasárnaponként Neumann, Bethe, Bob Bacher és jómagam kimen-

² I. m., 71. old.

³ I. m., 125. old.



Bohr, Oppenheimer, Feynman és Fermi Los Alamosban.

tünk járni egyet a kanyonokhoz” – mesélte később Ralph Leightonnak. *Robert Bacher* kezdetben a kísérleti fizikai osztályt vezette Los Alamosban, majd 1944-ben már kifejezetten a bomba építésére szakosodott csapatot irányította. Később is fontos szerepet játszott Feynman életében.

1945. június 16-án Arline meghalt a kórházban. Feynman ott volt mellette, *Klaus Fuchs* autóját kölcsönkérve, több defekt után ért oda az utolsó pillanatban. Bethe ezután hazaküldte őt pihenni a szüleihez. Egy hónappal később volt a Trinity-teszt, erre Feynman visszatért Los Alamosba. Ez volt az első kísérleti atomrobbantás, amelynek helyétől harminc kilométerre várták a fizikusok a robbantás eredményét. Mindenki fekete szemüveget kapott, azon keresztül nézhatték az eseményt. Feynman nem vette fel ezt a szemüveget, beült inkább egy tehergépkocsiba, s ennek a szélvédőjén át, hite szerint védve az UV-sugárzástól, figyelte a távoli tűzgolyót. A lökéshullám negyven másodperc alatt ért el hozzájuk. A robbanás erősségét *Fermi* abból becsülte meg, hogy mennyire repültek el tőlük a szél által felkapott papírlapok.

A Trinity-teszt után nem telt el egy hónap, jött Hiroshima és jött Nagaszaki. Ezekben a napokban találkozott össze Feynman Bob Wilsonnal, aki Princetonban beszervezte őt a Manhattan-terv szerinti titkos kutatásokba. Miközben Los Alamosban az emberek boldog izgalom lett úrrá, Bob búsan üldögélt és csak meredt maga elé. „Szörnyű dolgot műveltünk!” –

Neumann, Feynman és Ulam tárgyalnak Los Alamosban.



mondta. Bob Wilson volt az egyetlen, aki még akkor, abban a percben is arra gondolt: „Úristen, mi lesz ebből?” emlékezett vissza negyven év után a döbbenetes felismerésre Feynman, miközben Ralph Leightonnak mesélt saját emlékeiről.

Ithaca: Cornell University,
azután Brazília, majd Japán...

„Hiszen tudják: nekem mindent meg kell értenem, amit a világban tapasztalok...”⁴

Ithaca egy kisváros New York államban, New Yorktól mintegy 300 kilométerre. Innen már csak 200 kilométerre van Buffalo városa, nem messze a Niagara víz-eséstől. Feynman mindkét helyen megfordult a háború után, bár 1945 előtt még egyszer se járt arrafelé. Ithacába Hans Bethe hívta, aki 1937-től kezdve volt itt fizikaprofesszor a jó hírű Cornell Egyetemen. Feynman több helyre is hívták, többek között Berkeley-be és Chicagóba is, de ő Bethe meghívását fogadta el. Princeton és Los Alamos után itt nem kutatnia, hanem előadnia kellett a fizikát, s ez újabb kihívást jelentett számára. *Matematikai módszerek a fizikában* címmel tartott előadást a Cornellen, s hetente egyszer átrepült Buffalóba, fizikát előadni ottani kutatók számára. Egyedüli ismerőse Bethe volt, így az egyetemi hallgatók között – Buffalóban pedig az előadást követően –, különböző szórakozóhelyeken igyekezett újabb ismerősökre szert tenni. Fiatal volta, jó megjelenése megkönnyítette az ismerkedést, de belül szorongott, nem volt megelégedve sem a körülményekkel, sem saját-magával. Feleségének elvesztése után egy évvel Dick apja váratlanul agyvérzést kapott és meghalt. Hiányoztak a szakmai sikerek is, amelyek addigi életét végigkísérték. 1949-ben kiderült, hogy a Szovjetunióknak is sikerült atombombát előállítania és felrobbantania.

Depressziós lett, félt a jövőtől, fázott a jelenben. A szó szoros értelmében fázott, szeretett volna délebbre, melegebb éghajlatra kerülni. Közlekedett Cornellen a hetedik éve, a „sabbatical year”, amelyet az amerikai törvények szerint kutatási szabadságon tölthet az egyetemi oktató. Kapóra jött a brazil fizikaprofesszor, *Jaime Tiomno* meghívása, aki *David Bohmot* is hívta Rio de Janeiróba az egyetemre, ezért portugálul kezdett tanulni, s nemsokára már előadóképes volt ezen a nyelven is...

Először csak néhány hetet, azután pedig már egy teljes oktatási évet töltött Rio de Janeiróban. Igaz, formálisan ekkor már nem a Cornell, hanem a Caltech oktatója volt. Ide Bob Bacher csábította át, aki az itteni fizikatanszék vezetője lett Los Alamos után, és aki elhatározta, hogy tanszékére a legjobb fizikusokat fogja összegyűjteni. Még azt is el tudta intézni, hogy Feynman első kaliforniai tanítási évét Brazíliában töltsse... Feynman pedig élt a lehetőséggel, és a legkülönbözőbb területeken próbálta ki magát Brazíliában. Részt vett a tanárképzésben, a mérnökképzésben, még a szóbeli felvételi vizsgára is bekéredzkedett.

⁴ I. m., 226. old.



Gell-Mann-nal a Caltechen, 1959-ben.

Elég negatív benyomásokat szerzett a brazil felsőoktatási rendszerről, véleményét nem is rejtette véka alá. Közben kutatott is: talált egy brazil rádióamatort, akinek segítségével állandó kapcsolatot létesített a kaliforniai intézettel, s megvitatta velük a könnyű atommagok energiaszintjeire kidolgozott elképzeléseit. Legmerészebb vállalkozása az volt, hogy bongó dobosként beállt egy helyi zenekarba, akikkel azután felvonult a riói karneválon...

Japánba először John Wheeler javaslatára ment el, egy ottani nemzetközi elméleti fizikai konferenciára. Természetesen itt is anyanyelvükön szeretett volna beszélni az emberekkel, ezért már Brazíliában elkezdett japánul tanulni. A kongresszuson a szuperfolyékony héliumról tartott előadást, vázolva *Landau* gondolatmenetének kvantumfizikai megalapozására felállított elméletét. Ott volt *Lars Onsager* norvég professzor is, aki a termodinamikai keresztteffektusokra érvényes, a mikroszkopikus reverzibilitást kimondó elve nyomán széles körben elismert szakember volt ezen a szakterületen, és elismerően nyilatkozott Feynman elméletéről. Ez bizony nagyon jól esett neki.

Hideki Yukawával Kiotóban, 1954 nyarán. Bal oldalt Minoru Kobayasi, Feynmantól jobbra Satio Hayakawa, majd Yukawa felesége.



A későbbi években még sok egyetemre ellátogatott Japánban, 1952-től kezdve második feleségével, *Mary Louval* együtt. Ez a házassága azonban nem sikerült, elég sokat veszekedtek és két év múlva már különmentek. Hogy, hogy nem, a japán nyelv tanulását is abbahagyta Feynman.

California Institute of Technology (Caltech)

„Nem törődöm vele, mit mondanak a »szakértők«: mindig mindent kiszámolok saját magam.”⁵

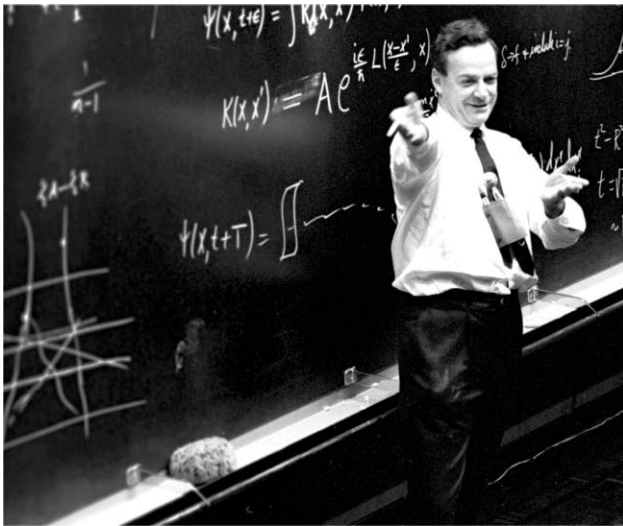
1954-ben Richard Feynman az Albert Einsteinről elnevezett arany medált, egy jelentős pénzüsszeggel járó elméleti fizikai díjat kapott. 1954 előtt ezt a díjat még csak 1951-ben osztották ki, akkor *Kurt Gödel* és *Julian Schwinger* kapta meg. A következő kitüntetett pedig Teller Ede lett 1958-ban, amikor már Einstein nem élt. Magyar származású fizikus még egyszer kapta meg: Wigner Jenő 1972-ben. Feynman számára nagyon jól jött ez a díj, különösen az után, hogy a vele egyidős Schwinger, titkos vetélytársa, már 33 éves korában megkapta az Einstein-medált. (Attól kezdve vetélkedtek egymással, hogy Schwingert felvették a Columbia Egyetemre, Feynmant pedig nem.)

1955-től kezdve még egy nagyszerű fizikust sikerült Robert Bachernek igazolnia tanszékeire a Caltechen: *Murray Gell-Mann* 11 évvel volt fiatalabb Feynmannál. Tanszéki szobájuk ugyanazon a folyosón volt, kiváló alkalmat kínálva az együttműködésre. Azonban mindketten jobban szerettek egyedül dolgozni, miközben kellő nagybecsüléssel nyilatkoztak egymásról és közös példaképeikről, Enrico Fermiről. Végül mégis közösen láttak neki a gyenge kölcsönhatás újraértelmezésének, és közösen publikálták az elért eredményeket.

A megfeszített szellemi munka persze nem tett jót Feynman második házasságának. Mary Lou a válóperben is felhánytorgatta, hogy Dick folyton csak számol valamit, attól kezdve, hogy reggel felébred, egészen az esti lefekvésig. 1958. májusban mondták ki a válást, és a 40 éves Feynman szeptemberben már Genfben – miközben elvileg az „Atomok a békéért” konferencián vett részt – a strandon megismerkedett egy 24 éves angol lánnyal, aki havi 25 dollárért mindenestül volt egy svájci családnál. Feynman heti 20 dollárt ajánlott, ha eljön hozzá Kaliforniába, vele lakó házi segítségnek. A lány – *Gweneth Howarth* – eljött, majd ő lett Feynman harmadik, egyben utolsó felesége. 1960-ban volt az esküvőjük Pasadenában. 1962-ben született meg kisfiúuk, *Carl*, 1968-ban pedig adoptáltak egy kislányt, *Michelle*-t. Ők ketten a megmondható, milyen kiváló családapa vált Feynmanból. Ifjú házasként és boldog családapaként tartotta meg azt a négy féléves előadás-sorozatot a Caltechen, amelyről e cikk első részében volt szó.

1964-ben visszahívták a Cornellre egy négy alkalomból álló, magas szintű ismeretterjesztő előadásorozatra, amelyről BBC-film készült és amelyből könyvet is kiadtak. Húsz év múlva, 1984-ben jelent meg ez a könyv magyarul, *A fizikai törvények jellege* címmel,

⁵ I. m., 251. old.



Feynman tanít, a világ egyik legjobb előadójára Bill Gates angolul emlékezik. (<https://www.youtube.com/watch?v=W0oJh6oYAXE>)

Gajzágó Éva fordításában, a Magvető Kiadó *Gyorsuló idő* sorozatában. 2005-ben újra kiadta a könyvet az Akkord Kiadó, szebb kiállításban, *Oláh Vera* szerkesztésében. Ma már ez a könyv sajnos antikváriumokban is alig kapható, esetleg könyvtárakban érhető el.

1965-ben Richard P. Feynman, Julian S. Schwinger és *Sin-Itiro Tomonaga* együtt kaptak fizikai Nobel-díjat „kvantum-elektrodinamikai munkásságukért”. Ők hárman egymástól függetlenül dolgoztak a *Dirac*, majd Fermi által kifejlesztett kvantum-elektrodinamika új matematikai formalizmusán. Közös céljuk volt magyarázatot találni a hidrogénatom finomszerkezetében az energiaszinteknek *Lamb* által kísérletileg megfigyelt eltolódására, továbbá lehetőség szerint megszüntetni az elméletben fellépő divergens integrálokat. Hárman háromféle eljárást fejlesztettek ki, ráadásul Tomonaga, aki 1939-ben Heisenbergnél doktorált Lipcsében, már a háború alatt, 1943-ban publikálta dolgozatát Japánban, teljesen elszigetelve a világ tudományos közéletétől. Feynman és Schwinger eljárásának ekvivalenciáját *Freeman Dyson* mutatta meg. Ő is megérdemelte volna a Nobel-díjat, de hát *Alfred Nobel* végrendelete szerint egyszerre, ugyanazért legfeljebb három tudóst lehet díjazni.

Apa dobol a fiával...



Dirac és Feynman Varsóban, 1968-ban.

Feynman Dirac-kal 1968-ban Varsóban találkozott egy fizikuskonferencián. Beszélgetésükről a konferencia szünetében készült fénykép szerencsés módon, hűen tükrözi személyiségük eltérő vonásait.

A magyarországi látogatás

1972-ben az ifjúságot érintő legemlékezetesebb esemény Magyarországon is a müncheni olimpia volt, benne a túszedrázával, itthon pedig a táncdalfesztivál, benne *Cserbáti Zsuzsával*, valamint az az oktatáspolitikai párthatározat, amelynek nyomán ösztől kezdve minden tantárgyban általános tananyagcsökkentést kellett végrehajtani. Tantárgyi bizottságokat hoztak létre, ők döntöttek, hogy mely sorokat vagy oldalakat

Gweneth és Richard a Nobel-díj átvétele utáni ünnepeken.





Az 1972-es neutrínókonferencia résztvevői. Ülnek (balról): T. D. Lee, Radicati, Feynman, Pontecorvo, Marx, Weisskopf, Reines, Cowan és Budini.

kell kihúzni a forgalomban lévő tankönyvekből. Fizikából a bizottság vezetésével *Sas Elemért* bízták meg, akit mindenki jól ismert a tv-ből...

Fel se tűnt, hogy az oktatáspolitikai párthatározat megszületésével azonos időben Magyarországra látogatott egy Nobel-díjas tudós, aki előadást tartott Budapesten, fizika szakos egyetemi hallgatók számára a kvarkokról, sőt, ellátogatott Debrecenbe is, ahol az ATOMKI vendége volt. De még annak se volt visszhangja a sajtóban, rádióban, tv-ben, hogy ez a tudós előtte Balatonfüreden részt vett egy nemzetközi konferencián, amelyet egy Kossuth-díjas magyar tudós szervezett a neutrínó kutatásról. Miért is lett volna? Sokkal kevesebbet érintett ez a téma az országban, sokkal kevesebben figyeltek volna oda rá. Most mégis itt, a *Fizikai Szemlében* érdemes lesz róla megemlékezni.

1970-ben *János Lajos* lemondott az Atomfizika tanszék vezetéséről, inkább a KFKI igazgatótanácsi tagságát vállalta. Helyette Marx György vehette át a tanszék irányítását, aki addig az Elméleti fizikai tanszéken volt tanár. Marx György számára jól kezdődött ez az évtized: 1970-ben lett tanszékvezető és ekkor választották a Magyar Tudományos Akadémia levelező tagjává. 1971-ben tartotta meg székfoglaló előadását a leptontöltés megmaradásáról. 1972-ben az Eötvös Loránd Fizikai Társulat főtitkára lett. Főtitkárként, tanszékvezetőként, akadémikusként már bele mert fogni egy olyan tudományos konferencia szervezésébe, amellyel követendő példát szolgáltatott a fizikusok nemzetközi közössége számára. Ő maga 1965-ben járt először az Egyesült Államokban, és most meg tudta hívni ide azokat a híres amerikai fizikusokat, akiket ott ismert meg, akik a kitűzött téma, a neutrínó fizika vezető kutatói voltak. Emellett lehetőséget adott egy sor fiatal hazai fizikusnak, hogy kapcsolatokat létesíthessenek a világ legjobb laboratóriumaiban dolgozó kollégáikkal.

18 külföldi ország 93 kutatója vett részt az egy héttig tartó konferencián, mellettük 45 magyar. Java részt férfiak, csak egy-két hölgy volt köztük, például Gajzágó Éva, *Szűcs Judit*, *Nyíri Júlia*. Az Egyesült Államokból 12-en jöttek el, köztük a Nobel-díjas Richard Feynman. Volt még egy Nobel-díjas fizikus: *T. D. Lee*, a paritásértés egyik felfedezője. A többi tíz amerikai tudós közül hárman kaptak azóta Nobel-díjat: *Frederic Reines* 1995-ben, *Raymond Davies* 2002-ben, *Barry Clark Barish* pedig tavaly, 2017-ben! De itt volt Amerikából *Victor F. Weisskopf* is, aki nemcsak elismert, jó fizikus, de a kelet-nyugati tudományos kapcsolatok őszinte híve és szorgalmazója volt. Nem akármilyen névsor, dicséri a válogató ízlését, jövőbe látását. A Szovjetunióból 15-en vetek részt, köztük *A. Filippov* és *S. S. Gershtein*, de a legnagyobb név *Bruno Pontecorvo* volt, aki akkor már hosszú ideje Dubnában élt és kutatott.

A konferencián készült csoportképen elől, középen ül Marx György, mellette Pontecorvo, azután Feynman következik, a sor szélén ül T. D. Lee. Marxtól jobbra láthatjuk Weisskopft, Reines, *Cowan*, mögöttük egymás mellett áll *Horváth Zalán* és Györgyi Géza, a másik oldalon pedig Feynman és Pontecorvo feje közül Gajzágó Éva mosolyog ki a képből. Sajnos nagyon rossz a kép felbontása, nem könnyű az arcképet felismerni.

A konferencia nyelve angol volt, angolul hangzottak el az előadások és a kérdések, hozzászólások is. A kétkötetes *Proceedingset* Marx György és *Frenkel Andor* állította össze.

Néhány cím a mintegy negyven előadás közül (magyarra fordítva):

R. Feynman: Amit a neutrínók mondhatnak el a partonokról;

Marx Gy.: Leptontöltés-megmaradás;

Vatai E.: Bétabomlás-kísérletek;

Kuti Gy.: Mélyen rugalmatlan lepton-nukleon szórási; Horváth Z., *Pócsik Gy.*: Analitikus renormalizáció és elektron-antineutrínó szórási;

Kunszt Z.: Atmoszferikus neutrínók által gerjesztett müonfluxus és neutrínó-nukleon kölcsönhatás nagy energián.

Néhány fiatal fizikus, akik segítettek a szervezőknek a konferencia zavartalan lebonyolításában: *Gálfi László, Gnädig Péter, Hasenfratz Péter, Patkós András, Sebestyén Ákos, Sükösd Csaba, Szalay A. Sándor.*

Nagyon valószínű, hogy Dick jól érezte magát ezen a konferencián. „Pihenésként egy nehéz nap éjszakáján négy óra hosszát dobolt lazításként a szerző balatoni verandaasztalán” – emlékezett vissza Marx György a *Fizikai Szemlében*. Június 17-én ért véget Balatonfüreden a konferencia és 21-én Feynman már Budapesten tartott előadást az ELTE fizikushallgatói számára. Az előadást magnóval felvették, ennek alapján készült el Gajzágó Éva fordítása és jelent meg az előadás szövege a *Fizikai Szemle* 1973. januári számában.

Legközelebb 1980-ban jelent meg ugyanitt egy Feynmannal készült amerikai riport, szintén Gajzágó Éva fordításában, majd 1988-ban, Feynman halálakor *Kunfalvi Rezső* tollából két fordítás: *A tudomány ballasztja* és *Egy kívülálló képe a Challenger-katasztrófáról*. Ez volt Feynman utolsó nagy tette: a Challenger-katasztrófa rejtélyes okának felderítése.

Ugyancsak Feynman halálának évében jelent meg Ralf Leighton már említett másik könyve Amerikában, ennek a címe: *What Do You Care What Other People Think?* Magyarul is megjelent, csak húsz évvel később, a Park Kiadónál, *Révbíró Tamás* fordításában, *Both Előd* szakmai kontrollja mellett. A könyvben Feynman részletesen eleveníti fel Arline-nel kapcsolatos emlékeit, ez adta a könyv címét, mely magyarul

így hangzik: *Mit érdekel a mások véleménye?* Ugyanis Arline ezt szerette mondogatni szerelmének, Dicknek, hogy megerősítse egy-egy saját döntésében.

Az eddig említetteken kívül is jelentek meg magyarul könyvek Feynmantól – és Feynmanról. E kötetekben is megjelenik „Feynman Magyarországon”, itt csak felsorolásszerűen említjük meg ezeket. Feynman-válogatások: *A dolgok értelme* 2001, és *A felfedezés öröme* 2002. Mindkettő az Akkord kiadásában, Ill Márton fordításában, *Abonyi Iván* lektorálásával. *QED; A megszüllárdult fény* 2003, Scholar Kiadó, *Alföldi Bálint* fordítása, *Érsek Nándor* szerkesztése.

Két könyv Feynmanról: Leonard Mlodinov: *Feynman szivárványa, Szépség a fizikában és az életben* 2003, Park Kiadó, *Seres Iván* fordítása (itt ki kell emelni a magyar kiadó gyorsaságát, az eredeti angol kiadás csupán egy évvel korábban jelent meg). Lawrence M. Krauss: *Kvantumember. Richard Feynman tudományos munkássága* 2017 (!), HVG Kiadó, *Bojtár Péter* fordítása (sok fizikai gondolat, képletek nélkül).

És végül ide kívánczok a Feynmanról Amerikában megjelent kiváló életrajz, amelyet sajnos (még?) nem fordítottak le magyarra: James Gleick: *GENIUS. The Life and Science of Richard Feynman* 1992, Vintage Books, a Division of Random House, New York.

Zárjuk ezt a megemlékezést Marx György szavai- val, amellyel Richard Feynmantól búcsúzott 1988-ban:

„A fizika élő legendája távozott el közülünk. Határozottan különbözni kívánó személyisége, új utakat nyitó kreativitása, csillogó előadókészsége (talán jogosan is) kialakította kortársaiban azt a meggyőződést, hogy ő korunk legokosabb embere. Nobel-díjas és szupersztár volt egy személyben, aki még a kvantummechanika alapjaihoz is tudott minőségileg újat mondani a 20. század második felében.”

FEYNMAN-ELŐADÁSOK FIZIKÁBÓL – Előszó az új magyar kiadáshoz¹

Két kérdésre illenék hatásosan válaszolnunk. Az első: érdemes-e egyáltalán korunkban a fizika egészét átfogó tankönyvi bevezetést kínálni a felsőfokú tanulmányokat kezdő mérnök-, orvostan- vagy természettudományi hallgatóknak? Igenlő válasznál jön a második: Miért éppen a „FEYNMAN”-t ajánljuk?

Erős érv a monografikus terjedelmű tankönyvsorozatok ellen a tudományos ismeretek terjedelmének fokozódó ütemű növekedése. Ha az elmúlt 500 év fizikájának egészét modern felfogásban bemutató könyvsorozat elkészítésének és kiadásának munkáját tekintjük, fel kell ismerni, hogy a megírás folyamata

alatt az ismeretanyag szinte megjósolhatatlan mértékben és irányban bővül. A tankönyvíró számára reménytelen versenyfutást jelentette meg az a hallgató,



¹ Feynman, Richard P. – Leighton, Robert B. – Sands, Matthew: *A Feynman-előadások fizikából I.*, Typotex Kiadó, 2018, ISBN-13 978-963-2799-79-7

aki egyetemi előadásomat okos telefonján követtem: „az Univerzum életkora nem 13,7 milliárd, hanem 13,82 milliárd év”. A gyorsan változó hangsúlyok és tartalmak a kiadókat is inkább az előadásjegyzetek (lecture notes) gyorsan cserélhető írásos változatainak kiadására ösztönzik a nagy klasszikus tankönyvsorozatok helyett.

Jelen sorozatról biztosan állítható, hogy a nem avuló klasszikusok közé tartozik. A négy évtizeddel korábbi első magyar kiadás szövegének kritikai javítása utáni, a 2010-es amerikai utolsó variánst követő újabb kiadását, a tanulmányaikat kezdőknek óvatosság nélkül ajánljuk figyelmébe.

A tartós érdeklődés fennmaradásának titka *Richard P. Feynman* egyéni tudományfelfogásában rejlik. Számára a fizika nem pusztán saját tárgykörére, hanem minden természeti jelenség vizsgálatára, sőt a társadalmi kihívások univerzális megközelítésére is módszert kínál. Így aztán nem csábítja a fizikán belüli tematikus teljességre törekvés. Minden jelenségekben a legegyszerűbb (néha az előadás céljaira kitalált) kísérletekre alapozva építi ki a legalkalmasabb fogalmakat, majd olyan jelenségeknek és módszereknek a megbeszélésére koncentrálnak, amelyek a fizikán túl is visszaköszönek. Nem sajnálja az időt, részletesen kifejti például a rezonancia jelenségének széles természeti jelenségekben megtalálható felbukkanását.

Gondosan részletezett, apró lépésekben mutatja a kezdő olvasónak, hogyan juthat egyre közelebb a harmonikus rezgés vagy a bolygómozgás teljes kvantitatív jellemzéséig. Az eredmény megfogalmazása nála nem a téma lezárásának pillanata, hanem a részletes újraelemzésé, ahol a matematikai képleteket lehetőleg mellőzve keresi a legáttekinthetőbb kifejtést az eredmény távlatot nyitó értelmezésére.

Természetesen Feynman a természet ismeretének korabeli szintjén érvel, amikor az akkor legkorszerűbb eredményekért és azokban a fizika szerepéért lelkesedik. Nem tudhat, például, a DNS-szerkezet felderítésében azóta elért óriási előrelépésről, vagy (hogy visszatérjek az Univerzum kozmikus életkorának fentebb már anekdotikusan említett kérdésére) az elmúlt 25 év kozmológiai jelentőségű csillagászati felfedezéseiről. A részecskefizika éppen a Caltech-előadások időszakában jutott el a véges élettartamú rezonanciák részecskekkel történő azonosításában a kvarkhipotézis kimondásáig. Ma a kvarkok léte kétségbevonhatatlan tény, sőt az atommagok szerkezetét meghatározó erő-

hatásoknak a kvarkok közötti fundamentális erőhatásokra való visszavezetésében is jelentős előrelépést tehetett a tudomány a szuperszámítógépes úgynevezett szimulációs megoldási módszer segítségével. Így aztán, amikor Feynman a bolygómozgás numerikus integrálásának időigényét a korabeli számítógépek aritmetikai műveleti sebessége alapján becsüli meg, a kezdő olvasó is elmosolyodik.

Egyet azonban ne felejtünk! Fél évszázad minden tudományos előrelépése összhangban van Richard Feynmannak a tudomány hatóköre állandó kiterjedésedését az 1960-as években lelkesen hirdető, a természetet kívül/felül álló bármilyen hatás feltételezésének szükségtelenségét valló felfogásával.

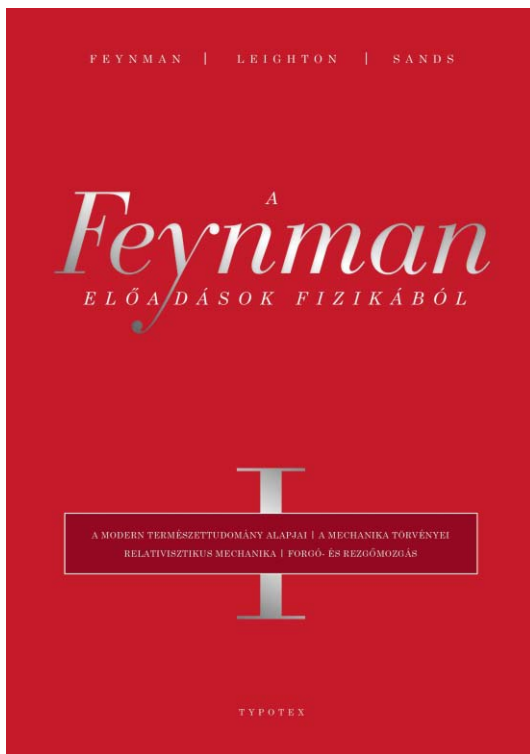
Az előadásoknak még egy fontos sajátosságára érdemes felhívnom az olvasók figyelmét. Az előadó a vektor- és a differenciálszámítás elemeitől a differenciálegyenletek numerikus megoldási algoritmusainak gyakorlatias részletezéséig helyben megtanította az aktuálisan szükséges matematikai segédeszközöket. Nem követelt speciális előismereteket az Egyesült Államok 10 legjobb egyeteme között számotartott Caltechre frissen felvett hallgatóktól, nem hivatkozott párhuzamos algebrai vagy kalkulus-előadásokra. Valószínűleg ugyanazzal az élvezettel magyarázta a matematikai alaptechnikákat a diákoknak, amivel egykor Los Alamosban szervezett csapatokat a Bom-

ba működési elvét ellenőrző számítások elvégzésére a fizikusok családtagjaiból. Ez az önmagát teljes mértékben tartalmazó előadási mód megmaradt a tankönyvi változatban is.

Aki hallgathatta Richard Feynman bongó-játékát 1972-ben a balatonfüredi Marx-villa kertjében, majd 1986-ban találkozott Wangerooge szigetének homokdűnéi között a széllel és előrehaladó súlyos betegségével küszködő idős tudóssal, előadásait olvasva az ő élő hangját véli hallani. Hallja a gondolatok bűvészetét, aki hihetetlenül egyszerű megfontolásokkal hirtelen elővarázsolja a fizika nagy jelentőségű törvényeit, miközben kicsit gúnyos hanglejtésével szinte provokál: „Ezt csináljátok utánam!”

Fogadják el a kihívást és tanulják el a 2018-ban százéves Feynmantól a természettörvények feltárássá „pofonegyszerű” technikáját! A távolságskála alján és tetején még bőven rejtőzködnek törvények, amelyek feltárássában a „FEYNMAN”-ból ellesett bűvörőnek hasznát vehetik!

Patkós András



MIÉRT KELL POLARIZÁCIÓÉRZÉKELÉS A GAZDAÁLLAT-KERESÉSHEZ?

A bögyök – vizuális környezetük sötét foltjai közül – polarizáció segítségével választják ki a napsütötte sötét gazdaállatokat

Szörényi Tamás, Pereszlényi Ádám, Horváth Gábor – ELTE, Biológiai Fizika Tanszék

Barta András – Estrato Kutató és Fejlesztő Kft., Budapest

Gerics Balázs – Állatorvostudományi Egyetem, Anatómiai és Szövetani Tanszék

Hegedüs Ramón – Eberhard Karls Egyetem, Kognitív Neurotudományok Tanszék, Tübingen, Németország

Susanne Åkesson – Lundi Egyetem, Biológia Tanszék, Lund, Svédország

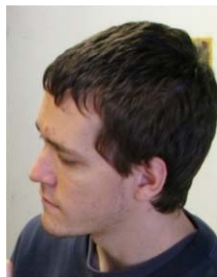
A vérszívó bögyök polarotaktikus rovarok, vagyis vonzódnak a lineárisan polarizált fényhez [1]. A hím és nőstény bögyök a vízfelszín által visszavert fény vízszintes polarizációja alapján ismerik fel a vizet [2]. E polarotaxisnak legalább hat funkciója van [1]: (i–iii) A hímek és nőstények vizet keresnek (i) iváshoz, (ii) fürdéshez és (iii) vízközeli páráshoz. (iv–v) A nőstények (iv) petéiket a vízinövényekre vagy sárba rakják, továbbá (v) a vízparti növényeken lesben várnak, amíg a vérszívásra alkalmas gazdaállataik a vízhez járulnak inni vagy fürdeni. (vi) A hímek és nőstények gazdaállat-keresését a gazdáról visszavert fény p pola-

rizációfoka által kiváltott polarotaxis, a polarizációiránytól függetlenül segíti: a nőstények a peték fejlődéséhez szükséges vérszívás miatt keresik a gazdaállatokat, míg a hímek az odavonzott nőstényekkel való párázás céljából. E hat funkció okán a hím és nőstény bögyök az evolúció során erősen polarotaktikus rovarokká fejlődtek.

Számos vérszívó rovarfajnak a petéik érleléséhez gerincesek vérére van szüksége. Az úgynevezett nem-autogén nőstények számára a vérszívás létfontosságú, míg az autogének vér nélkül is képesek petéket rakni, de vérszívásuk növeli termékenységüket és a lerakható peték számát [3]. A termékenység tovább nőhet, ha a vér változó testhőmérsékletű („hidegvérű”) állatok helyett állandó testhőmérsékletűekből („melegvérűekből”) származik [4]. A peterakáshoz szükséges vérmennyiség begyűjtéséhez a nősténynek rendszerint több gazdaállatot is föl kell keresnie, ezért a hatékonyabb gazdaállat-felismerés előnyös [5]. E vérszívó rovarok, köztük a bögyök halálos betegségek kórokozóit terjeszthetik gazdaállataik között, beleértve az embert is [5, 6].

Az írás alapjául szolgáló kutatásunkat a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal K-123930 számú, „A zebracsíkok termofiziológiai vizsgálata: új magyarázat a zebracsíkok szerepére” című pályázata támogatja.

Szörényi Tamás az ELTE-n szerzett MSc biofizikus diplomát 2017-ben. Diplomamunkáját az ELTE Biológiai Fizika Tanszék Környezetoptika Laboratóriumában írta Horváth Gábor vezetésével. Korábban ugyanezen tanszék drónos kutatócsoportjában programozott. A XXXII. OTDK-n *Csoportosan repülő robotok – alakzatrepülés* című munkájával 3. helyezést ért el. Jelenleg egy külföldi cégnél biofizikus kutató.



Pereszlényi Ádám az ELTE-n végzett biológus, jelenleg doktorandusz az ELTE Biológiai Fizika Tanszék Környezetoptika Laboratóriumában. Emellett a Magyar Természettudományi Múzeum Madárgyűjteményében segédmuzeológus. A biológiai és biofizikai kutatások mellett állatpreparálással is foglalkozik.



Barta András az ELTE-n végzett fizikusként, majd ugyanott szerzett PhD-fokozatot biofizikából a Biológiai Fizika Tanszék Környezetoptika Laboratóriumában. A bio- és környezetoptikával kapcsolatos alap kutatásokon kívül ipari műszerek, elsősorban minőségellenőrző eszközök fejlesztésével foglalkozik az Estrato Kutató és Fejlesztő Kft. vezetőjeként. Számos kutatásfejlesztési pályázat előkészítésében és megvalósításában vett és vesz részt.



Horváth Gábor fizikus, az MTA doktora, 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.



Gerics Balázs állatorvosi diplomáját Berlinben, a Humboldt Egyetemen szerezte 1988-ban. Azóta Budapesten oktatja házi emlősök funkcionális és alkalmazott anatómiáját. Korábban az idegrendszer funkcionális morfológiai változásait kutatta rágcsálókon. Az utóbbi években érdeklődése a lovak felé fordult, elsődlegesen azok patkolásához kapcsolódó témákkal foglalkozik.

Vérszíváshoz a nőstény bögölyöknek fel kell ismerniük és a vizuális környezettől el kell különíteniük a gazdaállatokat. Számos vérszívó rovarfaj használ optikai jeleket a repülés irányításához és a gazdaállat-kereséshez [5], sokuk a visszaverődő fény lineáris polarizációját is [7]. A gazdaállat-kereső nőstény bögölyök aktívabbak nyitott, napsütötte területeken, mint erdős, árnyékos helyeken, ezen felül sok bögölyfaj aktivitása délben – amikor a napfény a legintenzívebb – a legnagyobb [8, 9]. A nőstény bögölyök a napsütötte, sötét gazdaállatokat kedvelik, különösen a feketéket [10], és vizuális gazdaállat-keresésüket részben a gazda kultakarójáról visszavert fény polarizációfoka szabályozza [7]. Minél sötétebb a gazdaállat és minél nagyobb a róla visszavert fény polarizációfoka, annál vonzóbb célpont a nőstény bögölyök számára [1].

Bögölyökben, mint minden vízhez kötődő rovarban a vízkeresést a vízszintes polarizáció szabályozza, mivel a vízfelszín rendszerint vízszintesen polarizált fényt tükröz [11]. A gazdaállat-keresésben a polarizációirány helyett inkább a polarizációfok játszik fontos szerepet [7]. Az utóbbi jelenség oka, hogy egy gazdaállat testfelszíne bármilyen irányban (vízszintesen, ferdén, függőlegesen) polarizált fényt verhet vissza [12], ellentétben a vízfelülettel.

A bögölyök e kettős polarotaxisát használják ki a polarizációs bögölycsapdák [13]: a vizet kereső hím és nőstény bögölyöket fényes (sima) fekete vízszintes felületről (ragacos tábláról, olajfelszínről, nap-
elemtábláról) tükröződő vízszintesen poláros fény vonzza a csapdákhöz, amelyek vízszintesen polarizáló vízfelszín utánóznak [10, 14]. A gazdaállat-kereső nőstényeket a talaj fölött felfüggesztett, függőleges sík vagy gömb alakú fényes (sima) fekete célpontok csalogatják, amelyek sötét és erősen poláros gazdaállatokat utánóznak [7, 10]. A bögölyök – mint általában a polarotaktikus vízirovarok – csak gyen-

gén vonzódnak matt (érdes) fekete vagy más matt sötét színű felületekhez [2, 7]. Ezért a leghatékonyabb bögölycsapdáknak használatos csalik feketék és simák (fényesek) [13]. A sima felszín azért fontos, mert csak az ilyen képes nagy polarizációfokú fényt visszaverni a

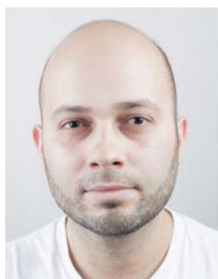
$$\theta_{\text{Brewster}} = \arctan(n)$$

Brewster-szög közeléből, amit a tükröző felület normálvektorától mérünk és n a tükröző anyag törésmutatója.

Habár a nőstény bögölyök a napsütötte, sötét és erősen poláros gazdaállatokat, valamint a fényes fekete célpontokat részesítik előnyben a matt s így csak gyengén polárosakkal szemben [7], ennek biológiai, ökológiai okai egyelőre ismeretlenek. E viselkedés okául egy új termofiziológiai magyarázatot tételünk fel, aminek kísérleti ellenőrzése jelenleg is folyik (NKFIH K-123930). Annak megindoklására pedig, hogy miért szükséges polarizációérzékelés a sötét gazdaállat megtalálásához, a következő hipotézist állítottuk fel: mikor egy nőstény bögöly sötét gazdaállatot keres, kiválasztja a környezetében levő sötét foltokat, mint vérszívásra alkalmas lehetséges célpontokat. Azonban a vizuális környezetben számos olyan sötét folt is akadhat, amelyek nem a kívánt célpontok (sötét gazdaállatok), hanem a növényzet (bokrok, fák) sötét foltjai. Mivel a fák és bokrok levelei nem mind azonos irányban állnak, ezért a róluk visszavert fény polarizációiránya széles szögtartományban szór. Ennek optikai következménye, hogy a bögölyök összetett szemének ommatídiumaiban (elemi szemecskéiben) e növényi sötét foltok átlagos polarizációfoka kicsi. Ezzel ellentétben a sötét gazdaállatok rendszerint sima (fényes) testfelülete a fényt nagy polarizációfokkal veri vissza, és a polarizációirány helyileg csak kissé szór. Tehát a háttérnövényzet sötét részei és a napsütötte sötét gazdaállatok a róluk visszavert fény polarizációfokában szignifikánsan különbözhetnek. A bögölyök érzékeli a fénypolarizációt, így képesek megkülönböztetni egy sötét és kevésbé poláros (árnyékos növényzeti) foltot egy napsütötte, sötét és erősen poláros folttól (gazdaállattól).

Kutatásunk során e hipotézist teszteltük [15]. Képalakító polarimetriát használva – változatos megvilágítási körülmények és különböző háttérnövényzet mellett – egy sötét gazdaállatmodellről és egy élő fekete tehénről visszavert fény polarizációs mintázatait mértük.

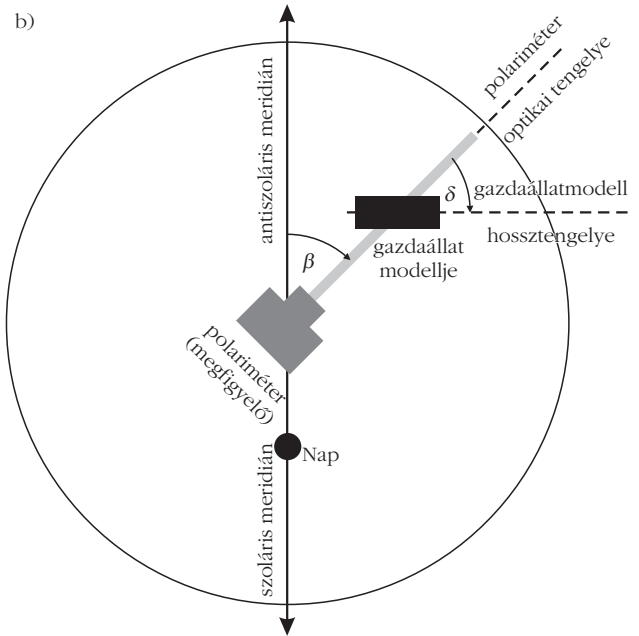
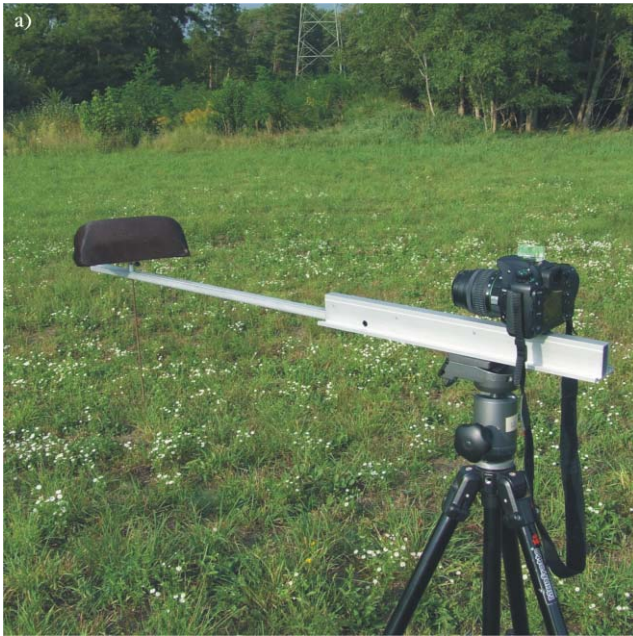
Összehasonlítottuk a növényzet sötét foltjairól és a sötét gazdaállatmodellről/tehénről eredő fény intenzitását és polarizációfokát. Meghatároztuk a sikeres gazdaállat-felismerés esélyét külön a célpont intenzitása és polarizációfoka, valamint e kettő kombinációja alapján is. Megmutattuk, hogy a polarizációfok felhasználása jelentősen növeli a napsütötte, sötét gazdaállatok vizuális detekciójának hatékonyságát növényzettel borított – ami a természetes optikai környezetre jellemző – háttér előtt [15].



Hegedüs Ramón biofizikus az ELTE-n diplomázott (2005), majd 2008-ban ugyanitt doktorált a Biológiai Fizika Tanszék Környezetoptika Laboratóriumában. Az Oktatási Minisztérium Ifjúsági Bolyai-díjasa, és I. díjat kapott a Magyar Biofizikai Társaság Ernst Jenő Alapítványától. Kutatott a spanyol Gironai Egyetemen, majd Humboldt-ösztöndíjjal a német Tübingeni Egyetemen. Az alap kutatás mellett főbb kutatás-fejlesztési érdeklődési területei: látás, számítógépes képfeldolgozás, fotográfia, gépi látás.



Susanne Åkesson a svéd Lundi Egyetem Biológia Tanszékének biológus-ökológus professzora és a Lundi Centre for Animal Movement Research igazgatója. Nemzetközi tudományos expedíciók szervezője-résztevője, amelyeken főleg a madarak orientációját vizsgálja. Az állatok (különösen a rovarok és madarak) navigációjának, mozgásának és ökológiájának neves kutatója. Számos szakkikk és több szakkönyv szerzője. Rangos szakmai kitüntetések – többek között a fizikai Ig Nobel-díj – birtokosa.



1. ábra. a) A lómodellrel végzett képalkotó polarimetriás mérés eszköze. A félhenger alakú, sötétbarna lóbbőrrel bevont lómodellt a polariméter előtt rögzítettük a modell függőleges tengelye körül forgathatóan. b) A mérési elrendezés geometriája felülnézetből. β : a polariméter vízszintes optikai tengelyének az antiszoláris meridiánnal bezárt szöge. δ : a modell vízszintes hossz tengelyének a polariméter optikai tengelyével bezárt szöge.

Eszközök és módszerek

Képalkotó polarimetria

Képalkotó polarimetriával a terepen mértük egy gazdaállatmodellről visszavert fény polarizációs mintázatait különböző növényhátter előtt a spektrum vörös (650 nm), zöld (550 nm) és kék (450 nm) tartományában (1.a ábra). A méréseket 2016 júliusában egy Göd (47° 43' É, 19° 09' K) közelében levő lovasfarmon végeztük napos időben, felhőtlen ég alatt. A gazdaállatmodell (a továbbiakban lómodell) egy 10 cm átmérőjű, 22 cm hosszúságú félhenger volt, amit sötétbarna lóbbőrrel vontunk be (1.a ábra), amin a szőrszálak a lovak hátára és oldalára jellemzően irányultak. E lómodell jól utánozta a gazdaállatok közel hengeres testének felső részét. A lómodellt a polariméter előtt 1 m távolságra rögzítettük (1.a ábra). A polariméter vízszintes optikai tengelyének az antiszoláris meridiánnal bezárt β szögét és a lómodell ugyancsak vízszintes hossz tengelyének a polariméter optikai tengelyével bezárt δ szögét tesztes szerint változtathattuk (1.b ábra). E lómodellrel több mérést végeztünk különböző fák és bokrok álló növényzettel a háttérben (1.a ábra). A vizsgált esetek megvilágítási jellemzőit és irányszögeit az 1. táblázat tartalmazza.

Ugyancsak képalkotó polarimetriával mértük egy fekete tehen polarizációs mintázatait 2008 szeptemberében a dél-svédországi Lund közelében levő Stensoffa Ecological Field Station (55° 42' É, 13° 25' K) mellett. A részlegesen felhős ég miatt a tehen egyszer napsütötte, máskor árnyékos volt (amikor a Napot felhő takarta).

Gazdaállat-felismerő algoritmusok

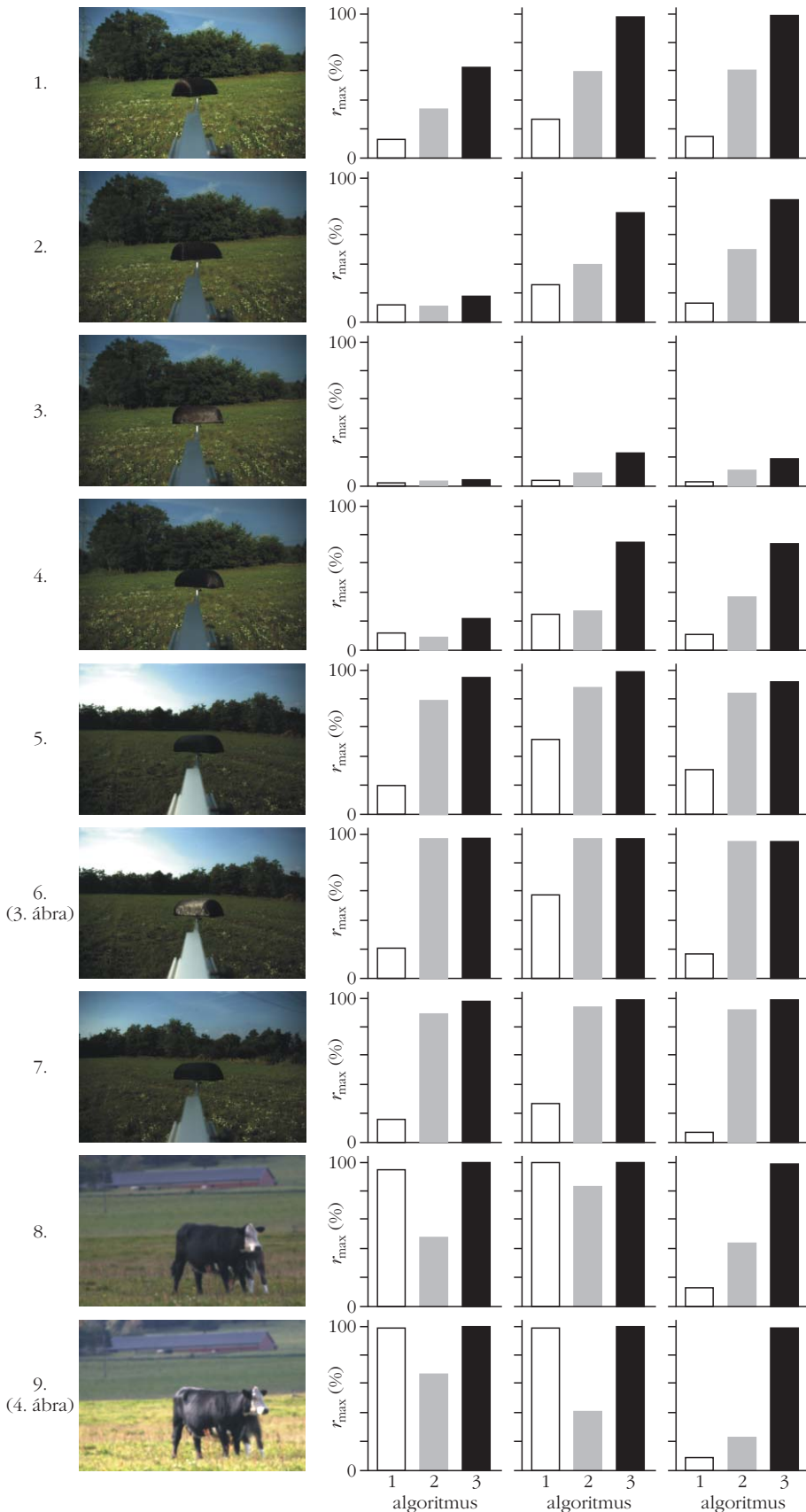
Egy adott gazdaállat (lómodell, fekete tehen) és háttérnövényzet esetén a visszavert fény vörös, zöld és kék tartományokban mért i relatívintenzitás- és p polarizációs-fok-mintázatait felhasználva, az általunk fejlesztett

1. táblázat

A terepi mérésben vizsgált 9 különböző eset megvilágításának jellemzői, valamint a polariméter (megfigyelő) és a lómodell vagy gazdaállat (fekete tehen) óramutató járásával megegyezően mért β és δ irányszögei (1.b ábra)

eset	megvilágítás jellemzői	β	δ
1.	Nap a polariméter mögött, napsütötte lómodell	0°	+30°
2.	Nap a polariméter mögött, napsütötte lómodell	0°	+60°
3.	Nap a polariméter mögött, napsütötte lómodell	0°	+90°
4.	Nap a polariméter mögött, napsütötte lómodell	0°	-45°
5.	Nap a bal oldalon, árnyékos lómodell	-90°	-45°
6. (3. ábra)	Nap a bal oldalon, napsütötte lómodell	-90°	-45°
7.	Nap a bal oldalon, napsütötte lómodell	-45°	-45°
8.	felhő által takart Nap a bal oldalon, árnyékos fekete tehen	-90°	-45°
9. (4. ábra)	Nap a bal oldalon, napsütötte fekete tehen	-90°	-45°

β : a polariméter vízszintes optikai tengelyének az antiszoláris meridiánnal bezárt szöge. δ : a lómodell vagy fekete tehen vízszintes hossz tengelyének a polariméter optikai tengelyével bezárt szöge.



2. ábra. A lómodell vagy fekete tehén 1., 2. és 3. gazdaállat-felismerő algoritmusmal számított r (%) felismerési sikerének maximuma a spektrum vörös (650 nm), zöld (550 nm) és kék (450 nm) tartományában a terepen vizsgált 9 különböző esetben.

számítógépes program először felismerte azon képpontokat, amelyek kellően sötétek és polárosak, tehát amelyekre a következő két feltétel teljesült: (1) $0\% \leq i \leq i^*$ és (2) $p^* \leq p \leq 100\%$ a vörös, zöld és kék spektrális tartományban, ahol $i = 100I/I_{\max}$ ($I_{\max} = 255$ az I fényintenzitás által felvehető legnagyobb érték) és i^* és p^* küszöbértékek. Az így felismert $N_{\text{felismert}}$ számú képpont a gazdaállathoz vagy a háttérhez tartozhat. Egy röptében gazdaállatot kereső polarizációérzékeny bögöly számára fontos, hogy ezen $N_{\text{felismert}}$ felismert pont döntő többségben a gazdaállathoz tartozzon. A program megszámlálta azon képpontok N számát az $N_{\text{felismert}}$ közül, amelyek a gazdaállatra estek. Az $r = N/N_{\text{felismert}}$ hányados adja a gazdaállat-felismerési sikert. Végül megkaptuk az $r(i^*, p^*)$ felismerési sikert az i^* relatívintenzitás-küszöb és a p^* polarizációfok-küszöb függvényében. A következő három gazdaállat-felismerő algoritmust használtuk:

1. algoritmus

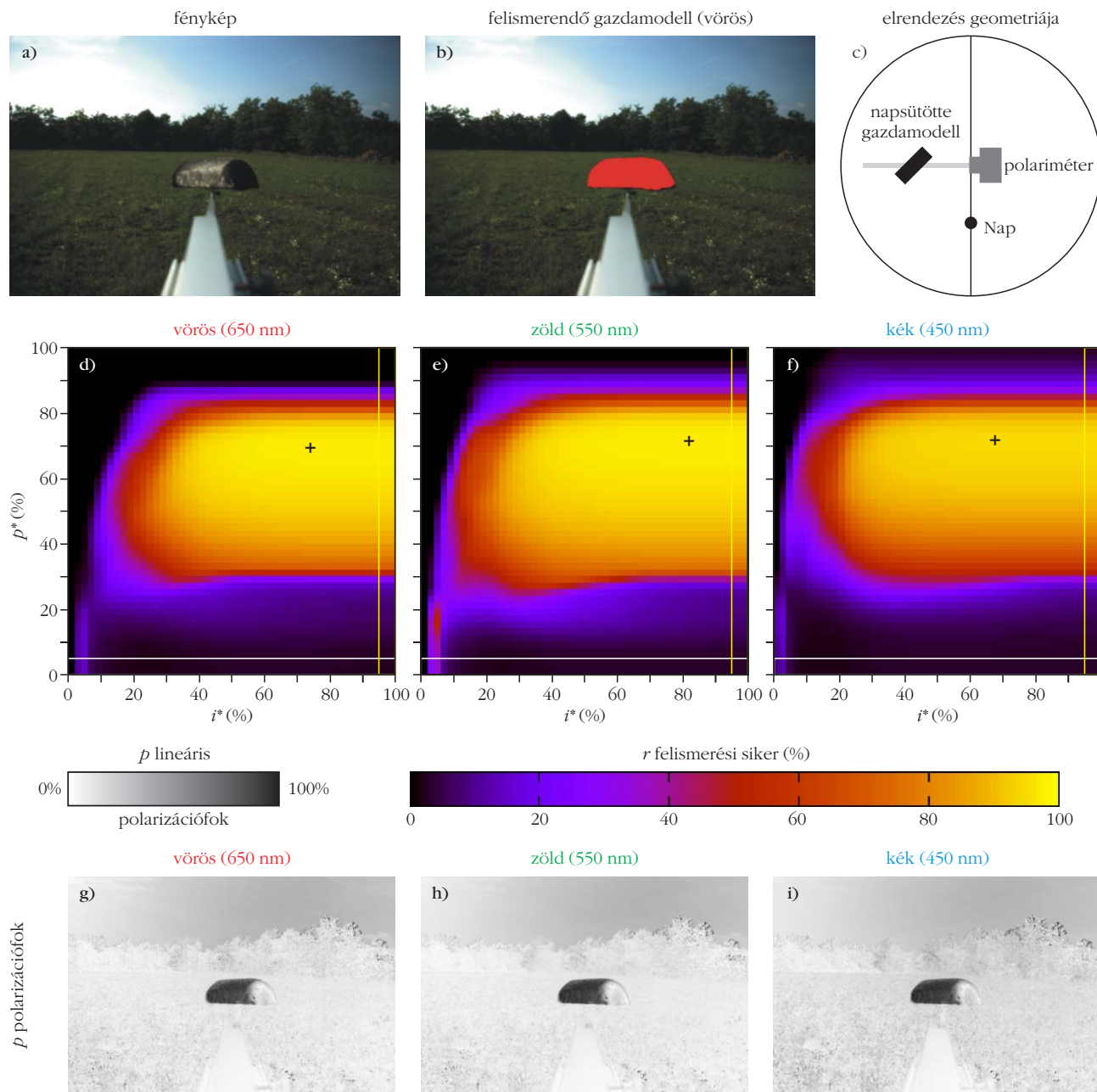
A gazdaállatot kizárólag az i relatív intenzitása alapján ismeri fel a p polarizációfok figyelembe vétele nélkül. Az ezen algoritmussal kapott eredmények az $r(i^*, d^*)$ mátrix $r(0\% \leq i^* \leq 100\%, p^* = 0\%)$ legelső sorában találhatók.

2. algoritmus

A gazdaállatot kizárólag a p polarizációfoka alapján ismeri fel az i relatív intenzitás nélkül. Az ezen algoritmussal kapott eredmények az $r(i^*, d^*)$ mátrix $r(i^* = 100\%, 0\% \leq p^* \leq 100\%)$ jobb szélső oszlopába esnek.

3. algoritmus

A gazdaállatot az i relatív intenzitása és p polarizációfoka alapján ismeri fel. Az így kapott eredmények lefedik a teljes $r(i^*, d^*)$ mátrixot, vagyis az $r(0\% \leq i^* \leq 100\%, 0\% \leq p^* \leq 100\%)$ tartományt.



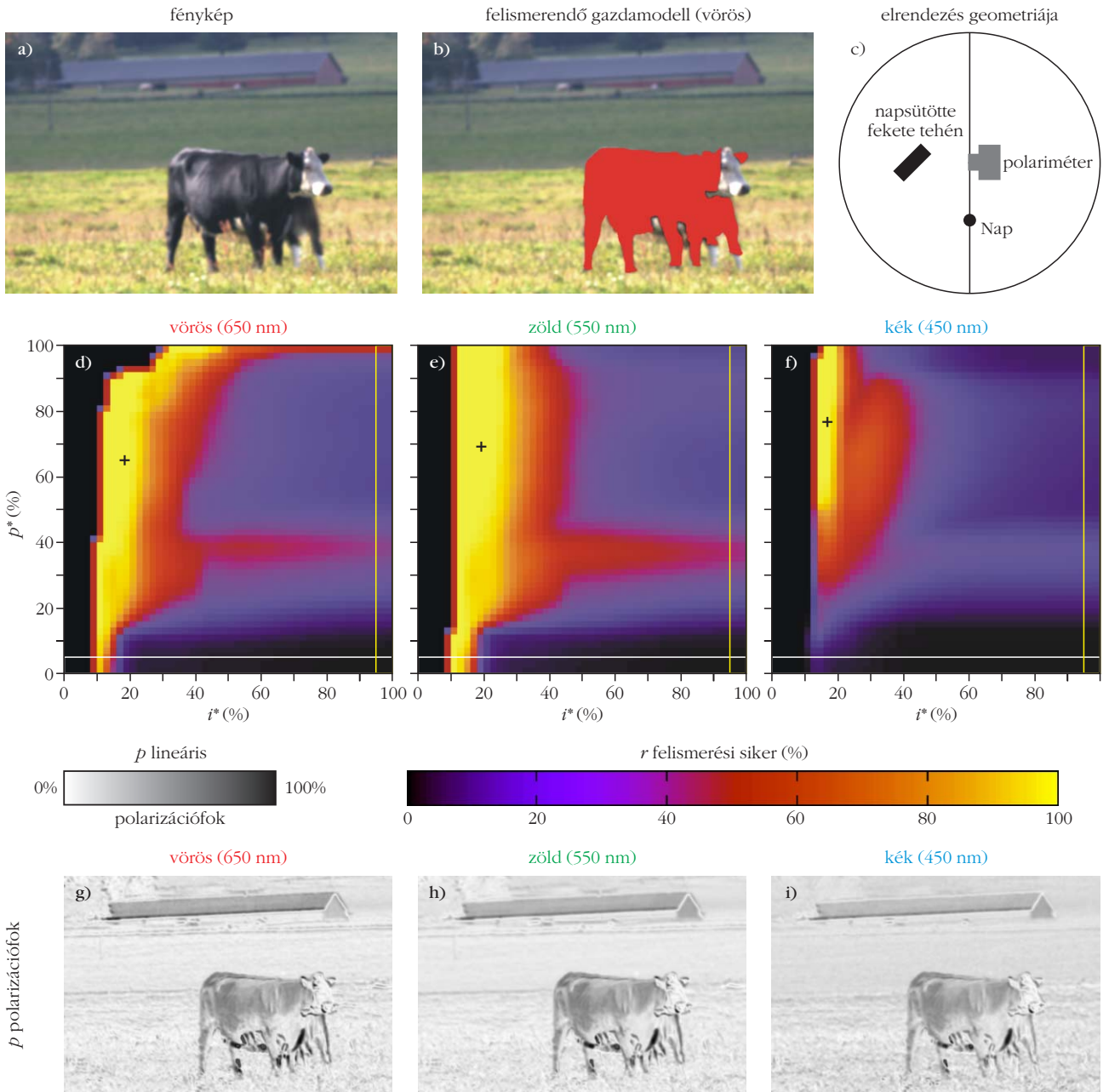
3. ábra. 6. eset. a) A napcsütötte sötétbarna lómodell fényképe egy réttel és fákkal a háttérben. b) E képen a vörössel jelzett lómodell mutatja az algoritmusaink (bögölyök) által felismerendő célterületet. c) A mérési elrendezés geometriája. d), e), f) Az r gazdaállat-felismerési siker szinkódolt értékei a p^* (p küszöbértéke) és i^* (az $i = I/I_{\max}$ relatív intenzitás küszöbértéke, ahol $I_{\max} = 255$) függvényében a spektrum vörös, zöld és kék tartományában. r maximumának helyét + mutatja. A fehér kerületű vízszintes téglalap a $p^* = 0\%$ és $0\% \leq i^* \leq 100\%$ értékekhez tartozik, amikor a gazdaállat-felismerésben a fénypolarizáció nem, csak az intenzitás játszik szerepet. A sárga kerületű függőleges téglalap az $i^* = 100\%$ és $0\% \leq p^* \leq 100\%$ értékekhez tartozik, amikor a gazdaállat-felismerésben a fényintenzitás nem, csak a polarizáció játszik szerepet. g), h), i) A p lineáris polarizációfok mintázata a vörös, zöld és kék spektrális tartományokban.

Az 1. és 2. gazdaállat-felismerő algoritmusok a 3. algoritmus speciális esetei, melyek az $r(i^*, d^*)$ mátrix legelső sorának, illetve jobb szélső oszlopának felelnek meg.

Eredmények

Itt most részleteiben csak a 6. esetet (3. ábra) tárgyaljuk, mivel az 1.–5., 7.–9. esetekben méréseinkből és számításainkból a barna lómodellre és fekete tehénre

ugyanazon következtetésekre jutottunk. A 3.a ábra a 6. esetben a lómodellről, valamint háttérben egy mezőről és fákról készült fénykép, amikor a Nap a polariméter mögött volt (3.c ábra). A gazdakereső bögölyök által felismerendő célterületet a 3.b ábra pirosra színezett lómodellje jelzi. A 3.g–i ábrák szerint a zöld növényzet a kékben a legpolarizosabb (legmagasabb p polarizációfokkal veri vissza a fényt) és zöldben a legkevésbé poláros (legkisebb p). A barna lómodell szintén a kékben a legpolarizálóbb, míg vörösben a legkevésbé polarizálja a fényt.



4. ábra. Ugyanaz mint a 3. ábra, de most a 9. eset napsütötte fekete tehenére a c) ábra elrendezésére és az 1. táblázatbeli megvilágítási körülményekre.

A 3.d-f ábrák a 6. eset színkódolt $r(i^*, d^*)$ mátrixát mutatják a vörös, zöld és kék spektrális tartományokban. Adott i^* relatívintenzitás-küszöb mellett az r gazdaállat-felismerési siker erősen függ a p^* polarizációfok-küszöbtől és meredek maximumot mutat, amint p^* változik. Más részről, adott p^* mellett r kevésbé függ i^* -től, azaz r közel állandó i^* széles intervallumban. A 3.d-f ábrákon + jelöli az $r(i^*, d^*)$ maximumát, aminek értéke és (i^*, d^*) térbeli helye hullámhosszfüggő (2. ábra). Tehát a maximális r -hez tartozó d^* csökkenő hullámhossz mellett nő.

Ha a bögölyök a sötét gazdaállatokat az 1. algoritmusmal (csak az i relatív intenzitás alapján) keresnek, akkor felismerési sikereik a 3.d-f ábrák $r(i^*, d^*)$ mátrixának a $d^* = 0\%$ -hoz tartozó, fehér keretű legalsó

sorába esnének. Ha a bögölyök a gazdaállatokat a 2. algoritmusmal (csak a p polarizációfok alapján) keresnek, akkor felismerési sikereik a 3.d-f ábrák $r(i^*, d^*)$ mátrixának $i^* = 100\%$ -hoz tartozó, sárga keretű jobb szélső oszlopába esnének. Ha a gazdaállat-keresés a 3. algoritmusmal történik (i és p alapján), akkor r maximumát + jelöli a 3.d-f ábrákon. A 2. ábra szerint mind a 9 vizsgált esetben a 3. algoritmusmal a vörösben, zöldben és kékben kapott r_{\max} mindig nagyobb, mint az 1. és 2. algoritmusmal kapottak.

A spektrum egy adott tartományában a napsütötte lómodell nagyobb polarizációfokú fényt ver vissza, mint az árnyékos (3.g-i ábrák). Ennek az a fontos következménye, hogy az r gazdaállat-felismerési siker nagyobb a napos, mint az árnyékos lómodell esetén:

a 2. ábrából egyértelműen látszik, hogy adott spektrális tartományban a 3. algoritmussal kapott r_{\max} nagyobb, ha a lómodell napos. Tehát a polarizációt érzékelő bögölyök könnyebben ismerik fel a napsütötte gazdaállatokat, mint az árnyékosakat.

A fenti megállapításokat megerősítik az árnyékos és napos fekete tehenre kapott hasonló eredmények (2. és 4. ábrák): (i) Bármely spektrális tartományban a 3. algoritmussal kapott r_{\max} e fekete tehen esetén mindig nagyobb, mint az 1. vagy 2. algoritmussal kapott r_{\max} (2. ábra). (ii) A spektrum adott tartományában az árnyékos tehen kevésbé polarizált fényt vert vissza, mint a napsütötte (4.g-i ábrák).

Mindebből arra következtetünk, hogy a p polarizációfok segít a bögölyöknek elkülöníteni a sötét gazdaállatokat a vizuális környezetük egyéb sötét foltjaitól. Tehát gazdaállat-kereséskor sikeresebbek, ha használják polarizációérzékelésüket.

Elemzés

Megmutattuk, hogy a polarizáció érzékelése előnyös a sötét gazdaállatok felismeréséhez: a p polarizációfok segítségével a bögölyök meg tudja különböztetni a sötét gazdaállatokat a környező növényzet sötét foltjaitól, mert az előbbieket nagyobb polarizációfokú fényt vernek vissza, mint az utóbbiak.

A bögölyök egészséges gazdaállatai (például lovak, marhák, egyéb patások) általában fényes, sima kültakaróval rendelkeznek, közel párhuzamosan álló szomszédos szőrszálakkal. Kivételt képeznek azon esetek, mikor például télen (amikor a bögölyök nem aktív) a jobb hőszigetelés érdekében a szőrszálak hosszabbak és rendezetlenebbek, ami egy durva, matt megjelenésű felszín eredményez. A fényes, sima kültakaró nagyobb p polarizációfokú fényt vernek vissza, mint a mattok, mert a durva felületek depolarizálják a visszavert fényt: minél durvább a felület, annál erősebb a depolarizáló (p -csökkentő) hatás. Az Umow-szabály [16] szerint egy adott hullámhossztartományban minél sötétebb egy felület, annál nagyobb a róla visszavert fény p polarizációfoka. Tehát a visszavert fényt a fekete gazdaállatok polarizálják legerősebben. Adott fényvisszaverő felület polarizálóképessége a Brewster-szögben maximális. Ebből következik, hogy a polarizációérzékeny repülő bögölyök akkor érzékelnek magas polarizációfokot, amikor a sötét gazdaállat testfelületének azon részeit figyelik, ahonnan a fény a Brewster-szög közelében verődik vissza.

Napsütésben a tükröző irányból visszavert fény a legerősebb: ilyenkor a napfény beesési és visszaverési szögei egyenlők. Minden más irányból csak az ég sokkal gyengébb fénye verődik vissza. Ha a tükröző irányszög közel esik a Brewster-szöghöz, akkor a sötét felszínről visszavert fény nagyon magas polarizációfokú. Ha a gazdaállat árnyékban van, akkor testfelszínének egy adott pontjára minden lehetséges irányból (égbolt, növényzet, talaj) érkezik fény, ami-

nek következménye a visszavert fény viszonylag alacsony polarizációfoka. Ezek a fizikai okai annak, hogy a napsütötte gazdaállatok nagyobb polarizációfokú fényt vernek vissza, mint az árnyékban levők.

A sötét szőrű gazdaállatokról visszavert erősen poláros fényvel ellentétben, a növényzet egy árnyékos részéről egy repülő bögöly ommatídiumaiba jutó fény viszonylag alacsony polarizációfokú. Ugyanis egy véletlenszerűen irányuló levél minden lehetséges irányból kap fényt a környezetéből (égboltról és a többi levélről). Ez azzal jár, hogy nincs tükröző visszaverődés, vagyis nem létezik olyan kitüntetett irány, ahonnan a levél kiemelkedően sok fényt verne vissza. E diffúz reflexió miatt a növényzet sötét részeinek árnyékos leveleiről visszavert fény véletlenszerű irányokban és viszonylag gyengén polarizált (alacsony p). A bögölyök egy ommatídiuma a ráeső fény polarizációját átlagolja. Ezért, ha a látóteréből jövő fény polarizációiránya nem állandó, akkor az átlagolt p tovább csökken, különösen távoli tárgyak esetén. Tehát a növényzet sötét, árnyékos foltjait sokkal gyengébben polárosnak érzékeli a bögölysem, mint a napsütötte gazdaállatokról Brewster-szögben visszaverődő fényt.

Elsőre azt gondolhatnánk, hogy a bögölyök úgy tudnák legkönnyebben felismerni a gazdaállatokat, ha kizárólag a fényintenzitásra támaszkodva egyszerűen a sötét foltokat keresnék. E stratégiával (1. algoritmus) azonban gyakran a háttérnövényzet sötét foltjait is gazdaállatnak vélnék, így ez nem elég hatékony módszer. Alternatívaként a bögölyök célpontjaikat kiválaszthatnák pusztán a polarizációfok alapján is, erősen polarizáló tárgyakat keresve. E stratégiával (2. algoritmus) az a probléma, hogy csak azon gazdaállatokat tudnák így detektálni, amelyek teste megfelelő irányú és így kellően polarizáló. Ha emiatt alacsony lenne a gazdaállat-felismeréshez szükséges p^* polarizációfok-küszöb, akkor viszont előfordulhatna, hogy a növényzet jelentős részét is tévesen gazdaállatként detektálnák. Tehát önmagában az 1. és 2. algoritmus egyike sem ideális megoldás. Eredményeink szerint a gazdaállatok megtalálásához a bögölyök számára a kellően sötét és megfelelően poláros célpontok keresése (3. algoritmus) a jó stratégia, mert így nagyon jó eséllyel tudják megkülönböztetni őket a növényzet sötét foltjaitól.

Kutatásunkkal a fénypolarizáció-érzékelésnek a bögölyök vizuális gazdaállat-keresésében betöltött előnyét szemléltettük. Hangsúlyozni szeretnénk, hogy a gazdaállat-keresésben más tényezők is fontos szerepet játszhatnak: például a bögölyök vonzódnak a mozgó csalikhoz [5], vagyis gazdaállataikat is részben a mozgásuk alapján azonosítják. Ezen felül a bögölyök erőteljesen vonzódnak a gazdaállatok szagához [5]. Azonban kiderült, hogy többek között a sötét-világos csíkok megzavarják a bögölyök szag utáni vonzódását, vagyis a gazdaállatok színmintázata domináns a specifikus szagaikkal (például ammónia, szén-dioxid) szemben [17] a gazdaállat-kereső bögölyök érzékszerveiben.

Irodalom

1. Horváth G., Egri Á., Blahó M.: Chapter 22. Linearly polarized light as a guiding cue for water detection and host finding in tabanid flies. In: G. Horváth (editor): *Polarized Light and Polarization Vision in Animal Sciences*. Springer: Heidelberg, Berlin, New York (2014) 525–559.
2. Horváth G., Majer J., Horváth L., Szivák I., Kriska G.: Ventral polarization vision in tabanids: horseflies and deerflies (Diptera: Tabanidae) are attracted to horizontally polarized light. *Naturwissenschaften* 95 (2008) 1093–1100.
3. Ballard J. W. O., Waage J. K.: Feeding strategies of the horseflies *Hybomitra expollicata* and *Tabanus bromius* in southern France. *Medical and Veterinary Entomology* 2 (1988) 265–270.
4. Jalil M.: Observations on the fecundity of *Aedes triseriatus* (Diptera: Culicidae). *Entomologia Experimentalis et Applicata* 17 (1974) 223–233.
5. Lehane M. J.: *The Biology of Blood-sucking in Insects*. Cambridge University Press, Cambridge, UK (2005)
6. Marcantonio M., Pascoe E. L., Baldacchino F.: Sometimes scientists get the flu. Wrong...! *Trends in Parasitology* 33 (2017) 7–9.
7. Egri Á., Blahó M., Sándor A., Kriska G., Gyurkovszky M., Farkas R., Horváth G.: New kind of polarotaxis governed by degree of polarization: attraction of tabanid flies to differently polarizing host animals and water surfaces. *Naturwissenschaften* 99 (2012) 407–416.
8. Baldacchino F., Desquesnes M., Mihok S., Foil L. D., Duvall G., Jittapalpong S.: Tabanids: neglected subjects of research, but important vectors of disease agents! *Infection, Genetics and Evolution* 28 (2014) 596–615.
9. Herczeg T., Blahó M., Száz D., Kriska G., Gyurkovszky M., Farkas R., Horváth G.: Seasonality and daily activity of male and female tabanid flies monitored in a Hungarian hill-country pasture by new polarization traps and traditional canopy traps. *Parasitology Research* 113 (2014) 4251–4260.
10. Egri Á., Blahó M., Száz D., Barta A., Kriska G., Antoni G., Horváth G.: A new tabanid trap applying a modified concept of the old flypaper: Linearly polarising sticky black surfaces as an effective tool to catch polarotactic horseflies. *International Journal for Parasitology* 43 (2013) 555–563.
11. Horváth G.: Chapter 16. Polarization patterns of freshwater bodies with biological implications. In: G. Horváth (editor): *Polarized Light and Polarization Vision in Animal Sciences*. Springer: Heidelberg, Berlin, New York (2014) 333–344.
12. Egri Á., Blahó M., Kriska G., Farkas R., Gyurkovszky M., Ákesson S., Horváth G.: Polarotactic tabanids find striped patterns with brightness and/or polarization modulation least attractive: an advantage of zebra stripes. *Journal of Experimental Biology* 215 (2012) 736–745.
13. Horváth G., Blahó M., Egri Á., Lerner A.: Chapter 23. Applying polarization-based traps to insect control. In: G. Horváth (editor): *Polarized Light and Polarization Vision in Animal Sciences*. Springer: Heidelberg, Berlin, New York (2014) 561–584.
14. Blahó M., Egri Á., Barta A., Antoni G., Kriska G., Horváth G.: How can horseflies be captured by solar panels? A new concept of tabanid traps using light polarization and electricity produced by photovoltaics. *Veterinary Parasitology* 189 (2012) 353–365.
15. Horváth G., Szörényi T., Pereszlényi Á., Gerics B., Hegedűs R., Barta A., Ákesson S.: Why do horseflies need polarization vision for host detection? Polarization helps tabanid flies to select sunlit dark host animals from the dark patches of the visual environment. *Royal Society Open Science* 4 (2017) 170735.
16. Umow N.: Chromatische Depolarisation durch Lichtzerstreuung. *Physikalische Zeitschrift* 6 (1905) 674–676.
17. Blahó M., Egri Á., Száz D., Kriska G., Ákesson S., Horváth G.: Stripes disrupt odour attractiveness to biting horseflies: Battle between ammonia, CO₂, and colour pattern for dominance in the sensory systems of host-seeking tabanids. *Physiology and Behavior* 119 (2013) 168–174.

A FIZIKA TANÍTÁSA

NE HABOZZ! KÍSÉRLETEZZ!

Szabó László Attila
Csongrádi Batsányi János Gimnázium

Az elmúlt időszak hazai és nemzetközi felmérései szerint a fiatalok körében a fizika tantárgy megítélése eléggé negatív [1, 2]. Ennek okait és a megoldás módjait persze lehet kutatni, de véleményem szerint a sok tanári és tanuló kísérlettel megtervezett órák mindenképpen felkeltik a diákok érdeklődését. Nagyon sok forrásból meríthetünk egyszerűen kivitelezhető kísér-

Az írás a szerző – a 60. Országos Fizikatanári Ankét és Eszközbemutató (Gödöllő, 2017. március 15–18.) I. helyezéssel kitüntetett – műhelyfoglalkozása alapján készült.



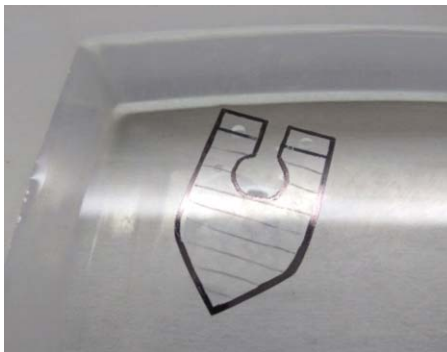
Szabó László Attila fizika-matematika szakos középiskolai tanár, diplomáját a JATE-n szerezte, azóta a Csongrádi Batsányi János Gimnáziumban tanít, a Tetudod diáklaboratórium egyik létrehozója, kísérletező délutánok szervezője, a fizikaszertár gyarapítója. 2014 óta mestertanár, szaktanácsadó. 2016-ban a Pro Progressio Alapítvány díjában, 2017-ben az Országos Fizikatanári Ankét műhelyfoglalkozása I., 2018-ban III. díjban részesült. A magyar delegáció tagjaként részt vett a Science on Stage fesztiválon.

leti ötleteket, még akkor is, ha nem áll rendelkezésünkre jól felszerelt fizikaszertár. Egy kis kezűgyességgel nagyon ötletes kísérleti eszközöket készíthetünk, illetve készíthetünk tanítványainkkal. Fontosnak tartom, hogy ebben a virtualizálódott világban a diákok kézzel fogható produktumokat is előállítsanak, és ha ezzel még egyszerű megfigyeléseket és kísérleteket is végezhetnek, akkor célunkat elértük.

A következőkben azt szeretném bemutatni, hogy a folyadékok felszíni tulajdonságait milyen kísérleteken keresztül tudjuk bemutatni diákjainknak, kisiskolás kortól a gimnáziumi szakköri szintig.

Az Csongrádi Természettudományos Diáklaboratóriumban *Anyá Te tudod? Apa Te tudod?* címmel óvodásoknak, illetve alsó tagozatos diákoknak – és szüleiknek is (!) – kísérletező délutánokat szoktunk meghirdetni. Tapasztalatom szerint a gyerekek már ebben az életkorban is szívesen kísérleteznek, a lényeg a felfedezés öröme. Sok-sok olyan kísérlet van, amelyekre rácsodálkozva megismerhetik a körülöttük lévő világot. Ezek közül néhány egyszerűen kivitelezhető kísérlet:

- *Úszó pénzérmék.* Helyezzünk 10 filléres érméket a víz felszínére (1. ábra, balra)! Mit tapasztalunk, ha több érmét teszünk egymás mellé? Mi történik, ha ugyanilyen anyagból – alumíniumból – készült szegecseket helyezünk a víz felszínére?



1. ábra. Úszó 10 filléresek balra és a mosószeres hajó jobbra.

- *Szétszaladó hintőpor.* Tányérban lévő víz felszínére szórjunk hintőport, majd mosogatószert cseppentsünk a vízbe. Mi történik?

- *Mosószeres hajó.* Egy vastagabb műanyag fóliából (például régi írásvetítő fólia) egy hajóalakot vágjunk ki, majd az 1. ábra jobb oldali képe szerint készítsünk egy bevágást a testbe. Cseppentsünk a bevágás végébe mosogatószert! Mi történik?



2. ábra. Habkukacfújó balra, jobbra pedig készül a habkukac.

- *Ami befolyik, az nem folyik ki.* Miért nem folyik ki a gézlappal fedett üvegből a víz, ha az üveget függőlegesen, fejjel lefelé tartjuk?

- *Kifeszülő cérnaszál.* Mártsd a mosogatószeres oldatba a drótkeretet, amelynek két pontjára laza cérnaszál van kötve. Lyukaszd ki a cérnaszál egyik oldalán a hártját! Mi történik?

- Kocka alakú drótkeretet márts az oldatba, majd óvatosan emeld ki! Hogyan helyezkednek el a hártják? (A keretet vékony drótból lehet hajtogatni, illetve barkácsboltokban kapható 2 mm-es réz forrasztóhuzalból is össze lehet forrasztani.)

- *Buboréköldözés.* Megdörzsölt lufit közelíts buborékokhoz!

- *Színkavalkád tejben.* A tányérban lévő tejbe különböző színű ételfestéket csepegtess, majd mosószerben megmártott fültisztítót érints a tej felszínéhez!

- *Hogyan lehet nagy buborékot fújni?* A PET-palackból készített tölcser segítségével fújj egy nagy buborékot! Mi történik, ha abbahagyod a fújást?

- *Hogyan lehet rövid idő alatt a lehető legtöbb buborékot fújni?* Készítsünk habkukacot! A PET-palack tetejét vágjuk le. Az így kapott tölcser szájára egy befőttes gumi segítségével egy vastag törölköző- vagy fürdőköpenydarabot fogassunk rá (2. ábra).

- *Tűzkigyó.* Ha az általunk készített habkigyót nem levegővel, hanem gáztöltő spray segítségével fújjuk, akkor azt meggyújtva tűzkigyó lesz a kukacból. (Csak felnőtt felügyelete mellett végezhető!)

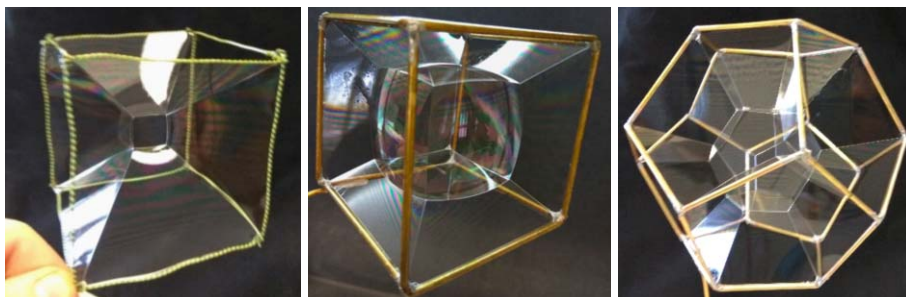
A kísérletek egy részéhez buboiddatot kell készítenünk. Nekem a következő vált be: 1 liter vízhez 2,5 dl mosogatószert és két evőkanál glicerint (gyógyszertárban kapható) kell önteni, majd összekeverni.

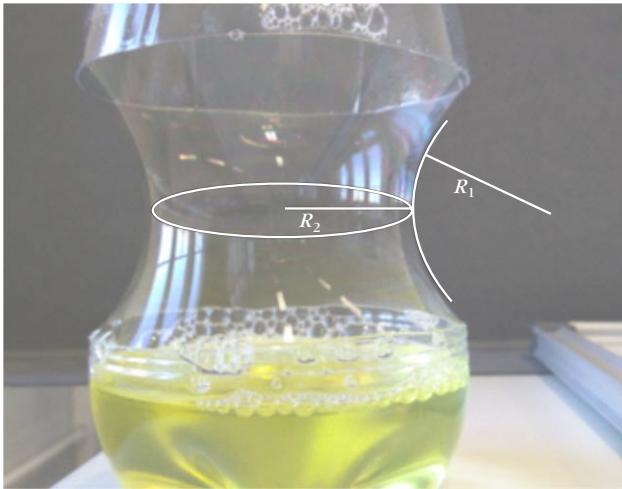
Minimálfelületek vizsgálata

Érdekes gimnáziumi szakköri téma lehet a minimálfelületek vizsgálata. Az energiaminimumra való törekvés miatt a hártják önmaguktól mindig a lehető legkisebb felszínre húzódnak össze. Ha drótból készített különböző alakú, térbeli keretet kiveszünk a mosószeres oldatból, akkor mindig a legkisebb felületű elrendezést fogjuk látni. Sok esetben meglepő elrendezéseket kapunk (3. ábra).

Joseph Antoine Ferdinand Plateau (1801–1883) elsőként vizsgálta a háromdimenziós minimálfelületeket

3. ábra. Minimálfelületek





4. ábra. A katenoid PET-palackból.

ket. Az általa felállított szabályok alakítják a szappanhártyák geometriáját, és a soklapú (kevés vizet tartalmazó) szappanhabok morfológiáját is. A Plateau-szabályok:

1. Három sík felületű szappanhártya 120 fokos szögben találkozik egy élben. Ha a habot alkotó buborékok görbült felületei találkoznak, akkor a találkozási helyen az érintősíkok zárnak be 120 fokos szöget.

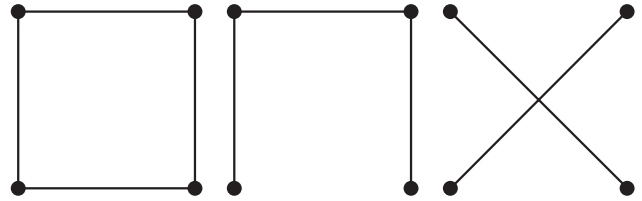
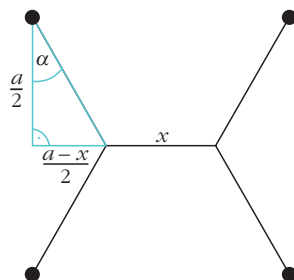
2. Négy él találkozásakor (minden élbe három hártya fut be) az élek 109,47 fokos szöget zárnak be.

Az első szabály nagyon szépen megfigyelhető, ha a kocka alakú kereten létrejövő felület közepébe egy buborékot fújunk, középen egy görbült oldalú – pufi – kocka fog kifeszülni (lásd a 3. ábra középső kép). A második szabály a tetraéder alakú drótkeret oldatba mártásával mutatható meg.

Az ilyen minimálfelületek matematikai módszerekkel történő meghatározása bonyolult probléma, de a keretek oldatba történő mártásával egy pillanat alatt adódik a megoldás, a számítógépek sem oldják meg ilyen gyorsan ezt a problémát. A Plateau-szabályok általános matematikai igazolását *Radó Tibor* végezte el 1933-ban [5], aki megmutatta, hogy az adott határgörbéjű felületek közül miként lehet a minimális felületű meghatározni.

Minimálfelületek vizsgálatánál egy nagyon érdekes görbült felületre, a katenoidra is érdemes kitérni. A

6. ábra. Balra a minimális úthálózat kísérleti vizsgálata, jobbra a geometriai viszonyok.



5. ábra. Négyzet csúcsait összekötő minimális hosszúságú úthálózat keresése.

katenuoidot definíció szerint úgy kaphatjuk meg, hogy egy láncgörbét a saját vezéregyenesé körül forgatunk meg. Ezt a felületet szappanbuborék segítségével is elő lehet állítani. Ha egy PET-palack középső részét úgy vágjuk ki, hogy a palack alsó részéből létrejött tábla beleillik a felső, tölcsér alakú rész, akkor a 4. ábra szerinti elrendezéssel könnyen elkészíthetjük ezt a felületet. E felület érdekessége az, hogy az R_1 és R_2 fő görbületi sugarak minden pontban megegyező nagyságúak, de ellentétes előjelűek. (Ha a felület valamely pontjába merőlegest állítunk és ezen át síkokat fektetünk, akkor a felületből kimetszett síkgörbék közül egy görbületi sugara maximális, az erre merőleges síkgörbéé pedig minimális. Akkor negatív egy görbületi sugár, ha a kimetszett síkgörbe a folyadékon kívülről nézve konkáv.) Ebből adódik, hogy a katenoid görbületi nyomása nulla lesz. Az eredeti hengeres palackalakat is elő tudjuk állítani, ha a palack száján keresztül levegőt fújunk be, majd befogjuk azt. Ebben az esetben már nem lesz nulla a görbületi nyomás, a belső és külső légnyomások különbségével lesz egyenlő. Ha a palack felső részét egyre feljebb emeljük, akkor felületünk egyszercsak középen befűződik.

Ugyancsak szakkörön tanulmányozhatók a minimális úthálózatok. Feladat: keressük meg a megadott pontokat összekötő utakat (minden pontból minden pontba el lehessen jutni) közül a minimális hosszúságút. Három pont esetén ezt megkapjuk, ha a pontokat összekötjük az izogonális, vagy más néven a Fermat-ponttal. Hogyan néz ki a négyzet csúcsait összekötő minimális úthálózat? Az 5. ábra bal oldala szerinti úthálózat hossza $4a$, a középső elrendezés esetén ez már csak $3a$ és a jobb oldali esetben még kisebb:

$$2 \cdot \sqrt{2} a.$$

Kérdés, hogy van-e ennél rövidebb úthálózat?

A választ kísérletileg sokkal könnyebb megadni, mint elméleti úton. Két egymással párhuzamos plexilap közé úgy tegyünk 4 darab távtartót, hogy ezek egy négyzet csúcsaiba essenek és a két lap egymástól mért távolsága körülbelül 2-3 cm legyen [3] (ezt CD-tokból és rézvezetékkel könnyen elkészíthetjük). Az egészet mártsuk mosogatószeres oldatba, majd óvatosan emeljük ki. A 4 távtartó között a minimális felületű hártya feszül ki, a lemezek állandó távolsága miatt ez éppen a minimális úthálózatot adja meg. A létrejött úthálózat akár írásvetítő segítségével is kivetíthető (6. ábra bal oldala). Érdekes a létrejött mintázat, amely két csomópontjába 3-3 hártya fut be. Méréssel igazolhatjuk, hogy

ez az úthossz valóban kisebb, mint a már említett

$$2 \cdot \sqrt{2} a.$$

Az általunk készített eszköz esetén $a = 8,8$ cm és a kapott úthossz 24,2 cm, ami valóban kisebb, mint

$$2 \cdot \sqrt{2} \cdot 8,8 \text{ cm} = 24,89 \text{ cm}.$$

Szögmérővel is meggyőződhetünk arról, hogy valóban 120° -os szöget zárnak a csomópontokba befutó hártványok.

Ha a konkrét esetre kísérletileg már megkaptuk a minimális út hosszát, akkor az általános esetre is kiszámíthatjuk. Bebizonyíthatjuk azt is, hogy teljesül a 120 fokos feltétel, azaz az egy élbe befutó három hártvány egymással 120 fokos szöget zár be. A 6. ábra jobb oldalán található úthálózat hossza:

$$l(x) = 4 \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + \left(\frac{a-x}{2}\right)^2} + x.$$

Ha ez minimális, akkor x szerinti deriváltja zérus:

$$\frac{dl(x)}{dx} = 4 \frac{2 \frac{a-x}{2} \frac{-1}{2}}{2 \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + \left(\frac{a-x}{2}\right)^2}} + 1 = 0.$$

Ebből átrendezéssel kapjuk:

$$\frac{\frac{a-x}{2}}{\sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + \left(\frac{a-x}{2}\right)^2}} = \frac{1}{2},$$

azaz $\sin \alpha = 0,5$, tehát $\alpha = 30^\circ$.

Az elrendezés szimmetriájából adódik, hogy valóban teljesül a 120° -os érintkezés.

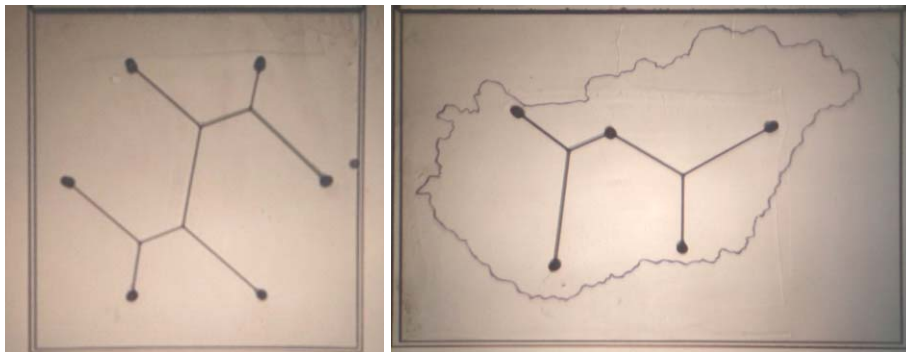
Az α szög ismeretében x értékét is kiszámíthatjuk a 6. ábrán berajzolt derékszögű háromszögből. Az α szög és a befogók kapcsolata:

$$\operatorname{tg} 30^\circ = \frac{\frac{a-x}{2}}{\frac{a}{2}},$$

amiből x értéke kifejezhető:

$$x = a \left(1 - \frac{\sqrt{3}}{3}\right).$$

Nagyon érdekes, hogy a hártvány létrejöttkor a négy csúcsponton kívül két új csomópont alakul ki. Ha



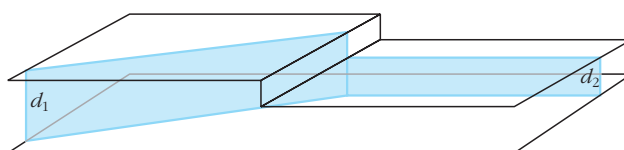
7. ábra. Hat csúcs esetén létrejövő minimális úthálózat (balra) és Magyarország néhány nagyvárosát összekötő minimális úthálózat (jobbra).

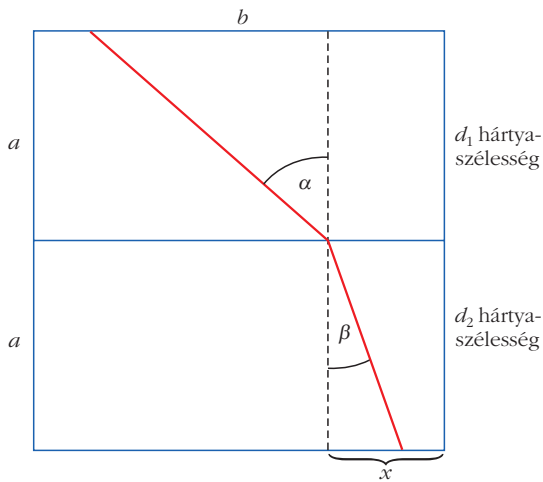
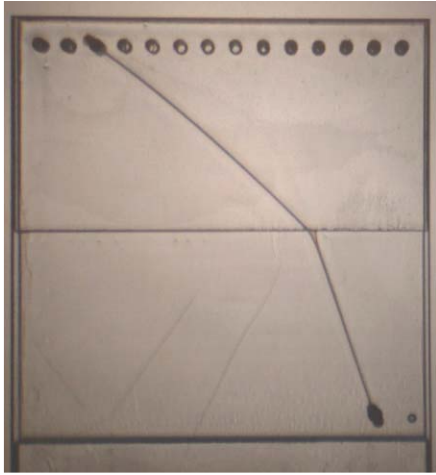
egy hatszöggel végezzük el a kísérletet (7. ábrán balra), akkor már négy csomópont fog megjelenni, minden csomópontba 3 hártvány fut be a fenti feltételnek megfelelően. Általános is bizonyítható, hogy ha n darab csúcs között szeretnénk a minimális hosszúságú utat kijelölni, akkor ehhez $(n-2)$ darab új csomópontot kell használnunk, amelyek mindegyikébe 3, egymással páronként 120 fokos szöget bezáró út fog befutni [4].

Ha Magyarország néhány nagyvárosát (Győr, Budapest, Szeged, Pécs, Debrecen) szeretnénk összekötni a lehető legrövidebb úttal úgy, hogy minden városból minden városba eljuthassunk, akkor szappanhártványval ezen úthálózat tervét is „kirajzoltathatjuk” (7. ábra jobb oldala). Persze ez az úthálózat nem veszi figyelembe a természeti akadályokat, például, hogy a Dunán vagy a Tiszán hol vannak hidak.

Mi történik akkor, ha a két plexilap közötti távolság változik? Ezt úgy lehet kivitelezni, hogy egy kisebb méretű plusz plexilapot ragasztunk egy másik plexire és ezt szembefordítjuk egy harmadik plexilappal. Így az eszköz egyik felén egymástól d_1 , a másik felén egymástól d_2 távolságra lesznek a plexilapok. Ha az elkészült eszköz két tetszőleges pontjába távtartókat helyezünk, akkor a hártvány majd ezek között fog kifeszülni (8. ábra). Ha az elkészült eszközt a mosószeres oldatba mártjuk, majd óvatosan kiemeljük, akkor a fénytöréshez hasonló jelenséget látunk (9. ábra, felül). A hasonlóság nem véletlen, mindkét esetben egy „minimumelv” teljesül. A fény a Fermat-elv szerint mindig olyan úton halad, amelynek megtételéhez szükséges idő minimális. A Hamilton féle „legkisebb hatás elve” éppen a Fermat-elv analógiájára született meg. Az első esetben az idő extremálissá válása határozza meg a fény útját, a második esetben meg a Lagrange-függvény időintegráljának, a hatásintegrál minimuma. A Hamilton féle elv egyik következménye a minimális potenciális energiára való törekvés.

8. ábra. Változó vastagságú plexilapokból készült eszköz.





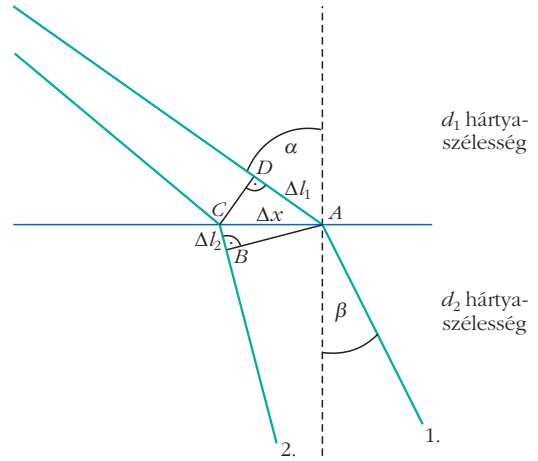
9. ábra. Hártya törése, a kísérlet felül és a geometria alul.

Ebben az esetben is igaz az, hogy minimális hártya-felszínhez tartozik a legkisebb energia. Vizsgáljuk meg, milyen összefüggés van a 9. ábrán látható α és β szögek között!

Ha egy függvénynek egy adott pontban szélsőértéke van, akkor ezen pont kicsiny környezetében a függvényérték gyakorlatilag nem változik. Ha itt csak kissé változtatjuk meg a „beesési irányt”, akkor a 10. ábrán látható 1-es és 2-es esetben is ugyanakkora lesz a kifeszülő hártya területe. Amennyivel csökken a d_1 szélességű hártya területe, annyival növekszik a d_2 szélességű hártya területe:

$$d_1 \Delta l_1 = d_2 \Delta l_2.$$

Az ACD derékszögű háromszög C csúcsánál lévő szöge α , mert az ábrán jelölt α szög és az ACD szögek merőleges szárú hegyes szögek. Hasonlóan kapjuk, hogy az ACB derékszögű háromszög A csúcsánál lévő szöge β . Ezt felhasználva:



10. ábra. Segítség a szélsőérték számításához.

$$d_1 \Delta x \sin \alpha = d_2 \Delta x \sin \beta.$$

Egyszerűsítés és átrendezés után kapjuk:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{1}{\frac{d_2}{d_1}}.$$

Igazoljuk kísérletileg a fentieket! Plexilapokból készült eszközünk felső részébe több furatot készítünk egymás mellé, így az egyik távtartó helyét változtatni tudjuk (9. ábra, felül). Valamelyik felső furatba helyezzük el a távtartót. A mosogatószeres oldatból kiemelve kifeszül a hártya. A határfelület és a hártya által bezárt szög mérésével (szögmérőt használhatunk) megadhatjuk a „beesési” és a „törési” szöget. Ha a felső pálcát egy másik furatba helyezzük át, akkor ezek a szögek természetesen változni fognak, újabb adatpárt kapunk. Mérési adatainkat az alábbi táblázat tartalmazza:

α (°)	10	13	16	19
β (°)	23	31	39	47
$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$	0,44	0,44	0,43	0,44

11. ábra. Állóhullámok szappanhártyával.



Mérési adatainkból kiszámíthatjuk a beesési és a törési szögek szinuszainak hányadosát. Jól látszik, hogy ez a hányados állandó értéket vesz fel. Ezek után tolmérő segítségével megmérhetjük a plexilemezek távolságát:

$$d_1 = 9,98 \text{ mm és } d_2 = 4,4 \text{ mm.}$$

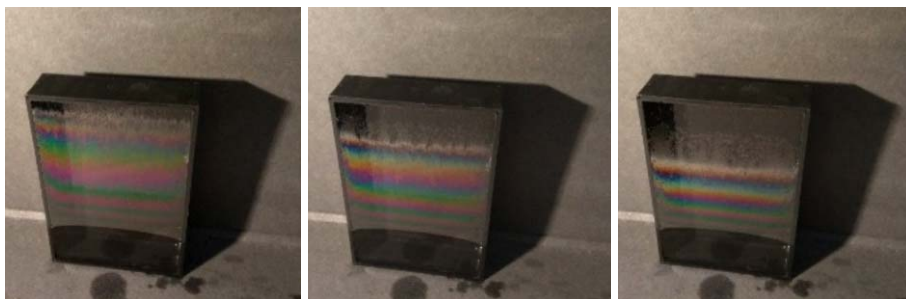
Ezek aránya:

$$\frac{d_2}{d_1} = 0,44,$$

tehát valóban visszakapjuk a mért szögek szinuszának hányadosát.

Középiskolában az állóhullámok tanításánál is szerepet kaphatnak a szappanhártyák. Réz forrasztó pálcából különféle kereteket készíthetünk. A kifevülő hártyákat akár saját magunk, vagy egy rezgékeltetővel is rezgésbe hozhatjuk. Megfelelő frekvencia esetén nagyon látványos állóhullámokat kaphatunk (11. ábra). Az ábra jobb oldalán látható kör alakú keret megfelelő frekvenciájú le-fel mozgatásával akár 3-4 csomóvonallal rendelkező állóhullámot is létrehozhatunk.

Megpróbálhatjuk megmagyarázni a szappanhártyák színeit, ha megismerjük a vékonyréteg-interferencia minden részletét. Ha egy dobozt úgy állítunk be, hogy a rá feszített hártya függőleges legyen, akkor a visszavert fényben több érdekes jelenséget is megfigyelhetünk (12. ábra). A hártya színe sávonként vál-



12. ábra. Interferencia függőleges szappanhártyán.

tozik, a színes sávok szélessége időben változik, viszont a hártya legfelső része nem színes. Az értelmezés nem egyszerű feladat, a sávok színeinek és vastagságának alakításában sok tényező játszik szerepet.

Szappanhártyákkal könnyű kísérletezni, az óvodások is ezért szeretik a buborékokat, de a tudósok számára a szappanhártyák bonyolult fizikai-kémia nano-rendszerek, amelyek még ma is aktív kutatás tárgyát képezik, s takarnak még meglepetéseket.

Irodalom

1. Jarosievitz Beáta: Tehetség gondozás hazai és nemzetközi projektekkkel. *Budapesti Nevelő* (2009/4) 90–99.
2. Jarosievitz Beáta: Fordulj a társadhoz! Saját eszközökkel megvalósított interaktív tanítási módszer a fizika oktatásában. In: *Társadalom, kulturális báltér, gazdaság*. International Research Institute s.r.o, 2016, 396–403.
3. Bérces György, Főzy István, Holics László, Isza Sándor, Juhász András, Poór András, Rajkovits Zsuzsa, Skrapits Lajos, Tasnádi Péter: *Fizikai kísérletek gyűjteménye 1*. Typotex Kiadó, Budapest, 1994, 222–225.
4. <https://es.scribd.com/doc/78830427/The-Science-of-Soap-Films-and-Soap-Bubbles-Cyril-Isenberg> 58.
5. <https://archive.org/details/ontheproblemofpl029131mbp>

TORRICELLI MEGIDÉZÉSE

Látványos barométer készült a Szegedi Tudományegyetem Juhász Gyula Pedagógusképző Kar főépületének udvarán az Általános és Környezetfizikai Tanszék gondozásában, a Kar támogatásával. Avatására 2016. november 8-án, a Tudomány Napja alkalmából szervezett kari rendezvényen került sor.



Farkas Zsuzsanna az SZTE Juhász Gyula Pedagógusképző Kar Általános és Környezetfizikai Tanszékének tanszékvezető főiskolai tanára. Tanulmányait – kémia-fizika tanári szakon – a JATE-n végezte, PhD-fokozatát fizikából a SZTE-n kapta. Fizika szakmódszertannal foglalkozik, több egyetemi jegyzet, középiskolai tankönyv szerzője, tudományos ismeretterjesztő feladatot lát el fizikából. Legutóbbi kitüntetései: Pro Juventute Emlékplakett 2015. JGYPK, Rektor Elismerő Oklevél 2017. SZTE.

Farkas Zsuzsanna, Mező Tamás, Torma Gábor
Szegedi Tudományegyetem, Juhász Gyula Pedagógusképző Kar
Általános és Környezetfizikai Tanszék

A monumentális kísérleti eszköz – amely az idei, Szegeden tartott, 61. Középiskolai Fizikatanári Anket és Eszközbemutatón különdíjban részesült – valójában a híres Torricelli-kísérlet „vizes” változata. A higan helyett vizet, illetve – a téli hidegre is gondolva – praktikusán fagyálló oldatot tartalmazó cső az alkal-



Mező Tamás a Continental AG ContiTech IFS kutatás-fejlesztési csoportvezetője. Fizikusként végzett az SZTE-n, később a BME-n és az SZTE Mérnöki Karán gépészmérnök diplomát szerzett. A Szegedi Tudományegyetemen óraadóként az Elméleti Fizikai Tanszéken, besugárzás tervezőként az Onkoterrápiás Klinikán dolgozott, és tanársegéd volt az Általános és Környezetfizikai Tanszéken. Jelenleg folyamatban van PhD fokozatszerzése műszaki anyagtudományból a Miskolci Egyetemen.



megfelelően kisebb, mint a vízzel való feltöltéskor. Meg kell jegyezni, hogy a leolvadt értéket a hőmérséklet erősen befolyásolja, elsősorban a folyadék feletti gőznyomás hőmérsékletfüggésén keresztül. Eddigi méréseink alapján – amelyekről egy további cikkben szándékozunk részletesen beszámolni – azt állíthatjuk, hogy barométerünk átlagban 1,6%-nyi pontossággal alkalmas a légnyomás mérésére.¹

A Torricelli-cső üzembe helyezése

A kísérlet bemutatásának első lépéseként a cső alján elhelyezkedő golyós csapot elzárjuk, majd a csövet – lassan adagolva, hogy minél kevesebb buborék képződjön – a folyadékkal felülről, az épület

A fagyálló hűtőfolyadékkal feltöltött Torricelli-cső a Szegedi Tudományegyetem Juhász Gyula Pedagógusképző Kar főépülete udvari liftjének oldalán.

második emeleti Természetismereti Tudástár ablakából teljesen megtöltjük. Ezután membrános dugóval lezárjuk a cső tetejét, majd kinyitjuk alsó csapot. Ekkor a folyadék egy része visszafolyik a csőből a tartályba, a folyadék felett vákuum keletkezik, és jól látható módon a folyadék azonnal gyors párolgásba és forrásba kezd.

Ennek következtében már nem vákuum, hanem a folyadék gőze tölti ki a folyadék feletti teret, kellően hosszú idő elteltével pedig – a cső méretei, a lassú feltöltés stb. miatt² – *gyakorlatilag* az adott hőmérséklethez tartozó telített gőz jön létre, aminek nyomását a hidrosztatikai nyomás értékéhez hozzá kell adni.

A víz, illetve az etilénlikol-oidat sűrűségének megfelelően körülbelül 10, illetve mintegy 9,5 m-es magasságban állapodik meg a folyadék a csőben.

A Torricelli-csőről és üzembe helyezéséről Karunk tv-stábja (JGY TV) kisfilmet készített, amely az Interneten elérhető [4].

Munkafolyadékként etilénlikol-tartalmú fagyálló hűtőfolyadék 50%-os vizes oldatát használjuk, ezért a rendszer $-36\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ig állandóan feltöltve tartható és használható. A kereskedelmi forgalomban autók hűtőfolyadékként kapható Glicosam eleve színezett, így a folyadékszint jól látható a csőben. Az alkalmazott hígításnál az oldat sűrűsége 7,6%-kal nagyobb a víznél, ezért a folyadékoszlop magassága ennek

1 Méréseinkben a korrekciót úgy végeztük el, mintha víz lenne a munkafolyadék, egyrészt azért, mert a víz telített gőze nyomásának hőmérsékletfüggése táblázatokból ismert, és azért, mert az alkalmazott Glicosam-oldat a használt hígításnál körülbelül 85% vizet tartalmaz. Méréseink és számolásaink során – a korrekcióval együtt is – mindig kisebb értéket kapunk, mint a – szegedi – meteorológiai állomás adata. A tapasztalt eltérésben egyértelműen szerepet játszik, hogy a víznél nagyobb molekulásúlyú oldat gőznyomása biztosan nagyobb, mint a vízé.

2 Meg kell jegyezni, hogy a csövet a fenti módon demonstrációs bemutatásnál töltjük fel, de folyamatos légnyomásmérés előkészítésekor több napot várunk a feltöltés és a teljes lezárás között, hogy a levegőbuborékok eltávozhassanak a folyadékból, sőt, többször megismételjük a lezárást-kinyitást, hogy a forrás előidézésével minimalizáljuk a folyadék levegőtartalmát. Ekkor mondhatjuk, hogy kellően hosszú idő elteltével gyakorlatilag a folyadék telített gőze tölti ki a cső feletti teret.



Torma Gábor az SZTE ötödéves fizika-matematika osztatlan tanárszakos hallgatója. Több féléve demonstrátor az SZTE JGYPK Általános és Környezetfizikai Tanszékén, valamint az SZTE TTIK Bolyai Intézetében is. Az SZTE Eötvös Loránd Kollégium lakója, a Kollégiumban működő Fizika Műhely és Matematika Műhely aktív tagja.

Történeti előzmények

Evangelista Torricelli olasz természettudós – fizikus és matematikus – 1643-ban higanyt használva ugyanezen elven mérte meg a levegő nyomását. Emlékére a légnyomás egyik, ma is használt mértékegysége a torr, amely egy 1 mm magas higanyoszlop súlyából származó hidrosztatikai nyomással egyezik meg. A kísérlet fizikaoktatásunkba Torricelli-kísérlet néven került be. Magyarozatához, illetve megértéséhez az az kell tisztában lennünk, hogy minden gáz és folyadék a súlya miatt nyomást fejt ki az alatta lévő rétegre. Ez a p nyomás a folyadék ρ sűrűségétől és h magasságától, illetve a g nehézségi gyorsuláson keresztül a földrajzi magasságtól és szélességtől is függ:

$$p = \rho g h.$$

Torricelli 1608. október 15-én született Faenzában. Korán árvaságra jutott, ezért nagybátyja, a művelt szerzetes vette kezébe az ifjú Torricelli nevelését. Ő volt az, aki a fiú érdeklődését a tudományok és a kísérletezések irányába vezette. Nagybátyja közreműködésének hála, a tizenhét éves Torricelli *Galilei* egyik neves tanítványához, a Rómában matematikát tanító *Benedetto Castellibez* került, akinek nemcsak tanítványa, de jó barátja is lett. Castelli mellett legfőképpen matematikával, mechanikával foglalkozott, ügyességének köszönhetően távcsövekbe való lencsékét csiszolt. Castelli ajánlására 1641-ben az ekkor már előrehaladott korú – és főképp vaksága miatt segítségre szoruló – Galilei Firenzébe invitálta. A mester hívta fel figyelmét arra a gyakorlati problémára, hogy a toszkánai szivattyúk nem képesek a vizet tíz méternél mélyebbről a felszínre juttatni. Hasonló problémával küzdöttek a bányászok is: a bányászati szivattyúk sem voltak képesek tíz méternél nagyobb mélységből kiemelni a vizet. Galilei maga nem tudta a választ, elképzelése szerint a víz minden bizonnyal „elszakad” a saját súlya alatt. Torricelli volt az első, aki a levegő nyomásával magyarázta a kútások és a bányászok problémáját, és azt mondta, hogy valójában nem „csak” a szivattyú szívja fel a vizet, hanem a légnyomás nyomja fel, tehát a légnyomás aktuális értéke a legfontosabb tényező az említett jelenségekben. Ezen jelenség alapján már erősen sejtette, hogy a légnyomás körülbelül 10 m magas vízoszlop hidrosztatikai nyomásával tart egyensúlyt.



Torricelli arcképe Lorenzo Lippi³ festményén [5] (balra), és Torma Gábor matematika-fizika szakos tanárjelölt, mint Torricelli egy R. Fuess Berlin–Steglitz márkájú higanyos barométerrel (jobbra).

Torricelli érdeme az is, hogy kitalálta, miként lehet a levegő nyomását kényelmesen és pontosan megmérni. A módszer lényege, hogy víz helyett higanyt használt. Mivel a higany majd 14-szer sűrűbb a víznél, ezért az aránynak megfelelően kisebb, 76 cm magas folyadékoszloppal már mérhető a légnyomás. Ekkora méretben pedig már üvegcső is létezett abban a korban, így látványosan demonstrálhatóvá vált a jelenség.

Torricelli, többször megismételve a kísérletet, észrevette, hogy a higanyoszlop magassága változik, amit a légnyomás *változásával* hozott összefüggésbe, tehát valójában feltalálta a légnyomás mérésére alkalmas eszközt, azaz a barométert. A történeti igazsághoz hozzátartozik, hogy először nem ő végezte el a higanyos kísérletet, hanem tanítványának, *Vivianinak* adta mintegy házi feladatul.

Sajnos mestere, Galilei tanítását és atyai pártfogását nem sokáig élvezhette Torricelli, mert Galilei három hónappal Torricelli érkezése után elhunyt. Halála után Torricelli vissza akart térni Rómába, de a toszkánai nagyherceg, *II. Ferdinando Medici* (1610–1670) a matematika professzorává és firenzei udvari matematikussá nevezte ki, s ezzel maradásra bírta őt Firenzében.

Az itt töltött idő alatt Torricelli legfőképpen távcsövek javításával, tökéletesítésével foglalkozott. Nevét őrzi a Torricelli-tétel – amely egy nagy térfogatú tartályból a tartály alján, kis nyíláson át kiömlő folyadék áramlási sebességét adja meg a folyadékmagasság függvényében –, továbbá a ciklois alatti terület kiszámítására alkalmas formula megadása is.

Fiatalon, 39 éves korában, 1647. október 25-én – valószínűleg hastífuszban – hunyt el Firenzében. Az egyik legöregebb és legnagyobb becsben tartott templomban, a Mediciék temetkezéséül is szolgáló San Lorenzóban helyezték örök nyugalomra.

³ *Lorenzo Lippi* (1606–1665) itáliai költő és festő. Csak névrokon-ságban van a reneszánsz festőzseni *Filippo Lippivel* (1406–1469).

Vákuum vagy nem vákuum?

Ne felejtjük el, hogy az 1600-as években vagyunk, amikor a „horror vacui”, azaz „a természet irtózik a vákuumtól” problémája is a köztudatban van, mint a természetfilozófusok egyik fontos megválaszolandó kérdése. Ezért volt a Torricelli-kísérletet követő évek központi problémája, hogy mi lehet a Torricelli-csőben a higany felett? Az Arisztotelész-hívők úgy gondolták, hogy ott nem lehet vákuum, a folyadék is azért emelkedik fel a csőben, mert így kerülhető el a vákuum kialakulása. A Descartes-hívők szintén azon az állásponton voltak, hogy ott nem lehet vákuum, de a felemelkedés okát – helyesen – már a légnyomásban látták.

Blaise Pascal francia természetfilozófus, matematikus (1623–1662) volt az, aki minden kétséget kizáróan, nagyon sok kísérletezés után, tisztán értelmezte a Torricelli-kísérletet. Ő volt az, aki a jelenség folyadéksűrűség-től való függésének bizonyítására látványos kísérletet tervezett és mutatott be, és így – megint csak kísérleti alapon – választ adott arra a kérdésre, hogy mi lehet a „Torricelli-úrben”. A sűrűségfüggés igazolására Pascal hajóárbochoz erősített 14 méter magas csövek egyikébe vizet, a másikba vörösbort szivattyúzott fel, nagy számú, ötszáz főnyi közönség előtt. Az Arisztotelész-hívők megbizonyosodhattak afelől, hogy a vörösbortban nem nagyobb a „szellem”, hanem ellenkezőleg, mivel a bor kisebb sűrűségű, mint a víz, ezért egységnyi hossza kisebb nyomást fejt ki, tehát a bor ezért kúszik magasabbra a csőben, mint a víz.

1648. szeptember 19-én Pascal útmutatása alapján Pascal sógora, *Florin Périer* történelmi kísérletet végzett el a Franciaország közepén, Párizstól délre, mintegy háromszáz kilométer távolságra elhelyezkedő Puy de Dôme hegyen, a hegy lábától 950 méter magasságban [6]. Pascal ugyanis úgy gondolkodott, hogy ha a Torricelli-csőben a higany elhelyezkedését a légnyomás határozza meg, akkor a kísérlet eredményének függenie kell a tengerszint feletti magasságtól. A gondos kísérlet azt mutatta, hogy a hegy lábánál és a hegytetőn elhelyezett üvegcsőben a megállapodó higanymagasság valóban nem azonos. A hegytetőn levő „barométer” kisebb légnyomást jelzett, a két higanymagasság között 8,1 cm volt az eltérés. Ez volt az *experimentum crucis*, azaz a döntő kísérlet, amely a jelenség lényegét bizonyította, a „horror vacui” elvet elvetette, és egyben megalapozta a később, *Halley* által leírt barométeres magasságformulát, ami ma is alapjául szolgál például a repülőgépek magasságmérésének.

A „Torricelli-úrben” egyébként nagyon rövid ideig van vákuum, azután pedig – bár nem azért, mert a természet irtózik az ürességtől, hanem a csövet kitöltő folyadék gyors párolgása miatt – az adott folyadék telített gőze tölti ki a felette lévő teret. A telített gőz nyomása erősen hőmérsékletfüggő, ezért a folyadék magassága – a levegő hőmérsékletétől függően – a 11 méteres csőben néhány tíz centimétert is változhat. Magasabb hőmérsékleten a folyadékmagasság kisebb, mert a gőznyomás nagyobb. Ezt a változást kísérleti eszközünk nagyon jól mutatja.

A Torricelli-túra Karunkon

A Szegedi Tudományegyetem Juhász Gyula Pedagógusképző Kar főépületében található Természetismereti Tudástár Fizika Tárában további, a légnyomáshoz kapcsolódó kísérleteket láthatnak és végezhetnek el a látogatók.

Ezen kísérletek között szerepel több, vákuumszivattyú segítségével elvégezhető kísérlet: a léggömb viselkedésének vizsgálata csökkenő külső nyomás mellett, a víz forráspontja nyomástól való függésének bemutatása egy pohár víz segítségével, a gázokban fellépő felhajtóerő szemléltetése az úgynevezett dasy-méter (sűrűségmérő) segítségével, a magdeburgi-féltékés kísérlet stb., valamint a „legyőzhetetlen papír”-kísérlet, amely egy fémlapra helyezett papírlap okán gondolkodtatja el a látogatót a légnyomás nagysága felől. Továbbá találkozhatunk a nyomáskülönbség miatt összeroppanó konzervdobozzal, különböző nyomásmérő eszközökkel, és a gályatartó hal tapadókorongjának működését modellező praktikus eszközökkel is.

A légnyomással kapcsolatban szerzett tudás a látogatás végén egy 13+1 kérdést tartalmazó egyszerű totóval tesztelhető.

Az egész évben látogatható *Toricelli-túrán* kívül a fizika népszerűsítésére szervezett *Fizika Napja*, *A fizika mindenkié*, *Múzeumok Éjszakája*, *Kutatók Éjszakája* rendezvényeken a szerencsés látogatókat maga Torricelli fogadja, aki nemcsak bemutatja a monumentális udvari barométert, hanem életútjáról beszélve, fizikatörténeti előadást is tart. A természettudományok tanításának ez utóbbi módszere, az úgynevezett *out-door módszerek* közé tartozik, amely szakítva a hagyományos környezettel új terepre, tulajdonképpen színpadra viszi a fizikát. A színpadi elemek és fogások, a korhű jelmezek, parókák, az irodalmi nyelvezet, a fizikatörténeti momentumok mint drámapedagógiai eszközök mind-mind nagy szolgáltat tesznek a fizika népszerűsítéséért.

Megemlítjük, hogy a középiskolai fizikatanárok számára szervezett 2008-as CERN-i kirándulás során a fizikatanár-kollégák egy csoportja kálium-permanganáttal színezett víz és vörösbort segítségével is elvégezte a kísérletet a francia Alpokban. Erről és hazai – a Csongrádi Batsányi János középiskola aulájában végzett – méréseikről a *Fizikai Szemle* hasábjain számoltak be [7].

Irodalom

1. Czöglér Alajos: *A fizika története életrajzokban*. Királyi Magyar Természettudományi Társulat, Budapest, 1882, <http://mek.oszk.hu/03500/03574/html> (2018-03-01)
2. Simonyi Károly: *A fizika kultúrtörténete*. Gondolat Kiadó, Budapest, 1986.
3. <http://www.puskas.hu/ttk/elet/85.html> (2018-03-01)
4. <https://vimeo.com/182173758> (2018-03-01)
5. [https://en.wikipedia.org/wiki/Evangelista_Toricelli#/media/File:Evangelista_Toricelli_by_Lorenzo_Lippi_\(circa_1647,_Galleria_Silvano_Lodi_%26_Due\).jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Evangelista_Toricelli#/media/File:Evangelista_Toricelli_by_Lorenzo_Lippi_(circa_1647,_Galleria_Silvano_Lodi_%26_Due).jpg) (2018-03-01)
6. http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2011-0064_69_fizikatorteneti_szovegyujtemeny/ar01s04.html (2018-03-01)
7. Szabó László, Szittyai István, Sükösd Csaba: A Torricelli-kísérlet. *Fizikai Szemle* 59/1 (2009) 20–25.

GÁBOS ZOLTÁN, 1924–2018

Április elején elhunyt *Gábos Zoltán*, az MTA külső tagja, a kolozsvári Babeş-Bolyai Tudományegyetem híres fizikaprofesszora, minden(!) erdélyi fizikus, kémikus Zoli bácsija. Annak idején (a '60-as években) fiatalabb volt, mint most a gyerekeim, mindenki kedvelte és tisztelte, a diákokhoz való közelsége, emberi magatartása és óriási tudása folytán csak így maradt meg bennünk.

A közelség – az óriási tudástávolság mellett – nem a ma szokásos bratyizást jelentette, hanem a mindennapjaink problémái iránti valódi érdeklődést-segítőkészséget. Egy személyes történet talán jobban megvilágítja egyedi segítőkészségét. A barátnóm francia szakos diák volt a Marianumban, és egy lyukasórájában eljött megkeresni engem a Farkas utcai épületben. A második emeleten szoktam volt lenni, ott volt saját munkasztalom, de éppen akkor nem tartózkodtam a laborban. A folyosón összefutott Gábos Zoltán professzor úrral, a dékánnal, aki ismerte őt, tudta, hogy bizonyára engem keres, ezért felajánlotta a segítségét, együtt kutattak utánam. Bejártak ungot-berket, mindenhova benyitottak, de nem találhattak meg, mert az egyik alagsori műhelyben esztergáltam valamit egy ketyerémhez. *Ezt nevezem a diákokhoz való közelségnek és őszinte segítségnek. A legkisebb dolgokra is odafigyelt.*

A '90-es évek közepén a nagyváradi Ady Endre Liceumban voltam fizikatanár, éppen az adiabatikus állapotváltozást tanítottam, a tábla tele volt az abszolút hőmérséklet T jelével, az asztalon pedig a kísérlet. Egy osztályban sem szoktam kihagyni a poént, hogy ne rajzoljam fel, és ne meséljem el kedves tanárom gyönyörű T -betűs képleteit és táblarajzait. Mintha megéreztem volna a közeledtét, mert az óra végén Gábos Zoltán nyitott be a Fizikumba. Illendően fogadtam, és bemutattam a diákoknak, akik megtapsolták az élő legendát, és kezdtek hinni a különös véletlenek megvalósulhatóságában.

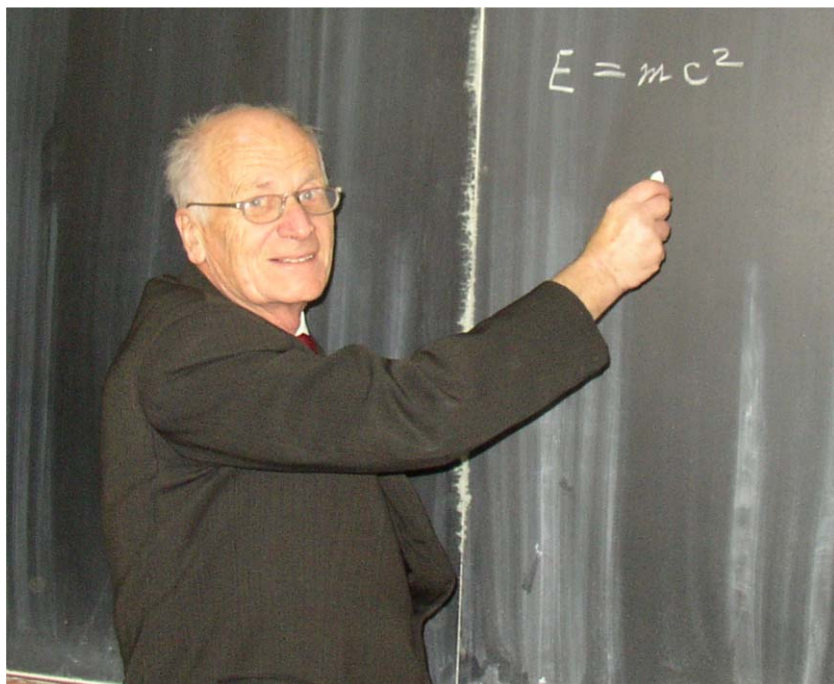
Egy évvel azelőtt, Kolozsváron járva felkerestem, érdeklődött a kísérleteim iránt. Elmeséltem az egyikkel kapcsolatos küszködéseimet, egy érthetetlen és elfogadhatatlan anomáliát. Váradon járva erről szeretett volna tovább beszélgetni. Lyukas órám következett, ezért bemutattam neki a kísérletet, és akkor is jelentkezett a számítógép-vezérelt légpárnán végigfutó (inkább végigrepülő) kiskocsi pálya közepi gyorsulásmaximuma, de a választ nem találtuk. Ma már tudom, hogy nem is találhattunk magyarázatot, mert az igen

pontosnak tartott mérőrendszer hiába volt szinte tökéletes, a valós kísérletben nem tudtam eléggé lecsökkenteni a mechanikai beállításokból származó hibát (μm nagyságrendű, elvileg mérhetetlen távolságról van szó). Azóta, mintegy éve, az Atomórával támogatott, sokszorosán pontosabb mérőrendszeremmel sikerült bebizonyítanom, hogy az anomália bár elkerülhetetlen, de mértéke szinte az eltűnéséig csökkenthető. Ma már nem tudom elmondani neki, pedig bizonyára érdekelné. *A Fizikai Szemle* olvasóinak nemsokára feltárom a két évtizedig bátortalanul hitt, de valójában nem létező anomália okát. *Egy ilyen látogatást nevezek én valódi érdeklődésnek, és nem is ez volt az egyetlen a Fizikum történetében.*



Az előadásai (nem lehet egyszerűen óráknak nevezni) követni való minták voltak, olyan színvonalon tartotta őket, amelyet senki sem tudott felülmúlni, sem megközelíteni. Mindig felkészülten, jegyzetek nélkül jött az amfiteátrumba, táblavázlatait, képleteit a tökéletesség igényével „rajzolta”, így könnyen megértettük az egyetemi éveink alatt leadott igen nehéz fogalmakat. Jegyzeteink tökéletesek voltak, mindent kiszámolt a táblán, nem maradt nehezen megoldható, magyarázat nélküli „házi feladat”. (Bizony-bizony, egyesek óráin a megsárgult jegyzetekből nehezen kimásolható képletgyűjtemény sokszor nem került fel a táblára, a matematikai-fizikai kibogozásukat nekünk kellett [volna] befejeznünk. Ez nem mindig sikerült, vagyis alig értettük meg a tanóra lényegét.) *Gábos Zoltán tanári mintaképem lett, pedig én igen messze állok az elméleti fizikától.*

Nem voltak megsárgult jegyzetei, laptopja, kivetítője, mutatópálcája és okos lézerpointerre, csak krétával a kezében vívta meg harcát velünk, érettünk. Az előadásai nem a „megmutatom nektek, mit tudok” kategóriába tartoztak, ő tanítani jött, végtelen tudásából óriási adagokat adott át, és tette ezt mosolyogva, szerényen. Egy alkalommal a Boltzmann-állandó értékét valamiért nem merte fejből felírni, egy gyufás skatulyát vett elő (nem dohányzott), és – elpirulva – az állandó értékét arról másolta fel a táblára. Tőle nem krétafizikát kaptunk, hanem étellel teli képleteket, mindent értelmezett, és mélyre nyúlva megmagyarázott. Éreztük, hogy nemcsak tanítja, de műveli is a nekünk prezentált tudományát. *Mindig megértett kurzussal hagytuk el az amfiteátrumot.*



adását, amely oly pontosan „belőtt” volt, mint mindig. A tanár úron csöppet sem látszott az átvirrasztott éjszaka sötét, a képletek és a magyarázatok belső kapcsolatait talán még élénkebbek voltak, mint máskor.

Egy ilyen Tanárral szemben nem tehetjük meg, hogy készületlenül menjünk vizsgázni, de ha mégis megakadtunk, segítő kérdéseket tett fel. Így a szokásos vizsgadrukk nem gátolt meg bennünket tudásunk előadásában. Mindig kedves, mosolygós arca többet hozott ki belőlünk, mint más tanárok szigorú tekintete. Az átvett tudás mellett a – talán sokkal értékeesebb – magatartáspéldát is magunkkal vittük, és megpróbáltuk azt is továbbadni. A kolozsvári BBTE színt minden tanárát, kutató fizikusát, professzorát tanította. *Diplománk egy része, akármilyen szakirányt is követtünk, biztosan az ő érdeme, neki is köszönhető.*

Nyugodt, csendes embernek ismerte mindenki. Bárhol találkoztunk, a mosolygós köszönésén túl, mindig volt egy-két kedves szava, váltottunk néhány mondatot. Mindig tanított, de nem tartott hivatalos fogadóórákat, bármikor megszólíthattuk és konzultációszerűen bármit kérdezhettünk. Ha hosszabb magyarázatra és képletekre volt szükség, akkor előkerült egy vékony, rövid, régimódi, zöld töltőceruza vastag ceruzabéllel (annak idején nem volt más), és már bújtak is ki belőle a képletek, ő pedig örömmel magyarázott, de főleg értelmezett. *Örült, hogy segíthetett, mert Tanár volt!*

Az egyik – számomra – legszebb órája egy tavaszon volt, amikor a felsőéves diákok bankettet tartottak. A bankett utáni reggelen mi az Elektromosságtan amfi-teátrum ablakaiból láttuk, amint kijött a bankettnek otthont adó Egyetemiek házából, majd belépett az Egyetem épületébe. Néhány perc múlva – 9:30-kor, az órarend szerint – megkezdte szokásos, háromórás elő-

Ez nem egy szokásos nekrológ, hiszen Gábos Zoltán sem volt egy szokásos tanár. Az életrajzi adatait akarattal hagytam ki, a száraz adatok a Wikipédián megtalálhatók. Gábos Zoltán a hivatalos adataiban bemutatott címeznél, publikációknál sokkal több volt, az ő értékeit csak hálás emberi szavakban tudjuk megközelíteni. Én inkább olyan egyszerű, személyes történeteket választottam, amelyek *ötven év múltán is megmutathatják tanári nagyságát és egyben mindenkibe való közelségét, talán megismételhetetlenségét is. Az ideit, jubileumi találkozónkon már nem foghatunk vele kezét, pillantásunkban nem érezheti az örökös hálánkat...*

Zoli bácsi, nyugodjon békében! Emlékét sok szeretettel megőrzi az egykori Bolyai, majd a Babeş-Bolyai Tudományegyetem minden volt fizikus és kémikus diákja.

Bartos-Elekes István
BBTE, 1968.



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

Támogasd adód 1%-ával az Eötvös Társulatot!

Adószámunk: 19815644-2-43



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 főtítkár, 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: 900.- Ft (duplaszámé 1800.- Ft) + postaköltség.

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



Tornell et al.