

fizikai szemle

A photograph of the Aurora Borealis (Northern Lights) in green over a lake at night. The aurora is visible as bright, flowing green curtains in the dark sky. The lake below reflects the lights and the dark silhouettes of trees and buildings along the shore. The overall scene is serene and captures a natural wonder.

2017/3

FROM TEACHERS
FOR TEACHERS

2017. JÚNIUS 29. – JÚLIUS 2.

INVENTING THE FUTURE OF SCIENCE EDUCATION

SCIENCE ON STAGE FESZTIVÁL 2017, DEBRECEN

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

SCIENCE ON STAGE 2017
DEBRECEN

THE EUROPEAN NETWORK OF SCIENCE TEACHERS

SZERVEZŐK:



Debreceni Egyetem
UNIVERSITY OF NATIONAL EXCELLENCE
NEMZETI KIVÁLÓSÁGI EGYETEM



Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

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

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat havonta megjelenő folyóirata.

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

Főszerkesztő:
Szatmáry Zoltán

Szerkesztőbizottság:

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

Szerkesztő:
Lendvai János

Műszaki szerkesztő:
Kármán Tamás

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

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

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



A címlapon:

Északi fény a finnországi Jakobstad fölött
2015. október 7-én, lásd Gróf Andrea írását
a 89–93. oldalakon.

TARTALOM

Oláh László, Balogh Szabolcs, József, Hamar Gergő, Varga Dezső, Gera Ádám László, Nyitrai Gábor, Pázmándi Zolt Péter, Surányi Gergely: Képzőművészeti kozmikus részecskék nyomkövetésével
Kozmikus müonokkal megvalósított ígéretes módszer hegységek, vulkánok átvilágítására 74

Hraskó Péter: Planck és Einstein
Igaz-e, hogy 1905-ben Einstein csak megsejtette a tömeg-energia relációt, és a szigorú bizonyítást két évvel később Planck adta meg? 78

Kardos Ádám: Numerika a Higgs-bozon körül
Az LHC-ben 2012-ben felfedezett új részecske tulajdonságainak minél pontosabb megmérése alapján dönthető el, hogy valóban a standard modell Higgs-bozonját találták-e meg 84

A FIZIKA TANÍTÁSA

Gróf Andrea: Honnan fúj a szél, avagy okosabb-e egy ötödikes, mint Sylvester Stallone?
Filmekben sokszor hibásan bemutatott és a köznevelésben gyakran tévesen értelmezett környezeti jelenségek alapjainak középiskolai oktatásban is használható fizikai leírása 89

Horváth Zsuzsa: Exobolygók minden szinten
A fizika kerettanterv új tartalmi elemeinek egyike az exobolygók kutatása és a földön kívüli élet keresése 93

Finta Zsanett, Mitre Zoltán: Hőmérsékletmérés napfogyatkozáskor
– a kutatásalapú tanulás alkalmazása
A 2015. március 20-i teljes napfogyatkozás adatainak elemzése diákokkal végzett mérés segítségével 100

KÖNYVESPOLC

Hraskó Péter: Relativitáselmélet (Bokor Nándor) 104

Arthur Koestler: Alvajárók (Radnóti Katalin) 105

HÍREK – ESEMÉNYEK

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat 2017. évi Küldöttközgyűlése 107

Kitüntetések március 15. alkalmából 108

L. Oláh, Sz. J. Balogh, G. Hamar, D. Varga, Á. L. Gera, G. Nyitrai, Zs. P. Pázmándi, G. Surányi: Imaging via cosmic particle tracking
P. Hraskó: Planck and Einstein
Á. Kardos: Numerics around the Higgs boson

TEACHING PHYSICS

A. Gróf: From where the wind blows or: is a fifth grader smarter than Sylvester Stallone?
Zs. Horváth: Exoplanets on all ranges
Zs. Finta, Z. Mitre: Application of inquiry-based learning on temperature measurements during solar eclipse

BOOKS

P. Hraskó: Theory of Relativity (N. Bokor)
A. Koestler: The Sleepwalkers (K. Radnóti)

EVENTS

Fizikai Szemle
MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT
megjelenését támogatják:



KÉPALKOTÁS KOZMIKUS RÉSZECSKÉK NYOMKÖVETÉSÉVEL

Oláh László, Balogh Szabolcs József, Hamar Gergő, Varga Dezső – MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont
Gera Ádám László, Nyitrai Gábor, Pázmándi Zsolt Péter – Budapesti Műszaki- és Gazdaságtudományi Egyetem
Surányi Gergely – MTA-ELTE Geológiai, Geofizikai és Űrtudományi Kutatócsoport

Motiváció

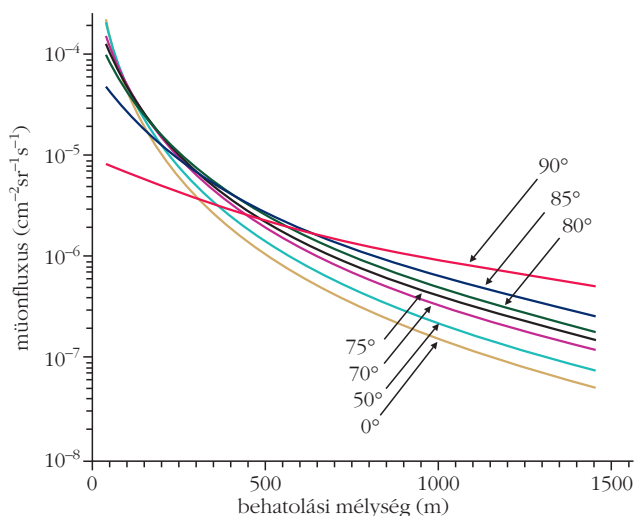
A kutatókat mindig motiválta, hogy képet alkossanak különböző dolgok belsejéről, kezdve az emberi testtől, a történelmi építményeken keresztül, akár a hegyekig. A részecskefizika forradalma új lehetőségeket nyitott a képalkotás terén is: az egyik első úttörő kísérletet *Wilhelm Conrad Röntgen* végezte el 1896-ban, aki az addig ismeretlen X-sugarakkal (röntgensugárzással) alkotott képet felesége kezéről egy fotografikus lemezre.

A részecskékkel történő képalkotásnak újabb lökést adott a müonok 1936-os felfedezése. A müonok természetes forrása az elsődleges kozmikus sugárzás (főleg protonok, alfa-részecskék) és a légkört alkotó O_2 , N_2 -molekulák kölcsönhatásában keletkező pionok, kaonok bomlása. A kozmikus müonok viszonylag hosszú élettartamúak ($2,2 \mu s$), így fénysebességhez közeli sebességük okozta relativisztikus effektusok segítségével eljutnak Földünk felszínére is. Széles energiatarományon, körülbelül 100 TeV (10^{14} eV) energiáig detektálhatók. Az elektron nagy testvéreinek is nevezzük a müont, mert az elektronéval megegyező fizikai tulajdonságokkal (töltés, spin) rendelkezik, kivéve tömegét, amely körülbelül 200-szor nagyobb az elektronénál.

A müonok anyagon történő keresztülhaladásuk során elsősorban ionizációval veszítenek energiájukból: közelítőleg 2 MeV/cm a müonok energia-vesztése egységnyi sűrűségű anyagon történő keresztülhaladásuk során. A legnagyobb energiájú müonok akár több km vastagságú kőzetben is áthaladnak. Az 1. ábra mutatja a különböző zenitszögben érkező kozmikus müonok fluxusának csökke-

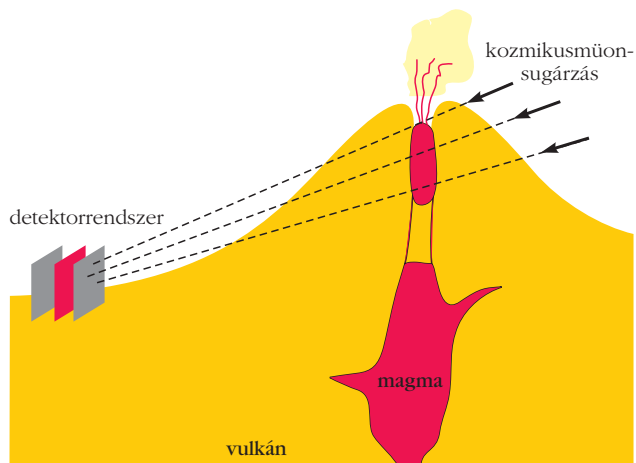
nését az áthatolt kőzet vastagságának növekedésével [1]. Az elnyelődés mértéke arányos az anyag vastagságával és sűrűségével, a sűrűség-hossz (vastagság $\times$ sűrűség). A fluxust az anyagban történő elnyelődés mellett a müonok keletkezése is befolyásolja. Nagyobb zenitszögben vastagabb a légkör és nagyobb valószínűséggel bomlanak el a pionok és a kaonok, amely folyamatok több nagyenergiás müont eredményeznek. Emiatt a nagyobb zenitszögben érkező müonok fluxusa dominál a kőzetvastagság növekedésével.

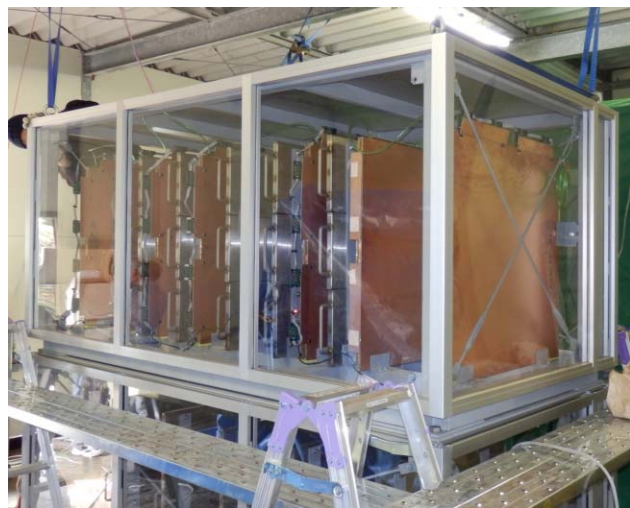
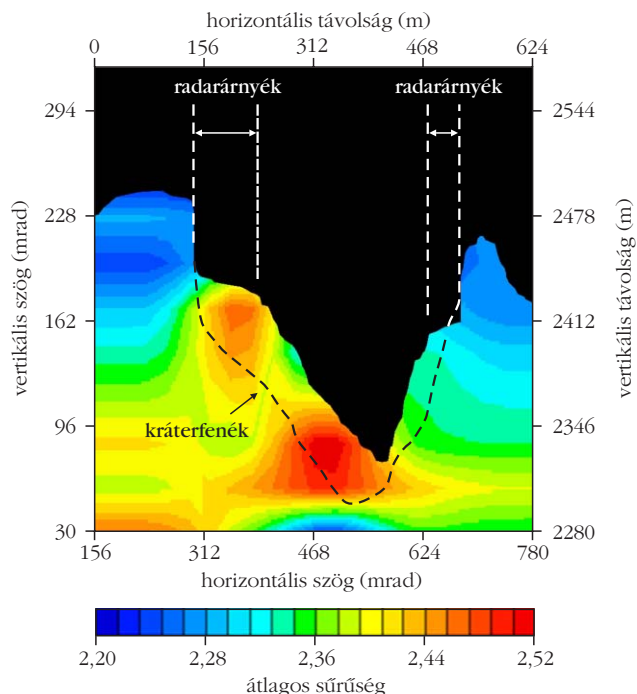
1. ábra. Fölül a különböző zenitszögben érkező kozmikus müonok fluxusának csökkenése a $2,65 \text{ g cm}^{-3}$ sűrűségű kőzetbe történő behatolás mélységének növekedésével. Alul a mérési elrendezés egy vulkán belsejéről történő képalkotás esetén.



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

Az MTA Innovatív Detektorfejlesztő Kutatócsoport (REGARD) a gázöltésű részecskedetektorok projektorientált kutatás-fejlesztésével foglalkozik. Hozzájárul az Európai Részecskefizikai Laboratórium (CERN) ALICE és NA61 kísérletei továbbfejlesztéséhez, valamint az RD51 együttműködés keretében aktívan részt vesz a gáz elektronsokszorozó-detektorok (GEM) kutatás-fejlesztésében. Továbbá neutrondetektorokat fejleszt a European Spallation Source (ESS) kísérleti együttműködésnek. Az alapkutatások és cikkekben bemutatott alkalmazott kutatások mellett a REGARD csoport lehetőséget biztosít középiskolás diákoknak, fizikus- és mérnök-hallgatóknak laboratóriumi gyakorlatokra, a kísérleti részecskefizika alapjainak elsajátítására. A csoport kutatásait a Magyar Tudományos Akadémia Lendület Programjának LP2013-60 számú pályázata támogatja.





2. ábra. Fölül az Asama-vulkánról készített müográf a vulkán 2004-es kitörése után. Müon-radiográfiával detektálták a kráter alján lerakódott $2,45\text{--}2,52\text{ gcm}^{-3}$ sűrűségű lávát $400\text{--}600$ mrad horizontális és $60\text{--}120$ mrad vertikális szögtartományon. A szaggatott vonal mutatja a radar képalkotásának mélységét [1]. Alul a sokszálas proporcionális kamrákból felépülő Müografikus Megfigyelő Rendszer első prototípusa [5, 6].

A müonok detektálásával képet alkothatunk nagy-méretű dolgok belsejéről is: a vizsgált objektumon keresztülhaladó kozmikus müonok fluxusát mérve – az objektum a sűrűségének ismeretében – kiszámolhatjuk annak vastagságát, vagy vastagságának ismeretében sűrűségét. Ezt az eljárását müon-radiográfiának, röviden müográfának nevezzük. A 20. század közepétől kezdődően müon-radiográfiával is végeznek régészeti kutatásokat a gízai piramisokban, rejtett, föld alatti üregeket és nagysűrűségű érceket tárnak fel barlangokban, illetve bányákban elhelyezett müondetektorokkal. Továbbá vulkáni kürtők sűrűségváltozását méri az 1. ábra alsó részén látható módon [1].

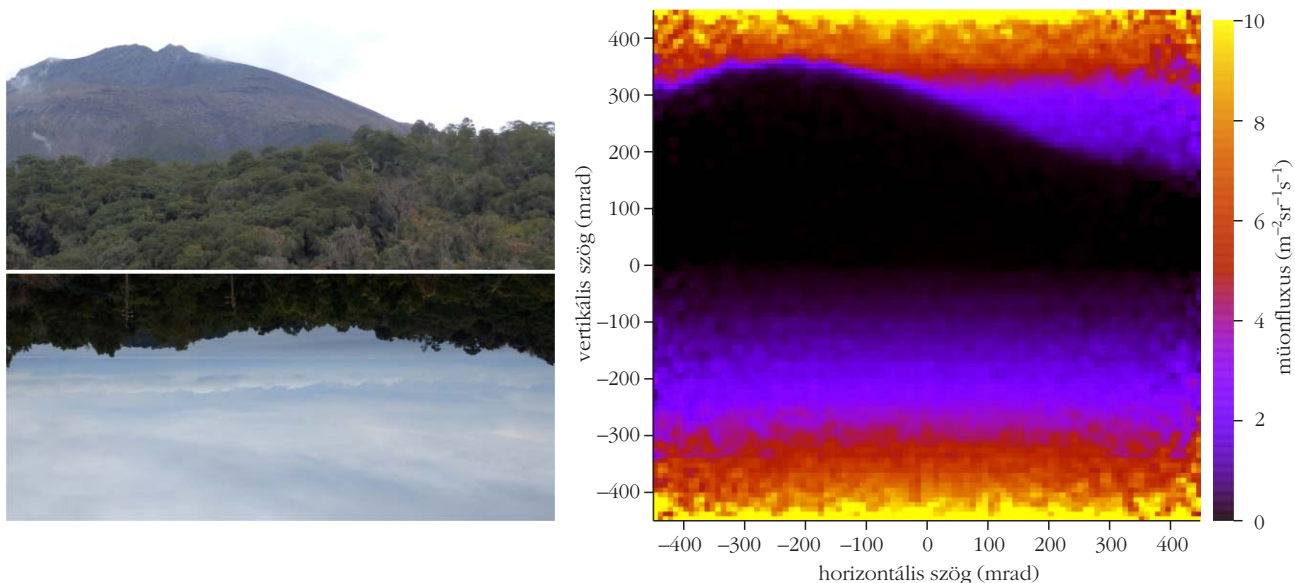
A müonok az anyagon történő áthaladásuk során – az elnyelődés mellett – irányt is változtatnak (többszörösen szóródnak), eltérülésük az anyag sűrűségével közelítőleg arányos. Ha a vizsgált objektumot detektorokkal vesszük körül, megmérjük a müonok irányát az anyagba történő belépése előtt, valamint a kilépése után, akkor információt kaphatunk a vizsgált anyag sűrűségeloszlásáról. Ezen eljárás lehetséges alkalmazásai például a nukleáris csempészáruk detektálása, vagy az atomreaktorok szerkezetének vizsgálata.

A részecskedetektor-technológia fejlődése a 21. század elejére lehetővé tette a megbízható, hosszú távú, folyamatos emberi felügyeletet nem igénylő mérések végzését laboratóriumon kívül is. Az MTA Wigner FK Lendület Innovatív Detektorfejlesztő Kutatócsoport motivációja müon-radiográfiára optimalizált gáztöltésű detektorrendszerek és képalkotó eljárások fejlesztése a fentebb említett környezeti és ipari alkalmazásokra. Csoportunk kifejlesztett egy hordozható részecskedetektort föld alatti üregek és sűrűséginhomogenitások kutatására, amely első sikeres alkalmazásait a [2] és [3] cikkekben ismertettük. Jelen írás a vulkánok belsejének és a kis sűrűségű anyagok képalkotására koncentrál.

Vulkáni tevékenység vizsgálata kozmikus müonok detektálásával

A vulkánok belső szerkezetéről történő képalkotás, a kitörések előrejelzésének és monitorozásának társadalmi haszna megkérdőjelezhetetlen: hatalmas katasztrófákat és gazdasági károkat előzhet meg – gondoljunk csak az izlandi Eyjafjallajökull-vulkán 2010-es kitörésére és az európai légi közlekedés megbénulására.

A müon-radiográfia egy kiváló eljárás a vulkáni tevékenység képalkotására, jól kiegészíti a hagyományos geofizikai, például szeizmikus és elektromos módszereket. A müon-radiográfia nagyobb térfogatról képes képet alkotni jobb helyfelbontással (néhány 10 m). További előnye, hogy nagyobb távolságról, akár több km -ről is képet alkothatunk a vulkán belsejéről. A müon-radiográfiával előállított sűrűségterképekből a kitörés nagyságára és időtartamára következtethetnek a geológusok. A 2. ábra felső részén található az első „müográf” egy aktív vulkán belsejéről, amelyen jól látható a kráter alján lerakódott $2,45\text{--}2,52\text{ gcm}^{-3}$ sűrűségű láva a $400\text{--}600$ mrad horizontális és $60\text{--}120$ mrad vertikális szögtartományokon [1]. Az Asama-vulkán 2004-es kitörése után *H. K. M. Tanaka* és munkatársai emulziós detektorokat helyeztek el 1 km távolságra a krátertől és $10\text{ mrad} \times 10\text{ mrad}$ pontossággal megmérték a vulkánon keresztülhaladó kozmikus müonok fluxusát. A 3 hónapos mérés során $3,2\%$ pontossággal határozták meg az Asama-vulkán sűrűségét $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ felbontás mellett. A következő út-törő mérést is Tanaka és munkatársai végezték el Satsuma-Iwojima-vulkán 2013-as júniusi és júliusi kitö-



3. *ábra.* Balra a detektorrendszer előtt elhelyezkedő Sakurajima-vulkán (felső) és a detektor mögötti tenger és égbolt (alsó) fényképe. Jobbra a Müografikus Megfigyelő Rendszer első képe a Sakurajima-vulkánról.

rései során [4]. Szcintillátorokból felépített, 2 m^2 felületű, 10 cm-es szegmentálságú detektorrendszert helyeztek el a vulkánnál, és 3 napos időtartamú mérésekkel nyomon követték a láva mozgását a kráter belsejében.

Távlati cél a sűrűségterképek 12 órás időfelbontással történő elkészítése, a kitörések jellegének, időtartamának előrejelzése. A vulkánok átvilágításának mindennapos megvalósításához és széles körű alkalmazásához költséghatékony, kisebb fogyasztású ($< 50 \text{ W}$), nagyobb felületű (több 10 m^2), jobb helyfelbontású ($< \text{cm}$) detektorrendszerek alkalmazása szükséges.

Erre a célra az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont és a Tokiói Egyetem együttműködésének keretében kifejlesztettünk egy gáztöltésű detektorrendszert, a *Müoográfias Megfigyelő Rendszert* (Muographic Observation System) [5, 6]. A detektorrendszer gáztöltésű, két dimenzióban érzékeny sokszálas proporcionális kamrákból épül fel, amelyek nyomkövetési határfoka közel 100%, helyfelbontása 4 mm mindkét irányba és 10 mrad szögfelbontás is elérhető a kamrák megfelelő elhelyezésével. A kamrákban $+1700 \text{ V}$ nagyfeszültséget alkalmazunk az anódszálokon az optimális nyomkövetési határfok eléréséhez. A mérések során argon és szén-dioxid gázok 80:20 arányú keverékét áramoltatjuk keresztül a detektoron. Ez egy nem gyúlékony, nem mérgező, olcsó keverék, amely kiválóan használható laboratóriumon kívül is.

A kamrák jeleit a föld alatti detektorainknál is alkalmazott elektronikák segítségével erősítjük, digitalizáljuk, majd továbbítjuk a mérést vezérlő RaspberryPi mikroszámítógépeknek. A részecskék kamrákban hagyott nyomainak koordinátái egy 16 GB-os SD-kártyára gyűlnek, amely körülbelül 8 hónap alatt telik meg a szabad ég alatt mért részecskeráta ($\sim 10 \text{ Hz}$ $0,6 \text{ m}^2$ -es kamrákkal) mellett. A detektorrendszer folyamatosan elérhető kábeles vagy vezeték nélküli (Wifi, Hotspot) internet-

kapcsolat segítségével, ezáltal lehetőség van az adatok folyamatos elérésére és elemzésére, a müonfluxus és a sűrűségterképek folyamatos (online) elkészítésére. A detektorból érkező adatokat a nagyenergiás fizikában is alkalmazott adatelemzési módszerekkel dolgozzuk fel: megkeressük a kamrákon a részecskebeütések helyét, majd egy kombinatorikus algoritmussal megkeressük a részecske legvalószínűbb, a beütésekre legjobban illeszkedő pályáját. Ezután meghatározzuk a müonok irányát, majd fluxusát a detektor geometriájának és határfokának figyelembevételével.

A kamrák között ólomlemezeket kell elhelyeznünk a detektor jel/zaj viszonyának maximalizálása céljából, ugyanis a lemezekben elnyelődnek vagy irányt változtatnak a légkörből és a talajból a detektorba szóródó, azaz nem a vulkánon keresztül érkező kisenergiás ($< 1 \text{ GeV}$) müonok és a kozmikus sugárzás elektromágneses komponensében érkező elektronok és pozitronok. Minél pontosabban mérjük a detektoron keresztülmenő részecskék pályáját, azaz minél jobb a detektor helyfelbontása, annál kevesebb lemez szükséges a részecskék irányváltoztatásának kiméréséhez. A 2013-ban Satsuma-Iwojima-vulkánál alkalmazott detektorrendszerben öt darab 10 cm vastagságú ólomlemez és tartóelemeket (összesen körülbelül 14000 kg) kellett elhelyezni a szcintillátorlemezektől rosszabb (10 cm) helyfelbontása miatt. A 4 mm helyfelbontású, gáztöltésű detektorrendszer alkalmazásával az ólomlemez vastagsága körülbelül 10 cm-re csökkenthető. A 2. *ábra* alsó részén látható a detektorrendszer fényképe.

A Müografikus Megfigyelő Rendszer első prototípusának tesztelését Japánban a Kjúszu-szigetén található Sakurajima-vulkánál végezzük 2017. január 18. óta. A mérés célja a detektorrendszer hosszú távú működésének, stabilitásának vizsgálata, praktikus alkalmazhatóságának demonstrálása. A 3. *ábra* bal oldali felső fényképen látható a detektor előtt elhelyezkedő

vulkán, az alsó, fordított fénykép a detektor mögött található tengert és az égboltot mutatja, a jobb oldalon a néhány nap alatt rögzített adatokból $6 \text{ mrad} \times 6 \text{ mrad}$ szögfelbontással számolt fluxus látható, amely a fényképekkel konzisztens képet ad és a vulkán alakját mutatja.

A fentebb bemutatott eredmények és új fejlesztések azt mutatják, hogy vulkánok működésének vizsgálata kozmikus müonok nyomkövetésével ígéretes kutatási terület. A részecskefizikusok és a földtudományok szakértőinek összefogása nagy társadalmi haszonnal rendelkező eljárás létrejöttéhez vezethet.

Kis sűrűségű anyagok képalkotása

A kozmikus müonok elnyelődésén és szóródásán alapuló eljárások alkalmazhatók kis sűrűségű anyagok képalkotására, azonban relatíve sok idő (több nap) szükséges az anyagok detektálásához és megkülönböztetéséhez.

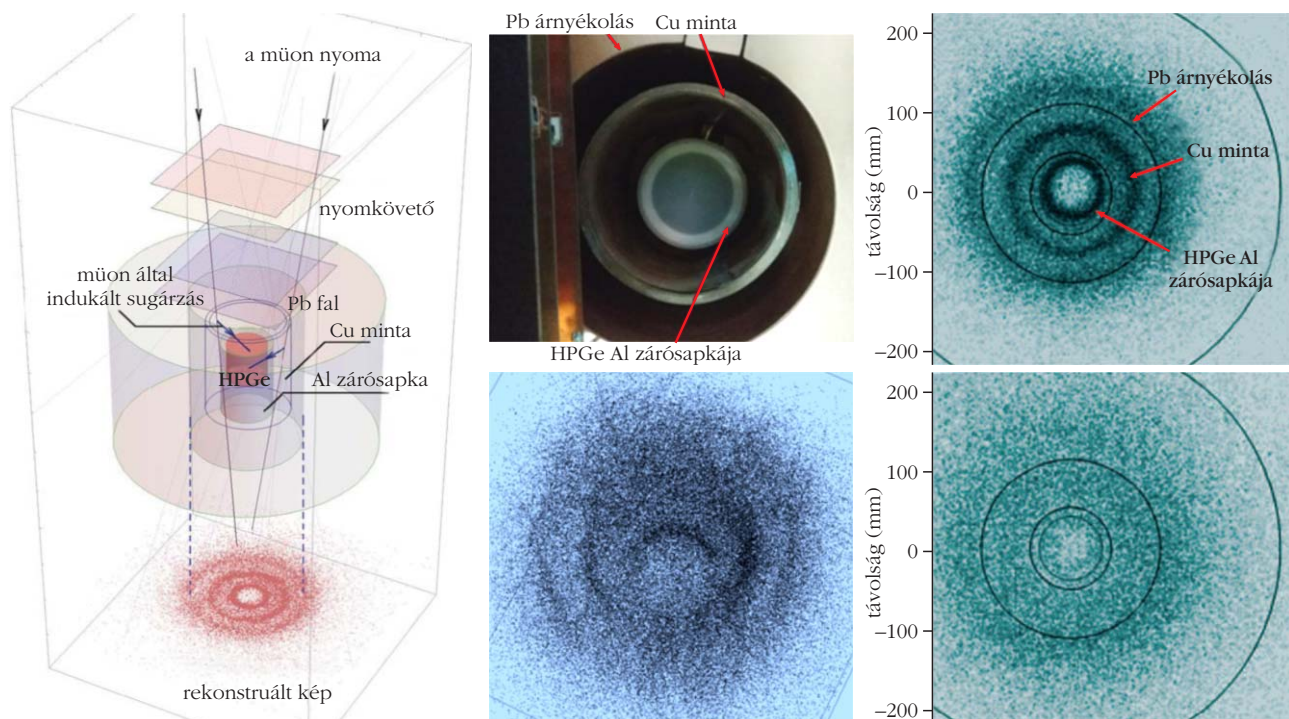
Kis sűrűségű anyagok képalkotására kifejlesztettünk egy berendezést az Újvidéki Egyetem (University of Novi Sad) munkatársaival, amely egy közeli katódos kamrákon (CCC) [7] alapuló nyomkövető detektorból és egy nagytisztaságú germániumdetektorból (HPGe) épül fel [8]. A 4. ábra bal oldalán látható a mérési elrendezés vázlatos rajza. A berendezés a következőképpen alkot képet a HPGe-detektorba helyezett kis sűrűségű mintáról, például az ábrán látható réz cilinderről: a HPGe-detektor felett elhelyezett

CCC-alapú nyomkövetővel megmérjük a müonok pályáját $1,5 \text{ mm}$ -es helyfelbontással, a müonok ionizációja által keltett elektronok fékeződnek a minta anyagát alkotó atomok magjának környezetében (fékezési sugárzás) és az elveszített mozgási energiájuk sugárzássá alakul, fotonok keletkeznek, amelyeket a HPGe-vel detektálunk, energiájukat megmérjük. A HPGe-detektor a CCC-kamrák együttes jelére végez mérést körülbelül $1 \mu\text{s}$ átlagos késleltetéssel. Kiválogatva azokat az eseményeket, amelyekben a müonok mellett $6,4 \text{ MeV}$ -nél kisebb energiájú fotonokat is detektáltunk, a müonok nyoma kirajzolja a mintát. A minta képét alkotó pontok száma az anyag sűrűségével arányos.

A 4. ábra közepén és jobb oldalán látható egy mérési elrendezés a réz mintával (középen fent), a mintáról az új módszerrel készített kétdimenziós (jobbra fent) és háromdimenziós (középen alul) képek, valamint a mérési elrendezés szimulációja (jobbra alul). A képek elkészítése 12 órányi adatfelvételt igényelt, amely durván egy nagyságrenddel kevesebb idő, mint ami a müonok elnyelődésén vagy szóródásán alapuló eljárásokhoz szükséges. Jól láthatóan elkülönül egymástól a réz minta és a HPGe-detektor alumínium fala. A HPGe-detektor kristályáról nem alkotunk képet, mert a müonok 60 MeV energiájú fotonokat keltenek benne, amelyek a fentebb említett $6,4 \text{ MeV}$ -es energiavágás felett vannak.

Szcintillátordetektorok felhasználásával építettünk egy alkalmazásközi berendezést is, amely segítségével csontokról és élő szövetekről alkottunk képet

4. ábra. Balra a kozmikus müonok és a másodlagos fotonok együttes detektálásán alapuló képalkotási eljárás sematikus rajza [8]. Középen és jobbra az első, kozmikus müonok nyomkövetésével előállított képek egy kis sűrűségű anyagról: a mérési elrendezés fotója (középen fent), a mérési elrendezésről készített kétdimenziós kép (jobbra fent), a mérési elrendezés három dimenziós képe (középen alul) és a mérési elrendezés alatt készített kép (jobbra alul) [8].



néhány óra időtartamú mérésekkel [9]. Következő fejlesztések és mérések célja a kis sűrűségű anyagok azonosítása, valamint a leképezés észszerűbb időtartamra (néhány perc) történő csökkentése.

A fenti eredmények demonstrálják a kis sűrűségű anyagok képalkotására kifejlesztett berendezés és az eljárás működését. Jelen eredmények felkeltették az európai fizikus szakma érdeklődését: cikkünkéről rövid leírás jelent meg a *CERN Courier* 2016/07 és az *Europhysics News* 2016/08 lapokban.

Irodalom

1. H. K. M. Tanaka és mtsai., *Earth and Planetary Science Letters* 263 (2007) 104–113.

2. L. Oláh, G. G. Barnaföldi, G. Hamar, H. G. Melegh, G. Surányi, D. Varga, *Advances in High Energy Physics* (2013) 560192.
3. Surányi G., Molnár G., Barnaföldi G., Hamar G., Melegh H., Oláh L., Varga D., *Karsztfejlődés XXI.* (2016) 203–216., DOI: 10.17701/16.203-216
4. H. K. M. Tanaka és mtsai., *Nat. Commun.* (2014) 5:3381. doi: 10.1038/ncomms4381.
5. D. Varga, G. Hamar, G. Nyitrai, L. Oláh, *Advances in High Energy Physics* (2016) 1962317.
6. G. Hamar, T. Kusagaya, L. Oláh, H. K. M. Tanaka, D. Varga: *Muographic Observation System* (2016) PTZATA153, szellemi tulajdon
7. D. Varga, G. Kiss, G. Hamar, Gy. Bencédi, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* 698 (2013) 11.
8. I. Bikit, D. Mrdja, K. Bikit, J. Slivka, N. Jovancevic, L. Oláh, G. Hamar, D. Varga, *European Physics Letters* 113 (2016) 58001.
9. D. Mrdja, I. Bikit, K. Bikit, J. Slivka, J. Hansman, L. Oláh, D. Varga, *European Physics Letters* 116 (2016) 48003.

PLANCK ÉS EINSTEIN

Mrskó Péter
PTE Elméleti Fizika tanszék

A cím félrevezető, mert csak egyetlen nézőpontból szándékozunk a két tudós teljesítményét összehasonlítani egymással. A kérdés ugyanis, amelyre megpróbálunk válaszolni, a következő: jogos-e *Einstein* tekinteni a tömeg-energia reláció egyedüli felfedezőjének, vagy inkább azt kell mondanunk, hogy 1905-ben Einstein csak *megsejtette* ezt a relációt, amelynek szigorú *bizonyítását* két évvel később *Planck* adta meg? Ez utóbbi nézetet képviseli például *A fizika kultúrtörténete* című impozáns kötetében *Simonyi Károly*, aki szerint „...a tétel általános kijelentése itt [Einsteinnél] még csak egy zseniális sejtés, amely még pontos megfogalmazásra és bizonyításra vár”, és majd csak *Planck* vezeti le 1907-ben általános formában.¹

Mint ismeretes, 1905-ben Einstein két dolgozatot publikált a relativitáselméletéről. Már az első (júniusi) dolgozatban elemzi az elmélet szinte minden lényeges aspektusát, de a tömeg-energia relációról ebben a munkájában még egyáltalán nem esik szó. Ezt a rendkívüli jelentőségű tételt csak három hónappal később publikálja lakonikus (szeptemberi) közleményében.² Első feladatunk ezen munka elemzése.

A szeptemberi dolgozat

Képzeljünk el egy m tömegű testet, amely a $\mathbb{K}$ inerciarendszerben nyugszik és egy adott pillanatban kibocsát két teljesen egyforma elektromágneses hullámcsomagot (gondolhatunk klasszikus fényjelre vagy fotonra is, egyre megy), amelyek pontosan egymással ellentétes irányban haladnak. A két csomag energiája egyenként legyen $\varepsilon/2$. 1905-ben már lehetett tudni, hogy a két hullámcsomagnak impulzusa is van, amely az energiájuk c -ed része:

$$p = \frac{\varepsilon}{2c}.$$

Mivel azonban a két csomag $\mathbb{K}$ -ban pontosan ellenkező irányban mozog, a test impulzusát meghagyják nullának, az E_0 *belső (vagy nyugalmi) energiáját* azonban ε -nal csökkentik. Ha az emisszió utáni mennyiségeket felülvonással különböztetjük meg az emisszió előttiektől, akkor az energiamegmaradás tételét $\mathbb{K}$ -ban az

$$E_0 = \bar{E}_0 + \varepsilon \quad (1)$$

képlet fejezi ki.

Szemléljük most *ugyanazt a folyamatot* $\mathbb{K}$ x -tengelye mentén v sebességgel pozitív irányban mozgó $\mathbb{K}'$ koordináta-rendszerből! Ehhez a koordináta-rendszerhez viszonyítva a test az emissziós folyamat előtt $-v$ sebességgel mozog, ezért energiája – a változatlanul E_0 -val egyenlő *belső energia mellett* – még valamekkora K mozgási energiát is tartalmaz, amely a test sebességének (pontosabban a sebesség abszolút értékének) és tömegének függvénye: $K = K(v, m)$. Az emissziót megelőzően tehát a test teljes energiája $\mathbb{K}'$ -ben

$$E' = E_0 + K(v, m). \quad (2)$$

A hullámcsomagok emissziója után a test $\mathbb{K}$ -ban nyugalomban marad, ennek következtében a $\mathbb{K}'$ -ben

Köszönetemet fejezem ki cikkem bírálójának, aki egy súlyos tévedésre mutatott rá az eredeti kéziratban.

¹ Lásd a könyv első, 1978-as kiadásának 350–351. oldalát.

² A szeptemberi cikk magyar fordítása megtalálható az *Albert Einstein válogatott írásai* (Typotex 2010) gyűjtemény 104. oldalán. A kötet sajnos a júniusi dolgozatnak csak az első felét tartalmazza.



Mrskó Péter az Urali Állami Műszaki Egyetemen 1957-ben elektromérnöként diplomázott, majd 1994-es nyugdíjba vonulásáig a KFKI-ban dolgozott, először mag-, később elméleti részecskefizikusként. Az ELTE-n Hamilton-mechanika, a BME-n általános relativitáselmélet kollégiumot tartott. 1989–2000-ig a Pécsi Tudományegyetem középiskolai fizikatanár-képzésének beindításában vett részt. Főbb könyvei: *A könyvtár foglya* (2001), *Biztos, hogy az energia megmarad?* (2012), *Relativitáselmélet* (2016).

megtartja eredeti $-v$ sebességét. Tömege azonban az emisszió következtében megváltozott, ezért $\mathbb{K}'$ -beli energiája az emissziót után a következő:

$$\bar{E}' = \bar{E}_0 + K(v, \bar{m}). \quad (3)$$

Ahhoz, hogy $\mathbb{K}'$ -ben is felírassuk az energiamegmaradás egyenletét, át kell számítanunk a két hullámcsomag $\mathbb{K}$ -beli ε összenergiáját $\mathbb{K}'$ -be. Tegyük fel, hogy $\mathbb{K}$ -ban az egyik csomag φ szöget zár be az x -tengellyel (a másik csomag szöge ekkor $\varphi + \pi$). Ezt a feladatot Einstein már a júniusi cikkben megoldotta és egy $\mathbb{K}$ -ban e energiájú, az x -tengellyel φ szöget bezáró csomag $\mathbb{K}'$ -beli energiájára az

$$e' = e \frac{1 - \frac{v}{c} \cos \varphi}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (4)$$

képletet kapta. Esetünkben mindkét csomagra $e = \varepsilon/2$, de a terjedési irányuk ellentéssége miatt a számláló koszinuszos tagjának előjelében különböznek egymástól. A két csomag $\mathbb{K}'$ -beli energiájának összegéből ezért a koszinuszos tag kiesik, és ennek következtében ez az összeg

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

értékkel egyenlő.

A $\mathbb{K}'$ -ben tehát az energia megmaradását az

$$E_0 + K(v, m) = \bar{E}_0 + K(v, \bar{m}) + \frac{\varepsilon}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

képlet fejezi ki, amely (1) felhasználásával a

$$K(v, m) - K(v, \bar{m}) = \varepsilon \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right) \quad (5)$$

alakba írható át.

E képletben a v -t tetszőlegesen választhatjuk meg, és ami bennünket érdekel, az a v -tól független konstans m és $\bar{m}$ kapcsolata. Olyan v -t kell tehát választanunk, amely az (5) alapján a két konstans tömeg összefüggésének legegyszerűbb meghatározását teszi lehetővé. Elég nyilvánvaló, hogy erre a célra az *infinitesimálisan kis v* – pontosabban a $v \ll c$ határeset – a legalkalmasabb.

Az (5) jobb oldala „a negyed- és magasabb rendű mennyiségek” elhanyagolása után

$$\varepsilon \frac{v^2}{2c^2}$$

kifejezéssel egyenlő. A bal oldalon a mozgási energia relativisztikus alakját Einstein vehette volna a júniusi dolgozat 10. paragrafusából, de a $v \rightarrow 0$ határesetben erre nem volt szüksége. Abból az általános követelményből kiindulva ugyanis, hogy ebben a határesetben a relativitáselmélet a newtoni mechanikába megy át, jogosan használhatta a

$$K = \frac{mv^2}{2}$$

képletet. Eszerint

$$\frac{v^2}{2} (m - \bar{m}) = \varepsilon \frac{v^2}{2c^2}, \quad (6)$$

ahonnan $v^2/2$ -vel történő osztás és (1) kihasználása után megkapjuk a tömeg-energia relációt az

$$m - \bar{m} = \frac{E_0 - \bar{E}_0}{c^2}$$

alakban: a belső energia megváltozása a tömeg megváltozásának c^2 -szeresével egyenlő.

Biztos, hogy ugyanezt az eredményt kapnánk akkor is, ha tetszőleges (c -nél kisebb) v -t választanánk az $\bar{m}$ és az m kapcsolatának meghatározására? Mivel a tömeg és a belső energia fogalmukból következően a koordináta-rendszer választásától független invariáns mennyiségek, ezért – ha a relativitáselmélet követelménye alapján Lorentz-transzformációval térünk át a v sebességgel mozgó koordináta-rendszerre – kölcsönös kapcsolatukra minden v -nél ugyanazt az összefüggést kell kapnunk. Erről egyébként könnyen meg lehet győződni, ha (5)-ben a kinetikus energiára a júniusi cikkben levezetett

$$K(v, m) = mc^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right) \quad (7)$$

képletet használjuk az $mv^2/2$ határeset helyett.

Mint látjuk, Einstein nem az $E_0 = mc^2$ relációt, hanem az ennél gyengébb $\Delta E_0 = \Delta mc^2$ törvényt bizonyította be. Ez a korlátozás annak következménye, hogy a bizonyítás az energia (és az impulzus) megmaradásán alapul, és megengedi, hogy a testek tömegének legyen olyan része, amely – a newtoni fizika tömegfogalmához hasonlóan – egyáltalán nem függ össze a belső energiával. De minden jel szerint bizonyosra vette, hogy az *egész tömeg* a belső energiához kötődik.

A bizonyítással szemben az a bírálat is elhangzott, hogy a törvény csak arra a speciális emissziós folyamatra érvényes, amely a bizonyítás alapja. Ez a kritika azonban nem állja meg a helyét, mert egy izolált test termodinamikai állapotát belső energiájának megváltozása határozza meg az energia közlési módjától függetlenül; ha dQ hőt közlünk egy testtel, a tömege dQ/c^2 -tel megnő.

Ezen ellenvetésre Einstein közleménye végén kitér: „Nyilvánvalóan lényegtelen, hogy a testtől elvett energia éppen sugárzási energiává alakul át, úgyhogy az alábbi általánosabb következtetésre jutunk:

A testek tömege energiatartalmuk mértéke;³ ha energiájuk ϵ -nal változik, tömegük ugyanolyan értelemben $\epsilon/9 \cdot 10^{16}$ -nal változik, ha az energiát jouleban, a tömeget pedig kg-ban mérjük.⁴”

Einstein bizonyításával szemben a *Fizika kultúrtörténetében* megfogalmazott bizalmatlanság azonban egy sokkal súlyosabb állításon alapul: azon, hogy a szeptemberi cikk bizonyítása logikailag elfogadhatatlan, mert *körkörös*.

A körköröség vádja

A könyv idézett helyén ugyanis ezt olvassuk:

„A hivatásszerűen fizikátörténettel foglalkozó kutatók színre lépésével, mint ahogy ezt már több ízben láttuk, sok régi fizikátörténeti közhely átértékelése szükségessé vált. Igen sokszor az átértékelés ellenére is a közhely közhely maradt. 1951-ben ugyanis H. E. Ives kimutatta, hogy az Einstein fenti [szeptemberi] cikkében adott levezetés alapvetően hibás; a bizonyítás elején Einstein plauzibilis feltevéseket vezet be, amelyek segítségével jut el azután a tömeg és az energia közötti kapcsolathoz. Ives éppen azt mutatja be, hogy a kiinduló feltételekben burkoltan benne van a levezetni kívánt kapcsolat: bizonyításánál tehát a petitio principii-nek nevezett logikai hibát követi el. (akkor esünk a petitio principii hibájába, ha a bizonyítás kiinduló feltételeibe – nyíltan vagy burkoltan – belecsempésszük azt az állítást, amelyet éppen bizonyítani akarunk).”

Vegyük hát elő Herbert Eugene Ives⁵ dolgozatát⁶ és nézzünk bele. Az Einstein-féle bizonyítás kritikáját a cikk Függelékében találjuk meg.

Ives bírálatainak középpontjában a (2), (3) képletek állnak, amelyek korrekt formája szerinte a következő:

$$E' = E_0 + \frac{\epsilon}{(m - \bar{m}) c^2} K(v, m) \quad (2')$$

és

$$\bar{E}' = \bar{E}_0 + \frac{\epsilon}{(m - \bar{m}) c^2} K(v, \bar{m}). \quad (3')$$

³ Ez a megfogalmazás megalapozatlan, mert a bizonyítatlan $E_0 = mc^2$ relációt fejezi ki. Tény azonban, hogy a későbbi fejlemények igazolták Einstein.

⁴ A jelölést és az egységeket megváltoztattam.

⁵ Herbert Eugene Ives (1882–1953) a 20. század első felében az elektrooptikai kutatásokat irányította az AT&T Bell-laboratóriumában. A húszas években rövid ideig az Amerikai Optikai Társaság elnöke. A fizikában az 1938-ban publikált Ives–Stilwell-kísérlet tette a nevét ismertté, amelyben először nyert kísérleti igazolást a transzverzális Doppler-effektus. Ez a jelenség az idődilatáció egyenes következménye, ezért az Ives–Stilwell-kísérlet az idődilatáció kísérleti igazolásának is tekinthető. Ives maga azonban nem fogadta el a relativitáselméletet és a kísérlet eredményét másképpen interpretálta.

⁶ H. E. Ives, *J. Opt. Soc. Am.* 42 (1952) 540. A cikk letölthető: www.conspiracyoflight.com/Ives/HerbertIvesDerivation.pdf



Herbert Eugene Ives (1882–1953) a 20. század elején.

Azzal, hogy ezek helyett Einstein a gondolatmenetének kiindulópontjába a (2), (3) képleteket állította, hallgatólagosan feltételezte, hogy az

$$\frac{\epsilon}{(m - \bar{m}) c^2}$$

faktor 1-gyel egyenlő. De ezzel éppen a bizonyítandó

$$\epsilon = (m - \bar{m}) c^2$$

állítását előlegezte meg, ezért körkörös a bizonyítása.

Ives tehát kétségbe vonja, hogy egy szabadon mozgó test teljes energiája mozgási és belső energiájának egyszerű összegével lenne egyenlő. Az egyszerű összeg helyett javasolt (2') és (3') azonban fizikailag aligha értelmezhető. A (2') például azt állítja, hogy a szabadon mozgó test teljes energiája *már a hullámcsomagok kibocsátása előtt* függ ezek ϵ energiájától és a visszamaradt test $\bar{m}$ tömegétől.

De hogyan jutott erre a – szerintünk képtelen – gondolatra?

A Függelék Einstein gondolatmenetének reprodukálásával kezdődik, és tartalmazza az

$$(E' - E_0) - (\bar{E}' - \bar{E}_0) = \epsilon \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right) \quad (8)$$

képletet, amely (5)-ből kapható (2) és (3) figyelembe vételével, és szerepel Einstein dolgozatában is. Ives ezután alkalmazza a két kinetikus energiára a pontos (7) formulát:

$$K(v, m) = m c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right),$$

$$K(v, \bar{m}) = \bar{m} c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right),$$

ahonnan

$$K(v, m) - K(v, \bar{m}) = (m - \bar{m}) c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right).$$

Innen (8)-ba helyettesíti be az

$$\left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right)$$

kifejezést:

$$\begin{aligned} (E' - E_0) - (\bar{E}' - \bar{E}_0) &= \\ &= \frac{\epsilon}{(m - \bar{m}) c^2} [K(v, m) - K(v, \bar{m})], \end{aligned} \quad (9)$$

és ebből vonja le azt a következtetést, hogy nem (2) és (3), hanem (2') és (3') a teljes energia helyes felbontása belső és mozgási energiára. De ez a konklúziója hibás, mert az $a + b = c + d$ egyenlőségből nem következik $a = b$ és $c = d$. A (9)-ből a (2) és a (3) alapján a helyes következtetés az, hogy

$$\frac{\epsilon}{(m - \bar{m}) c^2} = 1,$$

vagyis a tömeg-energia reláció.

Planck 1907-es dolgozata

A tömeg-energia relációval összefüggésben Planck 1907-ben publikált dolgozatára szoktak hivatkozni, amelynek nem túl jó minőségű angol fordítása megtalálható a neten.⁷ A cikk egy hosszú bevezetőből és 19 fejezetből áll. A tömeg-energia relációról a 16. fejezetben van szó.

A 19 fejezetből 18-at Planck a következő feladat megoldásának szenteli: Mozogjon egy makroszkopikus test konstans v sebességgel p nyomású, T hőmér-

sékletű környezetben. A mozgás legyen adiabatikus, azaz minden pillanatban álljon fenn termikus és mechanikai egyensúly a testen és a környezetet képező közegen belül, valamint a test és környezete között. A megválaszolandó kérdés a következő: Milyen képlet segítségével lehet megadni a mozgó test (teljes) energiáját, nyomását, entrópiáját a p , a T és a test V térfogatának a függvényében, amelyek mind a *közeghez képest nyugvó* rendszerre vonatkoznak?

Planck általános eljárást dolgozott ki az ilyen típusú kérdések megválaszolására, de csak egy konkrét feladatra alkalmazta: az olyan üres súlytalan edényre (üregre), amely csak hőmérsékleti sugárzást tartalmaz (a nyomáskiegyenlítés biztosításához merev falú üreg helyett valójában egy dugattyú belsejére kell gondolnunk). A múlt század tízes éveiben ezzel a problémával többen is foglalkoztak, mert azt remélték, hogy mind mechanikai, mind elektrodinamikai szempontból végiszámolható, és bepillantást enged a mozgó testek elektrodinamikájába (amiben azonban Einstein sokkal radikálisabb megközelítési módja bizonyult végül sikeresnek). Planck szisztematikus vizsgálata megerősítette az üreg energiájára és impulzusára nem sokkal korábban egyik tanítványa által levezetett képleteket:

$$E = \frac{1 + \frac{v^2}{3c^2}}{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^3} a T^4 V, \quad (10)$$

$$G = \frac{v}{c^2} (E + p V).$$

A dolgozat bevezetőjében Planck hangsúlyozza, hogy ezek a képletek azért is fontosak, mert kivétel nélkül minden test tartalmaz hősugárzást, amely bizonyos körülmények között nem is elhanyagolható a szokásos módon értelmezett belső energiához képest. A példája azonban ugyancsak egy súlytalan edénybe zárt ideális gáz, ezúttal persze molekuláris. A mechanika igazán fontos objektumairól, a szilárd testekről nem beszél. Az olyan elemi részecskékre pedig, mint az elektron, amelynek mozgását 1907-ben már javában tanulmányozták, Planck indoklása nyilván egyáltalán nem alkalmazható.

Ahhoz, hogy egy kicsit jobban belelássunk a (10) képletek természetébe, helyettesítsük bennük a *közeg* nyugalmi rendszerében érvényes T , p , V változókat az *üreg* nyugalmi rendszerére vonatkozó T_0 , p_0 , V_0 -val. Planck dolgozatának természetesen fontos része a kapcsolat tisztázása a változók e két fajtája között. A következő eredményre jut:

$$V = V_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}, \quad T = T_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad \text{és} \quad p = p_0. \quad (11)$$

Az első ezek közül a Lorentz-kontrakció, amely elvben empirikusan is ellenőrizhető, mert tudjuk, hogyan lehet egy mozgásban lévő test hosszát megmérni. A hőmérséklettel azonban más a helyzet, mert

⁷ <https://en.wikisource.org/wiki/>. Ugyanitt található Planck később szóba kerülő 1906-os közleményének, valamint Einstein júniusi cikkének angol fordítása is.

csak T_0 -t tudjuk mérni a testhez rögzített hőmérővel. A gyakorlatban ez nem okoz gondot, mert a reális feladatokban (például áramló közegekben) hőmérsékleten mindig a lokálisan együttmozgó rendszerben mért hőmérsékletet értjük, de bizonytalanságban hagy a T fizikai jelentését (és jelentőségét) illetően.

A (11) segítségével E -re és G -re a következő képleteket kapjuk:⁸

$$E = \frac{E_0 + \frac{v^2}{c^2} p_0 V_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (12)$$

valamint

$$G = \frac{v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \frac{E_0 + p_0 V_0}{c^2}, \quad (13)$$

amelyekben a Stefan–Boltzmann-törvény alapján

$$E_0 = a T_0^4 V_0.$$

Planck a tömeg-energia relációt (13)-ból dedukálja a tömeg

$$m = \left(\frac{G}{v} \right)_{v=0} \quad (14)$$

definíciója alapján. Így kapjuk a cikk

$$m = \frac{E_0 + p_0 V_0}{c^2} \quad (15)$$

(48)-as képletét, amely a tömeg-energia reláció Planck értelmezésében.⁹ De ez a képlet bizonyosan hibás: az $E_0 + p_0 V_0$ *entalpia* megváltozása ugyanis azt a hőt is tartalmazza, amely a test konstans nyomású környezetén végzett munkáját fedezi. A helyes képlet az

$$m = \frac{E_0}{c^2},$$

amelyet azonban Planck nem ír fel.

De azon kérdés szempontjából, amelynek megválaszolására Planck dolgozatát elővettük, ez a probléma nem túl lényeges; végül is merev falú üregre vonatkozóan, amikor nyomáskiegyenlítődést a környezettel nem követelünk meg, a (15) jobb oldalán a $p_0 V_0$ tag nem lép fel, és a képlet valóban a tömeg-energia relációt szolgáltatja. Az igazán fontos kérdés a következő:

⁸ A jobb oldalt egy harmadik alakban is felírhatjuk, ha kihasználjuk a fekete sugárzás $p_0 V_0 = E_0/3$ állapotegyenletét is.

⁹ Emlékeztetünk rá, hogy ez a képlet a csak hőmérsékleti sugárzást tartalmazó, üres, súlytalan edényre vonatkozik. Planck *akkori* felfogása szerint általánosabb érvényességre azért tarthat igényt, mert minden test tartalmaz fekete sugárzást.

Einstein úgy jutott el a tömeg-energia relációhoz, hogy egy alkalmasan megválasztott fizikai folyamatra alkalmazta az energia és az impulzus megmaradási tételét két egymáshoz képest mozgó vonatkoztatási rendszerben. Mi lehet az, ami Planck tárgyalásában ezt a gondolatmenetet látszólag automatikusan helyettesíti?

Planck dolgozata nehéz olvasmány; nem is lehetek biztos benne, hogy minden részletét jól megértettem. A módszere két alapelv kombinációjára épül. Az első a mechanika $\delta \int L dt = 0$ variációs elvének és a belőle következő Lagrange-egyenletek általánosítása arra az esetre, amikor a test p , T nyomású és hőmérsékletű környezetben mozog. Az $L(v)$ Lagrange-függvény szerepét betöltő $H(v, V, T)$ függvényt Planck Helmholtz-féle kinetikus potenciálnak hívja. A második alapelv a relativitáselmélet a Lorentz-transzformációval.

A matematikai bonyolultság fő forrása a környezeti változók kezelése, ezért ha kizárólag a tömeg-energia reláció státusát kívánjuk tisztázni, elég, ha az izolált test határesetére korlátozódunk, amelyet Planck már egy korábbi, 1906-os közleményében megvizsgált (és a 19. fejezetben hivatkozik is rá). Ebben a dolgozatában Planck megmutatja, hogy a ponttöltés relativisztikus mozgásegyenletét akkor kaphatjuk meg, ha a szabad (töltött vagy töltetlen) tömegpont Lagrange-függvényét

$$L = -m c^2 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} + konst. \quad \left(v = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2} \right) \quad (16)$$

alakúnak választjuk. A továbbiakban a jobb oldalon álló, látszólag ártalmatlan, szabadon választható konstansra koncentrálnunk.¹⁰

A szabad mozgáshoz tartozó Lagrange-függvény helyes megválasztásának egyedüli kritériuma az, hogy a

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) = F_x, \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{y}} \right) = F_y, \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{z}} \right) = F_z$$

egyenletek egyezzenek meg az általában már korábban ismert korrekt mozgásegyenletekkel. Mivel ezekből az egyenletekből az L -ben szereplő additív konstans kiesik, ezért *ebből a szempontból* ezt a konstansot szabadon választhatjuk. A test *energiáját* meghatározó

$$\mathcal{E} = \dot{x} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} + \dot{y} \frac{\partial L}{\partial \dot{y}} + \dot{z} \frac{\partial L}{\partial \dot{z}} - L = \frac{m c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - konst. \quad (17)$$

képletben azonban (negatív előjellel) benne marad.

Planck az 1906-os közleményében a (17) lagrange-i energiaformulát ugyan felírta, de nem rendelkezett a konstans megválasztásáról. Pedig meg kellett volna tennie, mert enélkül az energia nincs definiálva. Két indokolható választása is lett volna. Bármely szabadon mozgó test energiája két részből áll: mozgási energiá-

¹⁰ Lásd *Relativitáselmélet* könyvem 2., bővített kiadásának (Typotex 2016) 2.6 szakaszát.

ból és belső (vagy nyugalmi) energiából. Ebből csak az első tartozik a mechanikára, mert a belső energia az anyagszerkezet és a termodinamika tárgyát képezi. Ezért megalapozottan érvelhetünk amellett, hogy a mechanikában egy izolált test energiáján a mozgási energiát kell érteni, amely $v = 0$ -nál definíció szerint nullával egyenlő. Ez a feltétel akkor teljesül, ha (17)-ben a konstansot $m c^2$ -nek választjuk, mert ekkor

$$\mathcal{E} \equiv K = m c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right), \quad (18)$$

és ez $v = 0$ -nál valóban eltűnik. Mint a (7)-ben már láttuk, az 1905. júniusi dolgozatában Einstein ugyanerre a mozgásienergia-formulára jutott azon meghatározás alapján, hogy a v sebességű test mozgási energiája azal a munkával egyenlő, amelyet ahhoz kell befektetni, hogy a nyugvó testet v sebességre gyorsítsuk fel.

De Plancknak nem kellett volna itt megállnia. Einstein szeptemberi közleményére hivatkozva rámutatott volna, hogy az $E_0 = m c^2$ reláció következtében célszerű lehet a belső energia „beemelése” a mechanikába, hiszen ez a belső energia konkrét fizikai természetétől függetlenül egy tipikus mechanikai paraméteren, a tömegben keresztül fejezhető ki. Ezért az $\mathcal{E}$ Lagrange-energián a mozgási és a belső energia összegét érdemes érteni:

$$\begin{aligned} \mathcal{E} &= K + E_0 = \\ &= m c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right) + m c^2 = \frac{m c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \end{aligned} \quad (19)$$

A (17)-tel való összehasonlítás mutatja, hogy ez az értelmezés a $konst. = 0$ választásnak felel meg.¹¹

A (19) tartalmazza a tömeg-energia relációt, mert $v \rightarrow 0$ -nál ebbe megy át. De világos, hogy ezt a relációt *nem* a $konst. = 0$ választással igazoltuk, hanem Einstein bizonyítását használtuk fel annak demonstrálására, hogy a $konst. = 0$ választásnak mély fizikai értelme van.

Mint említettük, az 1906-os közleményében Planck a Lagrange-függvény additív konstansának megválasztásával nem foglalkozott. Az 1907-es cikkben a Lagrange-függvény szerepét a Helmholtz-féle kinetikus potenciál játssza, és – mint Planck hangsúlyozza – a mozgásegyenletek ezt is csak egy additív konstans erejéig rögzítik. A 9. fejezet végén Planck a konstans értékét „az egyszerűség kedvéért” nullának választja. A cikkének (10)-es formulája alapján ezzel pontosan ugyanúgy befolyásolja az energia képletét, ahogy az előbb a Lagrange-elmélet kapcsán elemeztük. Ezzel a lépéssel építette bele az elméletéből számítható energiába, hogy $v = 0$ -nál legyen egyenlő $m c^2$ -tel, ezért jöhetett ki az elméletéből a tömeg-energia reláció.

De ez nem a tömeg-energia képlet *bizonyítása*, hanem annak igazolása, hogy a tömeg-energia reláció *következtében* a konstansot nullának választva értelmes elméletre jutunk.

¹¹ Ma már nyilvánvaló, hogy a Lagrange-energiának ez a választása a legcélszerűbb. A gyorsítók ugyan a K kinetikus energiát növelik, de a felgyorsított részecskék által kiváltott folyamatokban a teljes $E = K + E_0$ energia részt vesz (bár az olyan szupergyorsítókban, mint az LHC, az $m c^2$ járuléka elhanyagolható a mozgási energia mellett). A radioaktív bomlási folyamatokban csak az E marad meg, a K és a részecskék belső energiája (tömege) külön-külön nem. Matematikai szempontból pedig az E óriási előnye a K -val szemben, hogy az impulzussal együtt négyesvektort alkot.

NEM KELL HŐSNEK LENNED!

**MARADJ TOVÁBBRA IS
A FIZIKA BARÁTJA!**

SZÁMÍTUNK RÁD,



támogasd jövedelemadód

EGY százalékaival

az Eötvös Loránd Fizikai Társulatot!

Új adószámunk: 19815644-2-43



A Nagy Hadronütköztető (Large Hadron Collider, LHC) kísérletei által 2012-ben felfedezett új részecske észlelésével [1, 2] az LHC célját még nem érte el, igazi küldetésének útja éppen csak elkezdődött. Egy új részecske felfedezése nem áll meg a pusztá észleléssel, tulajdonságainak minél pontosabb megmérése épp olyan fontos, hogy el tudjuk dönteni vajon az újonnan talált részecske valóban a standard modell Higgs-bozonja, vagy pedig a modellépítőkre hárul az a feladat, hogy értelmet vigyenek az új részecske által előálló eloszlásokba.

Az új részecske tulajdonságainak megmérése nagy kihívás elé állítja a kísérleti közösséget és az alkalmazott kísérleti apparátust. A nagy pontosságú kísérlet az elméleti számolásoktól is hasonlóan nagy pontosságot vár el annak eldöntése érdekében, hogy egy jel mennyire jól írható le egy elméleti modell keretein belül, vagy ami még izgalmasabb: mennyire nem.

A legfrissebb adatok figyelembevételével a Higgs-bozon létezéséből következő, az LHC CMS (Compact Muon Solenoid) detektora által észlelt jel a két legfontosabb megfigyelési csatornában az 1. ábrán látható. Az ábrán szereplő görbék a hatáskeresztmetszet eloszlását szemléltetik a végállapotban megtalálható bizonyos részecskék rendszerének Lorentz-invariáns tömege szerint. Hisztogram formájában az elméleti jóságot látjuk, míg a pontok a megfelelő bizonytalansági sávokkal a mérési eredmények. Írásomban az elméleti jóságotokról, valamint azok pontos számolásáról szövegek, arról, hogy mit jelent a pontosság egy ilyen számolásban, továbbá arról, hogy az hogyan növelhető.

A hatáskeresztmetszet, mint perturbációs sor

A nagyenergiás részecskefizikában a számolásokat perturbációs módszerrel végezzük a kvantumtérelmélet keretein belül. A perturbációs paraméter az adott elmélet csatolása, tehát kvantum-elektrodinamika (QED) esetén az elemi töltés, vagy fizikai di-

menziótól mentes egységválasztás esetén $\alpha = e^2/(4\pi)$. A csatolás fut, tehát értéke függ attól, hogy azt milyen energián mérjük. A futást az adott elmélet renormáliscsoport-egyenlete határozza meg, így például az α értéke a Z-bozon tömegének megfelelő energián: $\alpha(m_Z) \approx 1/128$, végtelen kis impulzusátadásnak megfelelő skálán viszont $\alpha(0) \approx 1/137$. Az erős kölcsönhatás kvantumtérelméletében, a kvantum-színdinamikában (Quantum Chromo Dynamics, QCD), a csatolás a g_s szintöltés, vagy a gyakorlatban használt $\alpha_s = g_s^2/(4\pi)$, amelynek értéke ugyancsak a Z-bozon tömegének megfelelő energián: $\alpha_s(m_Z) \approx 0,118$. Ez nem kicsi érték, de a QCD elméletének béta-függvénye negatív, amiből következik, hogy a csatolás a nagyobb energiák felé haladva az energiával logaritmusan csökken, az elmélet aszimptotikusan szabad. Tehát minél nagyobb energián vizsgálódunk, egyre jobban bízhatunk a perturbációs becslések helyességében.

A nagyenergiás kísérletekben különböző fizikai mennyiségekhez tartozó hatáskeresztmetszeteket mérnek, az erre vonatkozó elméleti jóságot az elmélet csatolása szerinti perturbációs sorfejtés alakjában adjuk meg. Ha az elmélet a QCD, akkor a sorfejtés az alábbi alakot ölti:

$$\sigma = \left(\frac{\alpha_s}{2\pi} \right)^q \left(\sigma^{\text{LO}} + \frac{\alpha_s}{2\pi} \sigma^{\text{NLO}} + \left(\frac{\alpha_s}{2\pi} \right)^2 \sigma^{\text{NNLO}} + \dots \right),$$

ahol σ^{LO} a legalacsonyabb, azaz vezető rendű (Leading Order, LO), σ^{NLO} a vezetőre következő rendű (Next-to-Leading Order, NLO) járulékok, tehát az első sugárzási korrekció, σ^{NNLO} pedig a második sugárzási korrekció (Next-to-Next-to-Leading Order, NNLO-járulékok). Teljes egészében faktorizáltuk a függést az α_s csatolástól, a nevezőben található 2π faktorizálása pedig megszokás. A QCD esetében általánosan elmondható, hogy az egyes korrekciók bonyolultsága faktoriálisan nő, így már sok esetben az NLO-járulékok kiszámolása is nagy technikai kihívást jelentő feladat.

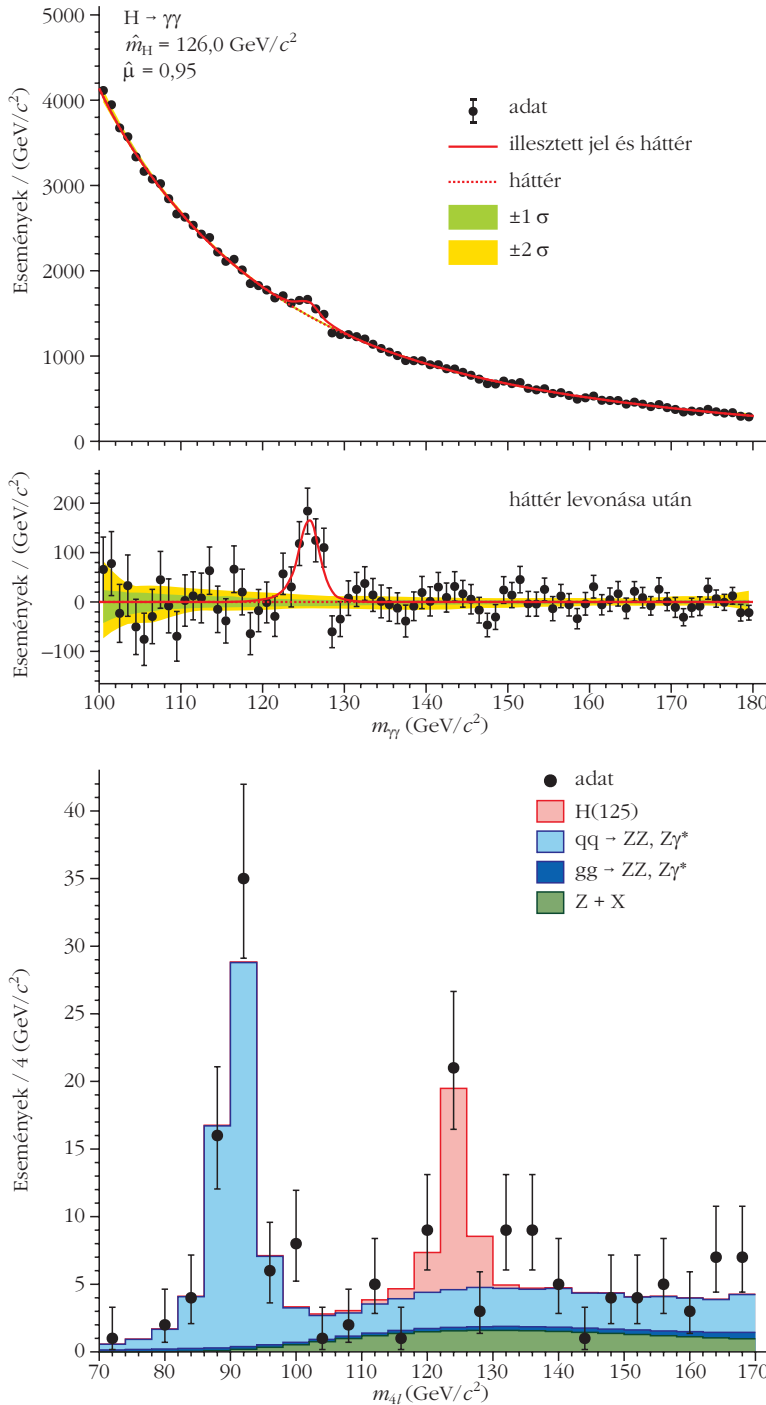
A sugárzási korrekciók számításának bonyolultsága miatt az adott mennyiséghez tartozó hatáskeresztmetszet perturbációs sorában rendszerint pusztán az első pár tagot ismerjük. A perturbációs sor csonkolása viszont azt eredményezi, hogy az elméleti becslés függ nem-fizikai paraméterektől. Ilyen paraméter a renormálási skála, valamint hadronikus kezdeti állapotok esetén a faktorizációs skála. A függést a nem-fizikai paraméterektől a magasabb rendű járulékoknak kell eltávolítaniuk, így a függés mértéke e paraméterektől tájékoztatást ad a magasabb rendű, elhagyott tagok járulékanak nagyságáról. Tehát a perturbációs sor csonkolása és ezáltal a jóságot függése nem-fizikai paraméterektől elméleti bizonytalanságot eredményez, amelynek nagyságáról a nem-fizikai paraméterek változtatása szolgál tájékoztatásul.

Készült a Magyar Fizikus Vándorgyűlésen 2016. augusztus 26-án elhangzott előadás alapján.

A szerző kutatásait a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal – NKFIH 101482 pályázata és a Magyar Tudományos Akadémia Posztdoktor Kutatói Programja támogatja.



Kardos Ádám 2009-ben szerzett fizikusi diplomát a Debreceni Egyetemen, PhD fokozatát 2012-ben védte meg ugyanitt, a Fizikai Tudományok Doktori Iskolában Kvantum-színdinamikai számítások partonzápor programokhoz való illesztésének témakörében. 2012 és 2014 között a milánói Bicocca Egyetem posztdoktor kutatója, majd 2014-től az MTA-DE Részecskefizikai Kutatócsoport tagja. Fő kutatási területe a kvantum-színdinamika sugárzási korrekcióinak számítása.



1. ábra. A CMS-detektor által észlelt Higgs-bozon által okozott jelek és a hozzá tartozó háttérrek a 2-foton és 4-lepton csatornában.

Elméleti jóslat elektron-pozitron szétsugárzásban három hadronzárpor keletkezésére

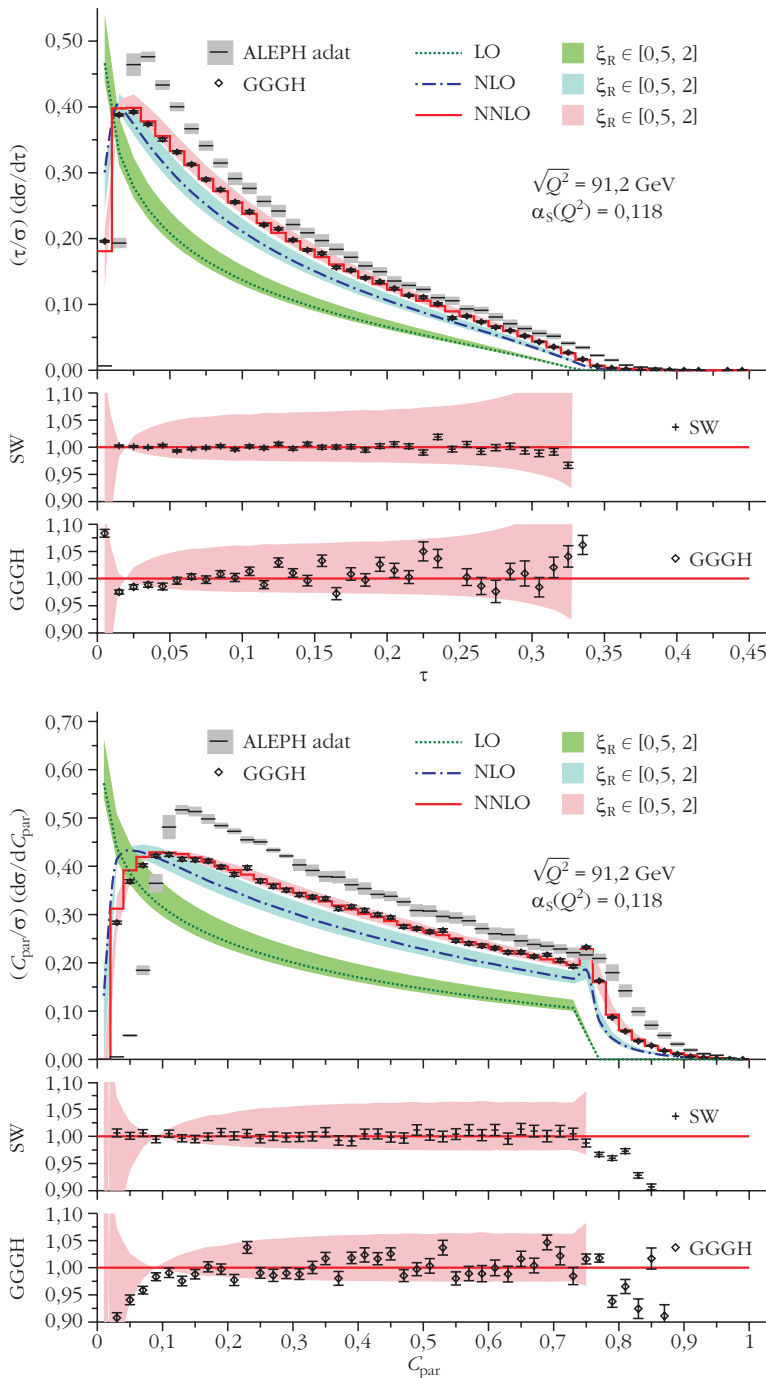
Létező példa az elméleti számolás bizonytalanságának csökkentésére az elektron-pozitron szétsugárzásában keletkező három hadronzárpor esete, ahol a szükséges mátrixelemek meglehetősen lehetővé teszi a fizikai mennyiségekhez tartozó hatáskeresztmetszet perturbációs sorában szereplő első három tag kiszámítását [3, 4]. A QCD-perturbációs számításban a könnyű kvarkok tö-

megeit elhanyagoljuk, ezáltal infravörös divergenciák jelennek meg a számolás közbenső lépéseiben. Az ilyen szingularitásokat valamilyen módon regularizálni kell ahhoz, hogy a felmerülő számítások numerikusan elvégezhetők legyenek. Erre kínál egy lehetséges megoldást a CoLoRful-NNLO levonási eljárás [5, 6]. Ezt az eljárást programoztam az MCCSM (Monte Carlo for the CoLoRful Subtraction Method) programban és a következőkben az MCCSM-mel kapott eredményeken illusztrálom, hogyan is javul az elméleti jóslat azzal, hogy a perturbációs sorban egyre több tagot veszünk figyelembe. Valamely három hadronzárporhoz tartozó O fizikai megfigyelhető mennyiség szerinti differenciális hatáskeresztmetszet perturbációs sorát elektron-pozitron ütközésben a következő normálással szokás megadni:

$$\frac{O}{\sigma_0} \frac{d\sigma}{dO} = \frac{\alpha_s}{2\pi} A(O) + \left(\frac{\alpha_s}{2\pi} \right)^2 B(O) + \left(\frac{\alpha_s}{2\pi} \right)^3 C(O) + \mathcal{O}(\alpha_s^4),$$

ahol σ_0 az $e^+e^- \rightarrow$ hadronok folyamat hatáskeresztmetszete a perturbációs számítás legalacsonyabb rendjében. Egy lehetséges fizikai mennyiség, ami jól jellemzi a három hadronzárpor keletkezését, a döföt (thrust, T), amely nulla és egy közötti értéket vehet fel úgy, hogy akkor tart egyhez, amikor az esemény két, egymással ellentétes irányba haladó keskeny hadronzárporból áll, illetve tart nullához, ha a végállapoti részecskék egyenletesen oszlanak el egy gömb felületén, amelynek középpontját az ütközési pontban választjuk.

Az elektron-pozitron szétsugárzásban keletkező háromzárporos végállapot jellemzésére alkalmas másik mennyiség a C -paraméter. A $\tau = 1 - T$ és a C -paramétereloszlásra a perturbációs számítás első három rendjében adott jóslatunk a 2. ábrán látható $Q = m_Z c^2 \approx 91,2$ GeV tömegközépponti energián. A perturbációs számítás adott rendjéhez tartozó elméleti bizonytalanságot a μ renormálási skála $[m_Z/2, 2m_Z]c^2$ tartománybeli változtatásával kaptuk meg. A variálás tartománya önkényes, viszont a gyakorlat azt mutatja, hogy ez a tartomány elég jó közelítést ad a skálabizonytalanságról. Jól látszódik a perturbációs eredmény stabilizálódása, ahogy egyre több tagot veszünk figyelembe, illetve maga a skálabizonytalanság is fokozatosan csökken. A mért és számolt eredmények közötti viszonylag nagy eltérés részben az elméleti számolásban nem szereplő hadronizációval kapcsolatos hatványkorrekcióknak köszönhető. A hatványkorrekciók $1/Q^p$ -nel



2. ábra. Az egy mínusz döfet és C -paraméter eloszlásra adott elméleti jósálat a perturbációs számítás első három rendjében, ahol a megfelelő sávok az adott renndhez tartozó elméleti bizonytalanságot jelentik, továbbá az ábrán feltüntetésre került a mennyiséghez tartozó mérés eredménye is.

arányosak, ahol p kicsi pozitív egész szám. Az eltérés másik oka a végállapot parton-multipllicitásában (kvarkok és gluonok számában) megmutatkozó különbségben keresendő. A QCD elmélete aszimptotikusan szabad: a kölcsönhatás skálájának növelésével az elmélet csatolása logaritmikusan csökken. Ekképpen alacsony impulzusátadás esetén a csatolás és így a szintöltés is nagyvá válik. Ezért a végállapotban lévő partonok egyre jobban sugároznak további partonokat, így a végállapot megteelik alacsony energiájú

kvarkokkal és gluonokkal, amelyek azután – a hadronizációnak köszönhetően – hadronokká alakulnak.

Elméleti pontosság növelése partonzápor és hadronizáció figyelembevételével

Ahogy az előbbi szakaszban láttuk, az elméleti jósálat pontossága nagyban javítható azáltal, hogy az adott fizikai mennyiség perturbációs sorában hány tag járulékat veszünk figyelembe. Nagy különbség van a kísérletben megfigyelt és a perturbációs számításban használt részecskék között: a kísérlet hadronokat észlel, a számításban ellenben gluonok és kvarkok, illetve a belőlük felépülő részecskezáporok szerepelnek. Az értelmes összevetést a kísérlettel a *lokális parton-hadron dualitás* tétele teszi lehetségessé, amely szerint a *hadronszinten észlelt lendületek és kvantumszámok követik a kezdeti partonokét*. Például azon kvark ízének, amely egy záport keltett, megtalálhatónak kell lennie az adott záporban.

Az elektron-positron szétsugárzásban keletkező hadronos végállapotokhoz becsült döfet és C -paramétereloszlás összehasonlítása a kísérleti eredményekkel rámutat a partonzápor és hadronizációs korrekciók fontosságára. A partonzápor leírására első elveken nyugvó, valószínűségi (Markov-) folyamatot modellező *partonzápor Monte Carlo programok*, a hadronizáció leírására pedig a partonzáporokhoz csatolt fenomenologikus modelljeink vannak. Egy rögzített rendű számítás illesztése partonzáporokhoz és hadronizációhoz a perturbációs számítás magasabb rendjeiben nem triviális, mert ugyanaz a sugárzási korrekció megjelenik a perturbációs számításban és a partonzáporban, a duplán számolást pedig el kell kerülni. Jelenleg az NLO-pontosságú számítások és a partonzáporok illesztéséhez léteznek kidolgozott általános eljárások, például a POWHEG-módszer [8].

A t -kvark a legnehezebb kvark és egyúttal a legnehezebb eddig észlelt elemi részecske, amely fontos szerepet tölt be a

standard modell ellenőrzésében, továbbá a standard modellen túlmutató fizika keresésében is. Ezáltal motiválva és felhasználva a POWHEG-módszert, több olyan LHC-folyamathoz is elméleti jósálatot közöltünk, amelyekben egy top-kvark pár és egy vagy több más részecske keletkezett (például [8]).

Amikor egy rögzített rendű számítás partonzáporhatásokat és hadronizációt megvalósító programhoz illesztünk, lehetőség van pusztán a partonzápor hatásának vizsgálatára, ha a hadronizációt kikapcsoljuk,

így mennyiségileg külön-külön becsülhető a partonzápor és a hadronizáció hatása is. Hogy ezt konkrét példán bemutathassuk, tekintsük a p - $p \rightarrow W^+ W^- b \bar{b}$ folyamatot [9]. Itt a végállapotban megjelenő négy részecske létrejöhet egy top-kvark pár bomlásából, de akár elektroyenge bomlások útján is a perturbációs számítás ugyanazon rendjében. Ez a folyamat különösen érdekes lehet a t -kvark tömegének meghatározásában.

A folyamat két lényeges fizikai megfigyelhető mennyisége a legkeményebb b -zápor (b -kvarkból kialakuló hadronzápor) és legkeményebb pozitron (bejövő nyálábokra) merőleges lendülete. A hatáskereszt-

metszet e két mennyiség szerinti differenciális eloszlását mutatja a 3. ábra. Jól látható, hogy a partonzápor hatása közel azonos mindkét esetben. Ez a hatás abban nyilvánul meg, hogy a végállapot járulékos sugárzás útján feltöltődik lágy és a kezdeti partonokhoz képest kis szögben kibocsátott további partonokkal, azonban ezek a részecskekibocsátások beleszólhatnak és bele is szólnak az egyes események válogatásába, amit tipikusan különböző feltételek kiszabásával végzünk. Ezáltal pedig egységes hatással van minden eloszlásra. A hadronizáció viszont erősen függ magától a megfigyelhető mennyiségtől. A részecskezáporkban megjelenő, majd elbomló nem-stabil hadronok elektromágneses és gyenge bomlása folytán a kezdetben hadronos energia elektromágnessé és láthatatlan energiává alakul, ami részecskezápork merőleges lendületeloszlásainak eltolódását eredményezi balra, a kisebb értékek irányába. Pozitronok esetében ilyen nincs, így azok merőleges lendület-eloszlását a hadronizáció érintetlenül hagyja.

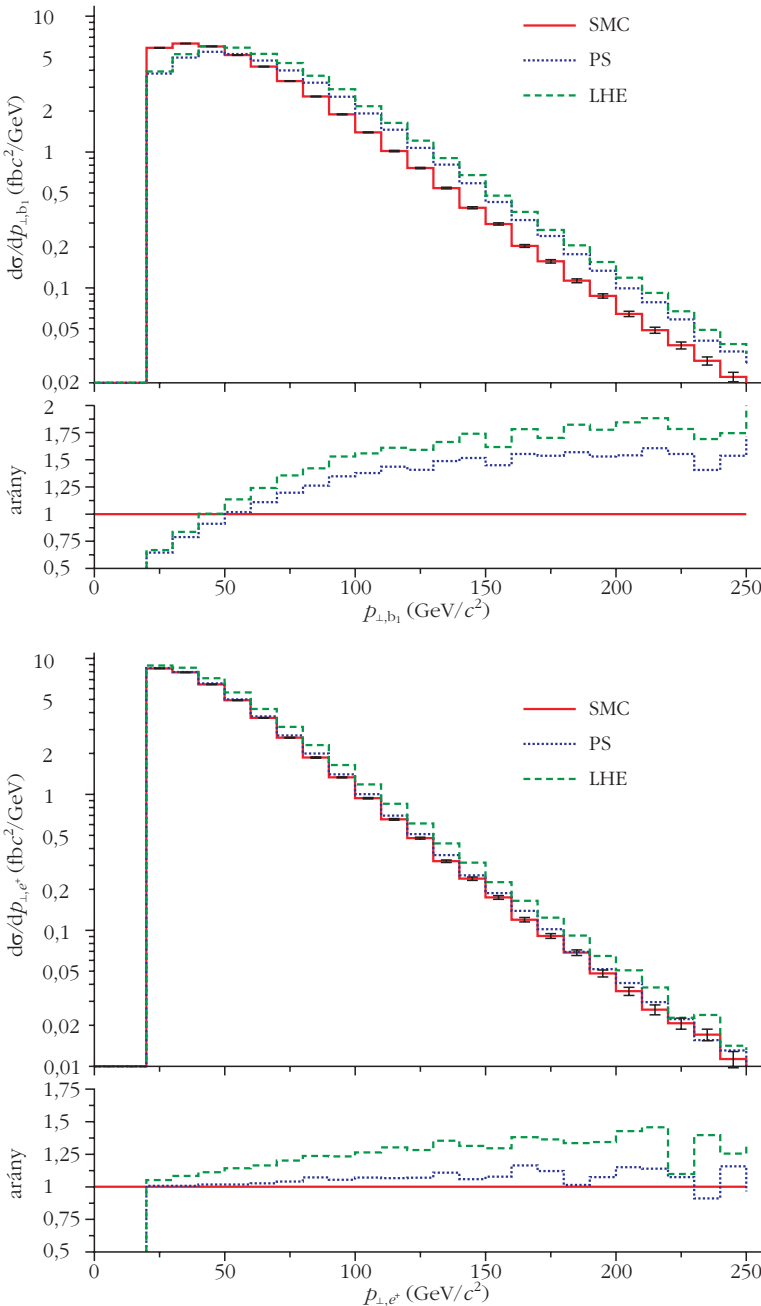
Analitikus felösszegezés és hadronizáció

Többszörre nem a teljes hatáskeresztmetszetre, hanem a hatáskeresztmetszet valamely kinematikai mennyiség (például döfet vagy merőleges lendület) szerinti eloszlására vagyunk kíváncsiak. Ebben az esetben az adott megfigyelhető mennyiség szerinti differenciális hatáskeresztmetszetben olyan logaritmusok találhatók, amelyek argumentumában az adott fizikai mennyiség szerepel, például a döfet esetében $L = \log(1/\tau)$.

A QCD-perturbációs számítás sorfejtési paramétere az α_s erős csatolás, amely azonban mindig együtt jár L hatványaival. Ezért ha az aktuális fizikai mennyiséghez tartozó logaritmus fel nő (például $T \rightarrow 1$, azaz $\tau \rightarrow 0$), akkor az effektív sorfejtési paraméter $\alpha_s L^2$ lesz. Nagy L értékek esetén $\alpha_s L^2 > 1$, a sorban minden tag fontossá válik, ezért a perturbációs sor konvergenciája leromlik. Így értelmes számszerű becslés csak akkor állítható elő, ha a sor minden tagját figyelembe vesszük és felösszegezzük. A felösszegezést külön-külön, analitikusan kell elvégeznünk minden fizikai mennyiségre, hiszen a logaritmusok együtthatója fizikai mennyiségeként más és más.

A perturbációs sorban szereplő tagok teljes felösszegezése általában nem lehetséges, pusztán a bennük szereplő, a logaritmust különböző hatványon tartalmazó tagok felösszegezéséről beszélhetünk. Annak függvényében pedig, hogy milyen hatványon lévő logaritmusok kerültek felösszezésre beszélhetünk a legnagyobb

3. ábra. A legnagyobb merőleges lendületű b -jet és a pozitron merőleges lendület-eloszlása három különböző elméleti közelítésben: perturbációs számítás rögzített rendjében (LHE), partonzápor alkalmazása után (PS) és hadronszinten (SMC).



hatványkitevőjű logaritmusok összegzéséről, tehát a logaritmusokban vezető (Leading Logarithmic, LL), valamint vezetőre következő (Next-to-Leading Logarithmic, NLL) és így tovább közelítésekről.

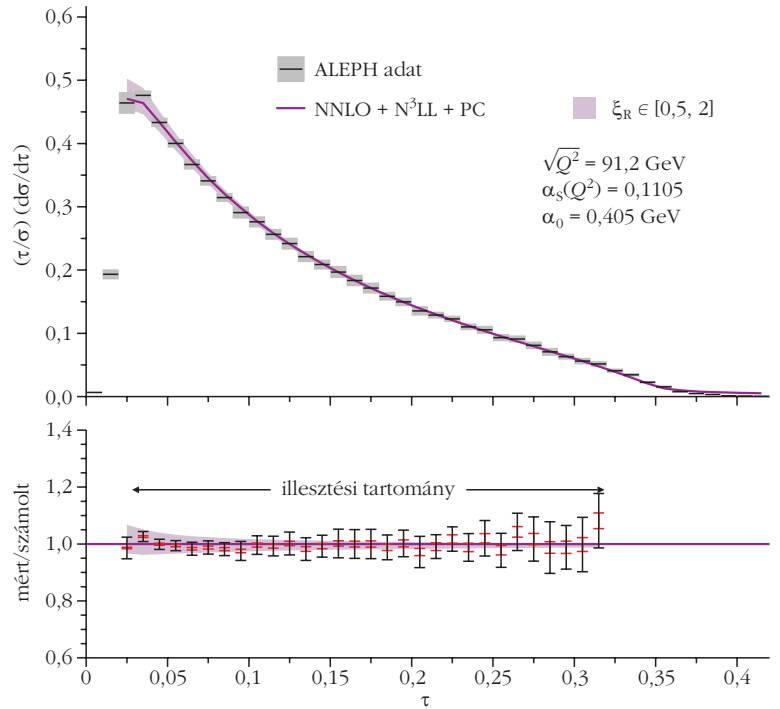
Az elektron-pozitron ütközésben keletkező hadronos végállapotok eseténél maradvány, és vizsgálva a hatáskeresztmetszet τ szerinti differenciális alakját az analitikus felösszegzés

$$\alpha_s^n \frac{\log^{m-1} \tau}{\tau}$$

tagok figyelembevételét jelenti, ahol LL-felösszegzésről beszélünk, ha $m = 2n$, NLL-ről, ha az $m = 2n - 1$ kitevőjű logaritmustagok is felösszegzésre kerülnek, illetve általánosan: egy N^k LL renddel bezáróan elvégzett felösszegzés minden logaritmust tartalmaz, amelyre teljesül, hogy $2n \geq m \geq 2n - 2k + 1$. A τ -eloszlásra jelenleg legpontosabb analitikus felösszegzés az N^3 LL renddel bezáróan minden tagot tartalmaz.

Az analitikus felösszegzés segít az elméleti jóslat érvényességi tartományának kiterjesztésében, viszont az így kapott eredmény még mindig nehezen összemérhető a kísérlettel, ugyanis a nem-perturbatív hatások járuléka sem elhanyagolható. A gyakorlat azt mutatja, hogy ezekre az eseményalak-eloszlásokra a nem-perturbatív járulékok $1/Q^2$ -tel arányos, és mivel a Z-bozon tömegének megfelelő energián vagyunk, így ez valóban fontos járuléknak tekinthető. A hadronizáció hatása viszont leginkább az eloszlások lágyabbá tételében jelenik meg, tehát az eloszlás alakja nem, vagy csak kis mértékben változik, az pusztán balra, a kisebb energiák felé tolódik el.

Célunk az α_s erős csatolás értékének meghatározása. Ha feltesszük, hogy a partonzápor hatását az analitikus felösszegzés kellően jól leírja, valamint azt, hogy a hadronizációs korrekciókat az eloszlás eltolása valamilyen irányba kellően jól leírja, akkor egy kétváltozós illesztési feladattal nézünk szembe. Egy ilyen megközelítéssel sikerült α_s értékét meghatároznunk: felhasználtuk a döfeteseloszlásra tett legpontosabb jóslatunkat rögzített rendben (NNLO-pontosságú QCD), ezt a számolást illesztettük analitikusan felösszegzett jóslathoz (N^3 LL), majd az α_s és hadronizáció együttes változtatásával meghatároztuk azt az α_s értéket és hadronkorrekciót, ami a legjobban képes leírni a kísérleti adatokat. Előzetes eredményünket a 4. ábra mutatja. Az illesztésből kapott érték: $\alpha_s = 0,1105$.



4. ábra. α_s meghatározása illesztéssel a $\tau = 1 - T$ eloszlást felhasználva 0,025 és 0,325 között. A folytonos vonal az elméleti jóslat, ami a rögzített rend (NNLO QCD) mellett a legjobb analitikus felösszegzést (N^3 LL) is tartalmazza, továbbá az illesztésből származó hatvány (hadron) korrekciókat (PC) is figyelembe veszi. A folytonos görbe körüli sáv a nem-fizikai paraméterekből eredő bizonytalanságot szemlélteti, míg a szürke hisztogram a mérési eredményt mutatja. Az alsó panelen a kísérlet és elmélet hányadosa került feltüntetésre.

Irodalom

1. ATLAS együttműködés, G. Aad et. al.: Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC. *Phys. Lett. B* **716** (2012) 1–29.
2. CMS-együttműködés, S. Chatrchyan et. al.: Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC. *Phys. Lett. B* **716** (2012) 30–61.
3. V. Del Duca, C. Duhr, Á. Kardos, G. Somogyi, Z. Trócsányi: Three-jet production in electron-positron collisions using the CoLoRFulNNLO method. *Phys. Rev. Lett.* **117/15** (2016) 152004.
4. V. Del Duca, C. Duhr, Á. Kardos, G. Somogyi, Z. Szőr, Z. Trócsányi, Z. Tulipánt: Jet production in the CoLoRFulNNLO method: event shapes in electron-positron collisions. *Phys. Rev. D* **94/7** (2016) 074019.
5. G. Somogyi, Z. Trócsányi, V. Del Duca: A Subtraction scheme for computing QCD jet cross sections at NNLO: Regularization of doubly-real emissions. *JHEP* **01** (2007) 070.
6. G. Somogyi, Z. Trócsányi: A Subtraction scheme for computing QCD jet cross sections at NNLO: Regularization of real-virtual emission. *JHEP* **01** (2007) 052.
7. P. Nason: A New method for combining NLO QCD with shower Monte Carlo algorithms. *JHEP* **11** (2004) 040.
8. M. V. Garzelli, Á. Kardos, Z. Trócsányi: Hadroproduction of $W^+ W^- b \bar{b}$ at NLO accuracy matched with shower Monte Carlo programs. *JHEP* **1408** (2014) 069.
9. M. V. Garzelli, Á. Kardos, C. G. Papadopoulos, Z. Trócsányi: $t \bar{t} W^\pm$ and $t \bar{t} Z$ hadroproduction at NLO accuracy in QCD with Parton Shower and Hadronization effects. *JHEP* **11** (2012) 056.

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 Újfalussy Balázs főtájtár, felelős szerkesztő Szatmáry Zoltán főszerkesztő.

Kéziratokat nem őrünk 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 (duplaszáma 1800.- Ft) + postaköltség.

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

HONNAN FÚJ A SZÉL

avagy okosabb-e egy ötödikes, mint Sylvester Stallone?

Gróf Andrea

Karinthy Frigyes Gimnázium, Budapest

„Minden másképpen van.”

Karinthy Frigyes

Katasztrófális filmek

Egy középiskolás már mindenképpen okosabb. Ez az írás néhány példa segítségével azt mutatja meg, miként lehetséges a matematikai tárgyalást nagy mértékben leegyszerűsítve, de a lényegét mégis megőrizve magyarázatot adni számos olyan meglepő jelenségre, amelyet a Föld forgása okoz. A forgó Földön ugyanis valóban minden másképpen van. Mivel kevés hétköznapi tapasztalatra hagyatkozhatunk, a középiskolások fantáziáját éppúgy megragadják ezek a jelenségek, mint a filmforgatókönyv-írókét.

A filmirodalomban – környezetfizikai szempontból – a katasztrófafilmek kínálják a legtöbb csemegézni valót. Ennek ékes példája a *Holnapután* című film, amely gazdag tárháza a valós tények által ihletett, tudományosan hangzó sületlenségeknek.

Mivel most a Föld forgásával kapcsolatos jelenségek iskolai feldolgozásának szükségességét szeretném alátámasztani, egyetlen apró jelenetet említek példa gyanánt. Ebben tévémondó ismerteti a katasztrófa közeledtére utaló aggasztó jeleket. Mialatt elmondja, hogy trópusi hurrikánra emlékeztető hatalmas vihar alakult ki Kanadában, a háta mögött levő képen az óra járásának megfelelő irányban örvénylő felhőrendszer látható (nem is hurrikánhoz hasonlít, inkább a déli félteke mérsékelt övi ciklonjának felhőzete lehet, de efölött most nagyvonalúan szemet hunyunk).

A képet figyelmesen szemlélve még a középiskolások is tudnák, hogy rossz, hiszen ha egyáltalán léte-

hetne Kanada fölött hurrikán, az biztosan nem a látott irányba csavarodna, hanem fordítva, mert az északi féltekén van. A tanulók általában jól emlékeznek földrajzóráról arra, hogy melyik féltekén merre forognak az alacsony nyomású légköri képződmények.

Ezért is szedi olyan könnyen áldozatait a lefolyó legendája. Fontos szerepe van például a *Szupercella* (*Escape Plan*) című filmben. A „Szupercella” itt nem hatalmas viharra utal, hanem szuperbiztonságos börtönre, ahol a fogvatartottak még azt sem tudják, melyik táján vannak a világnak. A főhős (*Sylvester Stallone*) megfigyeli a WC-ben örvénylő víz mozgását, ebből állapítja meg, hogy valahol az északi féltekén.

A *Simpson család Bart kontra Ausztrália* című epizódjában is a lefolyók viselkedéséből kerekedik diplomáciai bonyodalom. Ez azért különösen meglepő, mert nem véletlenül fedezhet fel a figyelmes néző rengeteg intellektuális humort ebben a rajzfilmsorozatban, főként, ha nem idegen tőle a matematika. A szerzőgárdában ugyanis szinte mindenkinek van tudományos fokozata matematikából vagy természettudományból (vagy mindkettőből). És még ők is... A történetben a nem épp észkombáján Bart Simpson nem akarja elfogadni, hogy északon mindig az óramutatóval ellentétesen örvénylik a lefolyó, mire húga, a szuperokos ötödikes Lisa figyelmezteti, legjobban, ha egyszerűen kipróbálja. Vagyis megfogalmazza, hogy elméletünk helyességének próbája a kísérlet! A szerzőknek azonban olyanira kétségük sincs a kísérlet eredményét illetően, hogy ők maguk sem ellenőrzik, mi pedig azt láthatjuk, hogy a kísérletet elvégezve a lefolyók következetesen különböző irányban örvénylenek a két féltekén.

Lefolyó-ügyben a mélypontot talán az *X-akták Kéz, amely sebez* című epizódja jelenti. Ebben még a rosszat is rosszul tudják, és okkult körítésekkel kísérve kijelentik, hogy az óra járásával ellentétesen forgó lefolyó a déli féltekére jellemző.

A lista messze nem teljes, de ahhoz talán elég ennyi, hogy tudatosítsuk, milyen tömegben ömlik a komolytalan tudomány a gyerekekre. Ők pedig meglepő részletességgel emlékeznek mindenre, amire nem kellene. (Amikor például fizikaórán először hallják a „fluxus” szót, azonnal előhozakodnak a fluxuskondenzátorral, pedig nem is éltek még, amikor a *Vissza a jövőbe* című film készült.)

Sok tennivaló vár tehát ránk, tanárookra: a mi feladatunk, hogy segítsünk tanítványainknak mindebben eligazodni. Kitől tudják meg, ha nem tőlünk, hogy honnan fúj a szél?

A cikk az Eötvös Loránd Fizikai Társulat szegedi Vándorgyűlésén, 2016. augusztus 25-én elhangzott előadás alapján készült.

A tanulmány elkészítését a Magyar Tudományos Akadémia Tanításpolitikai Kutatási Programja támogatta.



Gróf Andrea 1991-ben szerzett matematika-fizika tanári diplomát az ELTE-n. Azóta a budapesti két tanítási nyelvű Karinthy Frigyes Gimnáziumban tanítja mindkét tárgyat angol nyelven. Az ELTE fizikatanári doktori programjának végzés előtt álló hallgatójaként azzal foglalkozik, hogy miként lehet a hagyományosan a földrajz tantárgy keretében tárgyalt jelenségek fizikai hátterét a középiskolai oktatásban bemutatni.

A szél iránya

A tanulók helyesen tudják földrajzból, hogy a levegő mozgását légnyomáskülönbségek idézik elő, és a légnyomás eloszlása szabja meg a levegőáramlásokat. Az interneten könnyen találhatunk nyomástérképeket (1. ábra). Bár földrajzórán már szerepeltek izobárok, a gyerekeket először meg kell tanítanunk látni egy ilyen térképen, hiszen az absztrakt mezőfogalom még távol áll tőlük. Ha már valamelyest értik, megkérdezhetjük őket, milyen irányban fúj a szél Budapesten. Pontosabban, hogy milyen irányban fúj Budapest fölött nagy magasságban, amire ez az ábra is vonatkozik.

Az ábra Magyarország régiójában északnyugat-délkelet irányú vonalakat mutat, és balra lent vannak a nagyobb számok, jobbra fent pedig a kisebbek. Ezért hétköznapi intuíciónk alapján, amelyre a legtöbb földrajzkönyv leegyszerűsítő tárgyalása is ráerősít, többnyire azt válaszolják, hogy a szél a magasabb nyomás felől az alacsonyabb felé, vagyis délnyugatról északkelet felé fúj.

Csakhogy az összefüggés nem ilyen egyszerű: a hétköznapi intuíciónk hétköznapi tapasztalatokból táplálkozik, így nem számolhat a Coriolis-erővel.

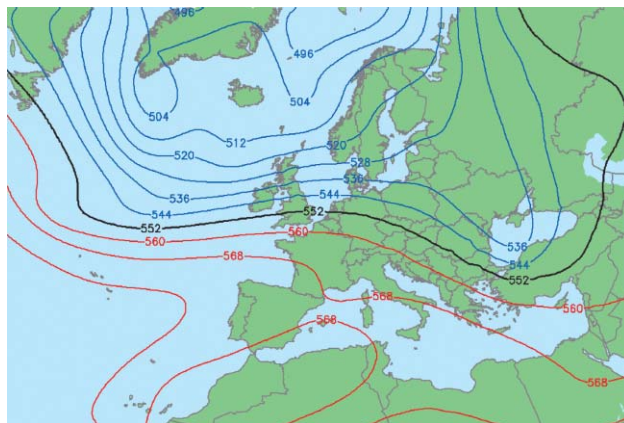
A Coriolis-erő több-kevesebb sikerrel elmagyarázható [2], a *Fizikai Szemle* is nem egy ízben foglalkozott már tanításának lehetőségeivel [3–6], ennek a részleteire ezért most nem térek ki. Ha rendelkezésre áll a Coriolis-erő, akkor még a szélesebb nagyságát is ki tudjuk számolni a gyerekekkel. Nehézséget itt főként az jelent, hogy a jelenségek egzakt tárgyalásához kicsi a középiskolai matematikai eszköztár, hiszen a tanulókat nyilván nem lehet parciális differenciálegyenletekkel terhelni.

Tanárként feladatunk tehát többek között az, hogy amennyire lehet, a lényeg megőrzése mellett leegyszerűsítsük a problémát, és a gyerekek számára is emészthető matematikai megfontolásokkal úgy kapjunk helyes eredményt, hogy közben ne mondjunk valótlan. Most is arra törekszem, hogy ne nyújtózkodjak túl a középiskolai matematikán.

Ha feltesszük, hogy a levegő nem most kelt útra, hanem már beállt a stacionárius állapot, akkor (mivel nagy magasságban a viszkozitásból adódó fékezőerő elhanyagolható) a Coriolis-erő egyensúlyt tart a nyomáskülönbségből eredő, a nyomáscsökkenés irányába mutató erővel.

(Egyensúlyról természetesen csak akkor beszélhetünk, ha azt is feltesszük, hogy a levegő nem kanyarodik nagyon. Nem nyilvánvaló, hogy mit is jelent a „nagyon”: ha a lefolyó ügyét kívánjuk tisztázni, akkor épp azt kell megmutatnunk, hogy ott bizony, nagyon kanyarodik a víz. Ennek érdekében fontos nemcsak paraméteresen, hanem konkrét számértékekkel is kiszámolni az eredményeket, a gyerekek számára csak így válik világossá, hogy mi fontos és mit lehet elhanyagolni.)

Ha kicsiny Δx távolságon a nyomáskülönbség Δp , akkor két, rá merőleges A felület közötti V térfogatban levő levegőre ható erő



1. ábra. Nyomástérkép részlete, a számok 10 m egységekben értendőek [1].

$$F_p = -A \Delta p = -A \Delta x \frac{\Delta p}{\Delta x} = -V \frac{\Delta p}{\Delta x}. \quad (1)$$

Egyensúly esetén ez egyenlő nagyságú és ellentétes irányú a Coriolis-erővel:

$$V \frac{\Delta p}{\Delta x} = 2 m v \Omega \sin \varphi,$$

ahol Ω a Föld forgási szögsebessége, φ pedig a földrajzi szélesség. Innen a szélesebb

$$v = \frac{1}{2 \rho \Omega \sin \varphi} \frac{\Delta p}{\Delta x}.$$

A Coriolis-erő oldalirányban hat, a mozgás tehát a nyomáscsökkenés irányára merőlegesen történik, vagyis éppen az izobárfelületek mentén.

A nyomásfelületek domborzata

A szél irányáról nemcsak azért volt fontos említést tenni, mert a gyerekeknek már ez is meglepő, hiszen – *Karintyval* szólva – egy újszülöttnak minden vicc új. Csak kicsit kell mélyebben tanulmányoznunk a légnyomás eloszlását, és meg tudunk magyarázni további érdekes dolgokat is, amelyek már biztosan nem szerepeltek földrajzórán. (Sőt, matematika-fizika szakos tanárjelöltként én annak idején egyetemen sem tanultam róluk.)

Térjünk vissza a nyomástérképekhez. Ha közelebbről megvizsgáljuk az interneten fellelhető térképeket, láthatjuk, hogy izobártérképeket csak a talajszinten szoktak rajzolni. A magasabb légrétegek nyomásviszonyait ábrázoló térképeken ehelyett az azonos nyomású felületek magasságának eloszlását adják meg. Az izobárfelületek szintvonalait a meteorológusok izohipszáknak nevezik [7]. Az 1. ábra is ilyen izohipszatérkép: a vonalak nem azonos magasságban egyenlő nyomásintervallumonként vannak feltüntetve, hanem az adott nyomású felületre vonatkozóan egyenlő magasságonként. Ezen az ábrán például az 500 hPa értékhez tartozó magasságok görbéi láthatók. A vonalakra úgy lehet gondolni, hogy szintvonalas domborzati térképet készítettünk

arról a felületről, amely felett a levegőnek pontosan a fele található.

Ekkor a nyomáskülönbségből eredő (1) erő okozta gyorsulás

$$\begin{aligned}\frac{F_p}{m} &= -\frac{V}{m} \frac{\Delta p}{\Delta x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\Delta p}{\Delta x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\Delta p}{\Delta z} \frac{\Delta z}{\Delta x} = \\ &= -\frac{1}{\rho}(-\rho g) \frac{\Delta z}{\Delta x} = g \frac{\Delta z}{\Delta x},\end{aligned}$$

ahol z magasságot jelöl. Ebből már látszik, hogy miért jobb $\Delta p/\Delta x$ helyett $\Delta p/\Delta z$ és $\Delta z/\Delta x$ szorzatát írni: a hidrosztatikából emlékszünk arra, hogy adott helyen a nyomásnak a magassággal való csökkenése az ottani sűrűséggel arányos, amely helyről helyre más lehet, ezzel a módszerrel viszont ki tudjuk küszöbölni a sűrűséget a számolásból. Δz leolvasható a görbékről, Δx lemérhető a térképről, rajtuk kívül csak g -re van szükségünk. A nyomásfelület meredekségéből kiszámolt vízszintes gyorsulást a Coriolis-gyorsulással egyenlővé téve kapjuk a sebességet:

$$v = \frac{1}{2\Omega \sin\phi} \frac{1}{\rho} \frac{\Delta p}{\Delta x} = \frac{1}{2\Omega \sin\phi} g \frac{\Delta z}{\Delta x}. \quad (2)$$

Amikor a vízszint sem vízszintes

Hasonló megfontolást a vizekre is alkalmazhatunk. A tengereken létezik egy természetadta kézzelfogható izobárfelület is: a vízfelszín maga, ahol légköri nyomás uralkodik. Az eddigiek alapján ez azt jelenti, hogy az erőegyensúlyban levő áramló vízhez döntött felület tartozik.

A gyerekek is ismerik a Golf-áramlást. Az egyszerűség végett tekintsük azt a szakaszát, ahol észak felé halad Florida partjainál, É30° földrajzi szélességen. Az áramlat szélessége körülbelül 100 m, sebessége 1 m/s nagyságrendű. Ezekből az adatokból nagyságrendileg tudjuk becsülni a tengerfelszín döntöttségének mértékét, ha a felszín meredekségét (2)-ből kifejezzük a sebességgel:

$$\begin{aligned}\frac{\Delta z}{\Delta x} &= \frac{2\Omega \sin\phi v}{g} = \\ &= \frac{2 \cdot 7,3 \cdot 10^{-5} \cdot 0,5 \cdot 1}{10} = 7,3 \cdot 10^{-6} \approx 10^{-5}.\end{aligned}$$

Az eredmény 100 km-enként körülbelül 1 méter emelkedést jelent nyugatról kelet felé, ami jó egyezést mutat a műholdas mérésekből ismert értékekkel.

Fantom-akadályok

Ha egy folyadékban (akár a levegőben, akár a vízben) a sűrűség állandónak tekinthető, vagyis nem változik a magassággal, akkor a felszín bármelyik pontjában a függőleges mentén felfelé haladva ugyanolyan ütem-

ben csökken a nyomás, a nyomásfelületek ezért párhuzamosak, mindenhol ugyanannyira lejtjenek. Ebből az következik, hogy a függőleges mentén a vízszintes irányú sebesség is végig ugyanannyi.

(Ha nem akarunk a nyomásfelületek szintvonalaira áttérni, úgy is fogalmazhatunk, hogy kicsivel nagyobb magasságban pontosan ugyanoda kell rajzolni a térképre az izobárokat, csak éppen mindegyikre pontosan ugyanannyival kisebb nyomást kell ráírni. A nyomás megváltozása egységnyi vízszintes távolságon ugyanannyi, mint lejjebb, ezért – mivel a sűrűség is ugyanannyi, mint lejjebb – a vízszintes sebesség is ugyanannyi kell, hogy legyen.)

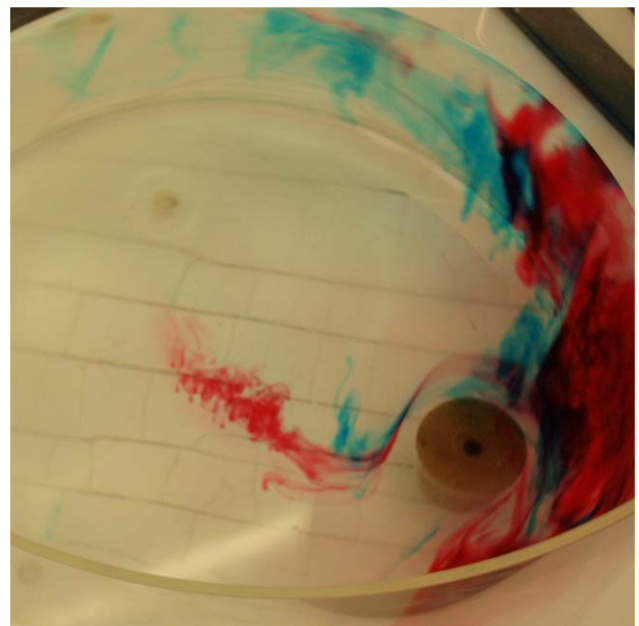
Ne felejtjük el, hogy homogén folyadékról van szó, amely elég gyorsan forog ahhoz, hogy a Coriolis-erő meghatározó legyen!

A forgatott homogén folyadéknak ezt a meglepő, oszlopos szerkezetet – azaz függőleges eltolásra való invarianciát – mutató viselkedését, az ELTE Környezeti Áramlások Kármán Laboratóriumában kézzelfogható módon be is mutatják az érdeklődő iskolásoknak. Egyszerű eszközökkel számos légköri és óceáni jelenséget tudnak a laborasztalon modellezni, még a klímaváltozást is [8], a kutatómunka mellett azonban a Kármán Laboratórium ismeretterjesztő tevékenységet is folytat, amelyet jó lenne, ha több fizikatanár megismerne és hasznosítana.

Az egyik demonstrációs kísérletben [9] forgatott kádban levő vízbe egy kevés festéket fecskendeznek. Álló tartályban ugyanez a befecskendezett festék háromdimenziós turbulenciát mutató felhő formájában gomolyogna. A forgatott tartályban viszont minden másképpen van, a festék függőleges felületek mentén terjed szét, függőnszerű alakzatot formázva (2. ábra).

Az áramlás kétdimenzióssá válásának legérdekesebb következményét pedig akkor figyelhetjük meg,

2. ábra. Homogén, forgatott folyadékban kialakuló áramlás demonstrációja a Kármán Laboratóriumban.





3. ábra. Kármán-féle örvényút Guadalupe szigete felett [12].

ha a tartály fenekére akadályt helyezünk. Ez látható a 2. ábra képen is. Noha az akadály sokkal kisebb a vízmélységnél, a festékfüggönyök mégsem csak ott kerülnek meg, ahol beleütköznenek, vagyis alul, hanem fölül is, ahol már nincsen semmi akadály. Az akadály fölé nem folyik a festék, inkább az egész fantom-oszlopot megkerüli.

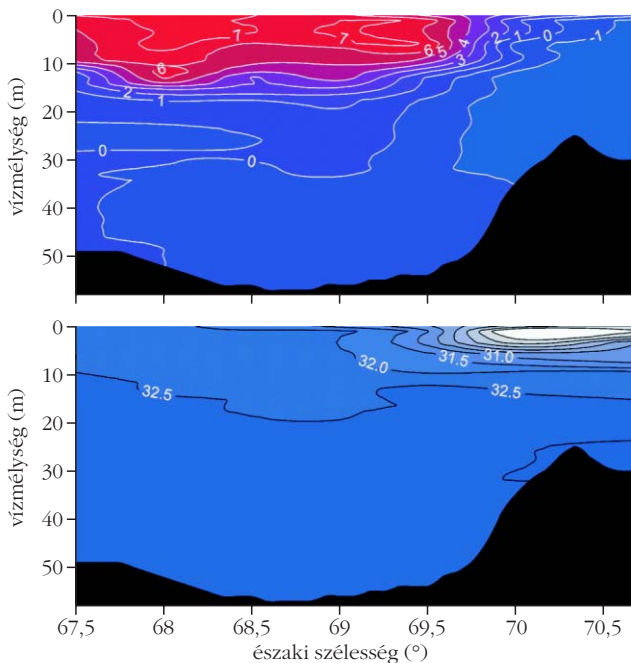
A természetben is meg lehet figyelni [10] mind a függönyszerű viselkedést, mind az akadály fölött nyugalomban maradó folyadékoszlopot, a Taylor-oszlopot. A sarki fényt ionizált gázok bocsátják ki a magaslégtérben. Ha a sűrűség homogénnek tekinthető, az egymás fölötti gázrészecskének azonosan kell mozogniuk, ezért függönyszerűen oszlanak el (mint például a [11] videón, vagy lásd e szám címlapját).

A 3. ábrán a Csendes-óceánban, Mexikó vonalában található Guadalupe szigete látszik. A felhők sokkal magasabban vannak, mint a sziget, mégis mutatják, hogy a szél kikerüli a szigetet, és az áramlás két-dimenziós szerkezete szépen kirajzolja a jól ismert Kármán-féle örvényutat.

Befejezésül álljon itt egy tengeri példa. A Csukcs-tenger a Bering-szorostól északra terül el Szibéria és Alaszka partjai között, északi természetes határa a kontinentális self pereme. Az egész egy nagyjából sík plató körülbelül 50 m mélyen, amelyből körülbelül 20 méterre kiemelkedik a Herald-zátony (4. ábra, felül) [13]. Nyáron a Csukcs-tenger jégtakarója felolvad, főként a Bering-szoros felől érkező, melegebb vizet szállító áramlat hatására. Kutatók azt vizsgálták, hogyan változik a jégtakaró határa az idővel [14, 15].

Három egymást követő év mérései közel azonos eredményre vezettek, a jégtakaró visszahúzódása tehát rendszeresen ugyanúgy zajlik. Sőt, már 19. századi bálnavadász hajók naplójában is szerepel a megfigyelés, hogy a Herald-zátony mindkét oldalán előrenyúl egy-egy meleg nyelv, a zátonyt mintegy megkerülve. Két oldalt, sőt a zátonyon túl is felolvadt már a jég, miközben a zátony feletti vízoszlop még sokáig hideg és jégfedte marad.

Nem az a meglepő, hogy a zátonyba mint akadályba ütközve a melegebb víz némileg irányt változtat, az az érdekes, hogy a zátony teteje fölé sem folyik a meleg víz (4. ábra, középen). A zátony melletti vizek



4. ábra. A Csukcs-tenger [13] a Herald-zátonnyal (felül), a tengervíz hőmérséklete (középen) és sótartalma (alul) a vízmélység és az északi szélesség függvényében a nyugati hosszúság 170°-a mentén, a zátony közelében [15].

hőmérsékleti profilja csaknem függőleges frontot jelez, és ugyanilyen markáns frontra utalnak a sótartalom-mérések is. A zátony fölött még mindig meglévő jégtakaró alatt van a kisebb sótartalmú, hidegebb, régi víz, távolabb pedig a sósabb, újonnan érkezett, melegebb víz (4. ábra, alul).

Mérések szerint a Csukcs-tenger vize gyakorlatilag homogén sűrűségű, a rendszer minden egyéb paraméterének értéke is megfelelő az oszlopos természetű áramlás kialakulásához, tehát minden bizonnyal itt is Taylor-oszlop létrejöttének lehetünk tanúi.

Összefoglalás

A légkör és a tengerek fizikai folyamatait napjainkban intenzív tudományos érdeklődés övezi. A környezetfizikai tartalmak a jelenlegi középiskolai oktatásban döntően a földrajz tantárgy keretébe tartoznak. Ott azonban a fizikai háttér nem kap elég hangsúlyt, és többnyire nem is fogalmazódik meg pontosan. A Föld forgásával kapcsolatos jelenségek kapcsán is megmutatik tehát: a fizikaoktatásra hárul a feladat, hogy felkeltse a tudományos magyarázat igényét, és meg is adja a magyarázatot.

Irodalom

1. weatheronline.co.uk
2. A. Gróf: Carousels to Coriolis. What did you learn in geography? In: *Teaching Physics Innovately*. Konferenciakiadvány, szerk: A. Király, T. Tél, ELTE, Budapest 2015., 119., parrise.elte.hu/tpi-15/proceedings.php
3. Tél T.: A Coriolis-erő és a modern környezetfizika: a lefolyótól a ciklonokig *Fizikai Szemle* 56/8 (2006) 263.

4. Hraskó P.: Elmélkedés a Coriolis- és a centrifugális erőről. *Fizikai Szemle* 63/5 (2013) 168.
5. Szeidemann Á.: Fizika és földrajz határán – Tanítható-e a Coriolis-erő? *Fizikai Szemle* 63/10 (2013) 352.
6. Woynarovich F.: A földfelszín forgása egy általános pontban. *Fizikai Szemle* 64/6 (2014) 203.
7. meted.ucar.edu;
8. M. Vincze: Modelling climate change in the laboratory. In: *Teaching Physics Innovately*. Konferenciakiadvány, szerk: A. Király, T. Tél, ELTE, Budapest 2015., 107. o. parrise.elte.hu/tpi-15/proceedings.php
9. Gyüre B., Jánosi I., Szabó K. G., Tél T.: Környezeti áramlások. Szemelvények a Kármán Laboratórium kísérleteiből, 2. rész: Kísérletek forgatott folyadékokkal. *Légkör* 51/2 (2006) 6.
10. Jánosi I., Tél T.: *Bevezetés a környezeti áramlások fizikájába*. ELTE, TTK, Fizikai Intézet, Budapest 2011.
11. www.youtube.com/watch?v=1DXHE4kt3Fw
12. earthobservatory.nasa.gov
13. <http://ak.audubon.org/conservation/arctic-marine-synthesis-atlas-chukchi-and-beaufort-seas>
14. S. Martin, R. Drucker: The effect of possible Taylor columns on the summer ice retreat in the Chukchi Sea. *Journal of Geophysical Research* 102/C5 (1997) 473.
15. J. Zhao, J. Shu, M. Jin, C. Li, Y. Jiao, Y. Lu: Water mass structure Chukchi Sea during ice melting period in the Summer of 1999. *Advances in Earth Science* 25/2 (2010) 154.

EXOBOLYGÓK MINDEN SZINTEN

Horváth Zsuzsa

Kosztolányi Dezső Gimnázium, Budapest

A jelenlegi csillagászati kutatások egyik legeredményesebb ága az exobolygó-kutatás. A legújabb tudományos eredményeket általában nehéz megismertetni tanulóinkkal, de ez alól kivételt jelentenek az exobolygók. Napjainkban már nemcsak azt tudjuk, hogy vannak Napunkon kívül más csillagok körül is bolygókísérők, exobolygók, hanem több mint 3500 exobolygó sok tulajdonságát is ismerjük (például keringési idejét, tömegét, méretét, sűrűségét, hőmérsékletét) [1]. Így azt is látjuk, hogy léteznek a mi Naprendszerünkhöz hasonló és attól különböző bolygórendszerek is. Galaxisunk változatos, sokszínű exobolygó-rendszereinek megismerésén túl azt is szeretnénk tudni, hogy vannak-e máshol is Földhöz hasonló helyek, amelyek megteremtik az élet kialakulásának lehetőségét. A Föld ikertestvérét ugyan még nem ta-

lálták meg, de több exobolygó sok jellemzőjében hasonlít bolygónkra. Diákjaink filmekben, számítógépes játékokban találkozhatnak a földön kívüli (értelmes) élettel, így az is érdekli őket, hogy egyedül vagyunk-e a Világegyetemben.

Ezekről a kérdésekről a fizikaórákon is beszélhetünk. A fizika kerettanterv új tartalmi elemeinek egyike az exobolygók kutatása és a földön kívüli élet keresése, amit – a csillagászat egyéb más témái között – mindkét gimnáziumi fizika kerettantervi változat a 11. évfolyamon tárgyal. Az *A* változat *Az űrkutatás hatása mindennapjainkra* tematikus egységben az exobolygók kutatását, az élet feltételeinek tér- és időbeli korlátait, sőt az értelmes élet kutatását is megemlíti [2]. A *B* változatban a *Csillagászat és asztrofizika elemei* tematikai egységben kapott helyet a földihez hasonló élet, kultúra esélye és keresése, valamint az exobolygók kutatása [2]. Ezekből a megfogalmazásokból jól látszik, hogy mindkét változat összeköti az exobolygók témáját a földön kívüli (értelmes) élet keresésével. Logikus ez a kapcsolódás, hiszen először a megfelelő helyeket kell megtalálni, ahol majd további vizsgálatokkal esetleg életjeleket is felfedezhetünk. Csak a földi életformákat ismerjük, ezért vizet keresünk az Univerzumban, hiszen erre minden földi élőlénynek szüksége van. Így olyan exobolygók után kutatunk, amelyek csillaguk lakhatósági zónájában keringenek, azaz felszínükön tartósan jelen lehet a víz. A földrajz kerettanterv is fontosnak tartja ezt a témát, már a 9. évfolyamon *A Föld kozmikus környezete* tematikus egységben szerepelnek a Naprendszeren kívüli bolygók kutatásának új eredményei [2].

A cikk az Eötvös Loránd Fizikai Társulat szegedi Vándorgyűlésén, 2016. augusztus 25-én elhangzott előadás alapján készült.

A cikk elkészítését a Magyar Tudományos Akadémia Tantárgy-pedagógiai Kutatási Programja támogatta.

Köszönöm a munkám során nyújtott segítséget Érdi Bálintnak és Tél Tamásnak.

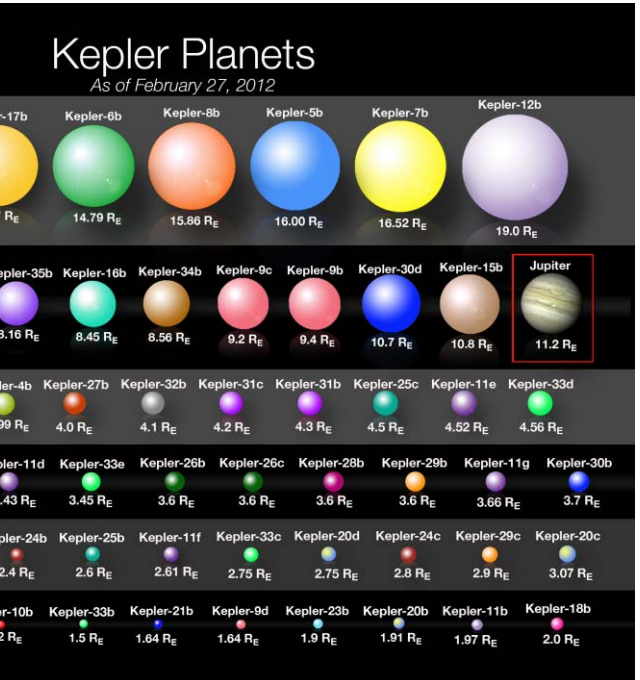


Horváth Zsuzsa a budapesti Kosztolányi Dezső Gimnázium matematika-fizika szakos tanára. Az ELTE TTK Fizika Doktori Iskola – Fizika Tanítása Program keretében a csillagászat tanítását kutatja, azon belül is főleg az exobolygók témájának oktatásával foglalkozik. Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat és a Magyar Asztronautikai Társaság tagja.

Diákjaink többségének természetesen már van elképzelése a korábbi évfolyamokon is a távoli exobolygókról. Jobb esetben ismeretterjesztő műsorban hallanak róluk érdekességeket, de sokakban a számítógépes játékok, filmek, sorozatok helyszíneiként jelennek meg a Naprendszeren (vagy éppen galaxisunkon) kívüli exobolygók. Ezek általában különleges helyek, Földünkre ritkán hasonlítanak. Így van ez az eddig felfedezett exobolygókkal is, sok nemcsak bolygónkra, de a Naprendszer más bolygóira sem hasonlít. Új csoportosítást vezettek be a kutatók, amelyhez a bolygók tömegén kívül a hőmérsékletüket (vagy csillaguk körüli keringési pályájukat) is figyelembe vették. Meglepő kezdeti exobolygó-felfedezések voltak az úgynevezett forró jupiterek, a csillagukhoz igen közel keringő, sokszor még a Jupiternél is nagyobb gázóriások. A Naprendszerben nem találunk példát a Földünkénél lényegesen nagyobb (öt-tízszeres tömegű) kőzetbolygóra sem, amit szuperföldnek neveztek el. Nehéz a csoportba sorolás, mert már a Kepler-űrtávcső korai eredményeiből is látszott, hogy különböző méretű exobolygók léteznek (1. ábra), folyamatos az átmenet a Földnél is kisebbektől a Jupiternél jóval nagyobbakig [3].

Az ismert exobolygók egyfajta periódusos rendszerhez hasonló táblázatát találhatjuk meg a Puerto Rico Egyetem honlapján (2. ábra). Összehasonlítás-képpen a Naprendszer égitestjeit is hasonló táblázatba rendezték, sőt a Kepler-űrtávcső által felfedezett exobolygójelölteket csoportosítását is megadták ebben a formában [4].

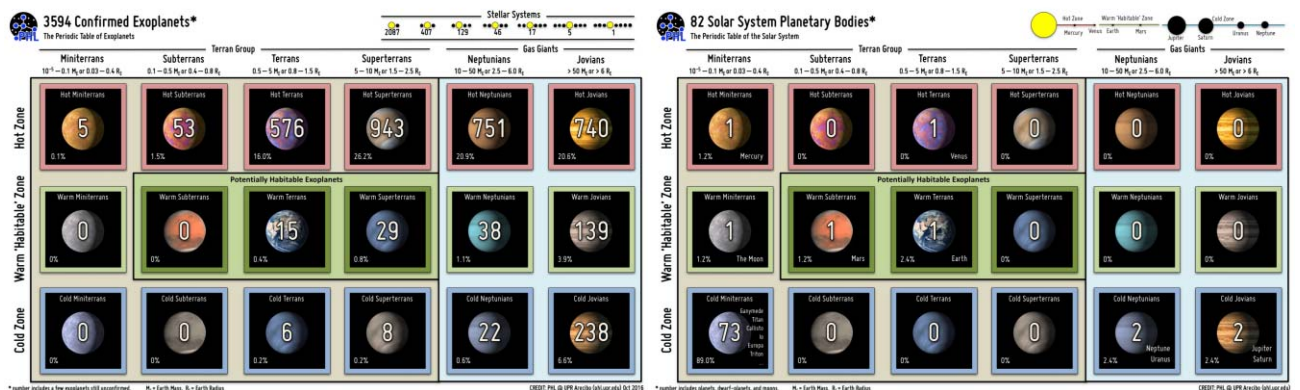
Nemcsak a kerettantervbe került be az exobolygók témája, hanem a legújabb fizika- (és földrajz-) tankönyvek is foglalkoznak már az exobolygókkal. Például a Nemzeti Köznevelési Portálon található 11. osztályos fizikakönyvben a *Van-e élet a Földön kívül?* című leckében az exobolygók legeredményesebb felfedezési módszerét, a tranzitmódszert is bemutatják. Egy következő *Ha majd a Nap kibűl...* című leckében újra előkerül az exobolygók témája, mint egy esetleges kitelepítési helyszín az emberiség számára [5]. Miután nemrég a legközelebbi csillag, a Proxima Centauri körül is felfedeztek exobolygót (Proxima Centauri b), amely ráadásul csillagának lakhatósági zónájában kering, biztosan felgyorsulnak az űrutazással kapcsolatos kutatások is [1].



1. ábra. A Kepler-űrtávcső által felfedezett, különböző méretű exobolygók, R_E a Föld sugarát jelöli (forrás: NASA/Kepler Mission/Wendy Stenzel).

Érdekes, hogy még mielőtt a tankönyvekben olvashattunk volna az exobolygókról, már a fizikaértségin találhattunk velük kapcsolatos feladatokat, mind közép-, mind emelt szinten [6]. Egy ilyen érettségi feladat kapcsán olvashatunk az exobolygókról és felfedezési módszereikről egy korábbi *Fizikai Szemle*-cikkben [7]. Érdemes megjegyezni, hogy néhány éven keresztül (2009–2014), (a 2007-ben akkreditált) csilla-

2. ábra. A Puerto Rico Egyetem „periódusos táblázata” (credit: PHL@UPR Arcibo).



gászat tantárgyból is lehetett érettségizni, amelynek követelményrendszerében *A Naprendszer* témakörénél található az exobolygók és kutatásuk [8]. Csillagászatból ugyan már nem lehet érettségizni, de a legújabb változások nem érintették a fizikaérettségén a *Gravitáció és csillagászat* részarányát, maradt 10%.

A Nemzetközi Csillagászati és Asztrofizikai Diákolimpia követelményrendszerében is megtalálhatók az exobolygók és felfedezési módszereik. A 2015-ös diákolimpia egyik rövid elméleti feladata a GJ 876 exobolygórendszerrel volt kapcsolatos, megoldásánál pedig Kepler harmadik törvényének alkalmazását várták el a versenyzőktől. A feladatot és megoldását az alábbiakban közlöm, mert ez akár tanórán is felhasználható.

Diákolimpiai feladat

A GJ 876 ($M_{\text{GJ 876}} = (0,33 \pm 0,03) M_N$) csillag körül felfedeztek néhány exobolygót, ezek adatait láthatjuk a következő táblázatban, ahol M_N a Nap, m_F a Föld és m_J a Jupiter tömege ($m_J = 1,8913 \cdot 10^{27}$ kg). Tételezzük fel, hogy az exobolygók ugyanabban az irányban keringenek a GJ 876 csillag körül. Két bolygóról akkor mondjuk, hogy rezonanciában van, ha a keringési idejük aránya jó közelítéssel kis egész számok hányadosa. Keressünk a GJ 876 rendszerben rezonanciában levő exobolygókat!

GJ 876 csillag bolygója	tömege	fél nagytengelye (CSE)
GJ 876b	$2,276 m_J$	0,2083
GJ 876c	$0,714 m_J$	0,1296
GJ 876d	$6,8 m_F$	0,0208
GJ 876e	$15 m_F$	0,334

Megoldás

Kepler harmadik törvénye írja le a kapcsolatot egy (M_{cs} tömegű) csillag körül keringő (m_b tömegű) (exo)-bolygó T keringési ideje és pályája a fél nagytengelye között:

$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{k^2 (M_{cs} + m_b)}{4 \pi^2},$$

ahol $k = 0,0172$ a Gauss-féle gravitációs állandó, ha a tömeget a Nap tömegében, a keringési időt napban, a fél nagytengelyt csillagászati egységben adjuk meg. A Gauss-féle gravitációs állandó négyzete megegyezik az általános gravitációs állandóval ($k^2 = G = 6,673 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2 \text{ kg}^{-2}$).

Két exobolygó T_1 és T_2 keringési ideje négyzetének hányadosa:

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{(M_{cs} + m_2) a_1^3}{(M_{cs} + m_1) a_2^3},$$

ahol M_{cs} most is a csillag, m_1 és m_2 pedig a két exobolygó tömege.

A tömegeket célszerű ugyanahhoz az égitesthez, például a Jupiterhez viszonyítani (bár értékeiket konkrétan is ki lehetne számolni, hiszen megadták a Jupiter tömegét, de ez a feladat szempontjából felesleges). A Nap tömege 1047-szerese a Jupiter m_J tömegének, míg a Jupiter tömege 318-szorosa a Föld m_F tömegének. A GJ 876 csillag tömege így:

$$M_{\text{GJ 876}} = (0,33 \pm 0,03) M_{\text{Nap}} = (345,5 \pm 31) m_J.$$

A GJ 876d (továbbiakban egyszerűen *d*) jelű exobolygó tömege $m_d = 6,8 m_F = 0,0214 m_J$, az *e* jelű exobolygó tömege pedig: $m_e = 15 m_F = 0,047 m_J$.

Az exobolygó és a csillag tömegének összegét jó közelítéssel helyettesíthetjük a csillag tömegével, majd képletünk a középiskolások által ismert alakra egyszerűsödik:

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}.$$

A GJ 876 csillag ismert exobolygói a következő sorrendben követik egymást a csillagtól távolodva: *d*, *c*, *b* és *e*. Ezt a sorrendet az exobolygópályák fél nagytengelyeinek értékéből lehet megállapítani. (A csillag neve utáni kis betűket az exobolygók felfedezésük sorrendjében kapják, a *b* betűtől kezdve.)

A *c* és a *d* exobolygók keringési idejének hányadosa:

$$\frac{T_c}{T_d} = \sqrt{\frac{a_c^3}{a_d^3}} \approx 31,7$$

amely nem írható fel kis egész számok hányadosaként. Ha a *b* vagy az *e* exobolygók keringési idejét viszonyítjuk a *d* keringési idejéhez, akkor még nagyobb számot kapunk, tehát ezeket nem érdemes kiszámolni. Hasonlóan a *b* és *c* keringési idejének aránya: 2,04, amely közelítőleg a 2:1-es rezonanciának felel meg. Meg kell még vizsgálnunk az *e* és *b* exobolygók keringési idejének arányát is, amelyre 2,03 értéket kapunk, ez az előzőhöz hasonlóan szintén 2:1-es rezonanciának felel meg. E két rezonanciából következik, hogy az *e* és *c* exobolygók 4:1-es rezonanciában vannak.

Tehát a GJ 876 csillag exobolygórendszerében három bolygó áll egymással rezonanciában ($T_c : T_b : T_e = 1:2:4$). Ellenőrzésképpen a mért (exobolygó-katalógusban megadott) keringési periódusok: 30,23 nap, 61,03 nap és 124,69 nap, amelyek jól egyeznek eredményünkkel [1].

Ilyen rezonancia Naprendszerünkben is megtalálható, igaz nem bolygók, hanem a Jupiter három belső Galilei-holdja között ($T_{\text{Io}} : T_{\text{Europa}} : T_{\text{Ganymedes}} = 1:2:4$, keringési idejük rendre: 1,77 nap, 3,55 nap és 7,16 nap).

2019-ben Magyarország rendezi a Nemzetközi Asztrofizikai és Csillagászati Diákolimpiát, a feladatok között nagy valószínűséggel lesz exobolygókkal kapcsolatos, érdekes probléma. Ilyen feladatra a Nemzetközi Fizikai Diákolimpián is van esély, hiszen követelményrendszerében szerepel az égi mechanika témakör, de akár fényerősséggel vagy távcsövekkel kapcsolatban is adhatnak exobolygós feladatot.

Csillagászaink jeleskednek az exobolygó-kutatásban, több nemzetközi együttműködésben is részt vesznek, sőt van egy magyar exobolygó-felfedező csoport is, a HATNet (Hungarian-made Automated Telescope Network, Magyar Automatikus Távcsohálózat, <http://hatnet.org>). Bakos Gáspár vezetésével, 11 cm átmérőjű automatizált távcsovekkel keresnek exobolygókat. A robotizált távcsoveket olyan helyekre igyekeztek telepíteni, ahol nemcsak az észlelési feltételek megfelelőek, hanem a távcsovek egymás utáni megfigyelései szinte folyamatos mérést tesznek lehetővé. Vannak távcsoveik Arizonában, a Hawaii-szigeteken, Izraelben, Chilében, Namíbiában és Ausztráliában is. A helyszínekből láthatjuk, hogy mind az északi, mind a déli égbolton (HAT-South, Hungarian-made Automated Telescope Network-South, <http://hatsouth.org>) is tudnak vizsgálni. Az első, 2006-os felfedezésük óta az északi égbolton 60, míg a déli égbolton 35 exobolygót találtak.

Az exobolygók témája igen alkalmas az olyan versenyekre is, amelyeken egy diák által kiválasztott témában kell elmélyülni, kutatni. Ilyen nemzetközi verseny például az *Első lépés a Nobel-díj felé* (<http://www.ifpan.edu.pl/firststep>), amelyet 1992-től kezdve évente rendeznek meg Lengyelországban. 2011-ben Galgóczi Gábor *Inferring the Physical Parameters of Extrasolar Planets with the Transit Method* című munkájával nyert első díjat ezen a versenyen. Munkájához exobolygó-kutatásokban járatos csillagászoktól kapott segítséget, illetve lehetősége nyílt többek között a Piskéztetői Observatóriumban méréseket végezni.

Amatőr csillagászok is végezhetnek exobolygó-észleléseket, amelyhez például az *Exoplanet Observing for Amateurs* (http://brucegary.net/book_EOA/x.htm) könyvből kaphatnak segítséget.

Arra is van lehetőség, hogy valódi mérési adatokból keressünk exobolygókat. A *Planet Hunter* weboldalon (<https://www.planethunters.org>) a Kepler-űrtávcso méréseiből készült fénygörbékben bárki bejelölheti a fényességsökkenési helyeket, amelyeket akár exobolygók is okozhatnak. Az emberek jó mintázatfelismerő képessége teszi eredményessé a keresést. Az e projektben felfedezett első exobolygó, a PH-1b (Kepler-64b) igen különleges hely, hiszen az egy négy csillagot tartalmazó rendszerben található. Az egyik csillagpár körül 138 napos periódussal, 0,6 CSE-re keringő, PH-1b exobolygó fél jupiternyi tömegű. A csillagpártól 1000 CSE-re egy másik csillagkettős is található a rendszerben.

Ezen „exobolygóvadász” program sikerességét mutatja, hogy a NASA-val együttműködve egy 9 leckéből álló, tanítást segítő anyagot készítettek (Planet Hunters Guide: <https://www.planethunters.org/#/education>). Ebben a Naprendszerből kiindulva jutunk el az exobolygókig. Felfedezési módszereikkel, tulajdonságaikkal, lakhatóságukkal ismertetnek meg az egyes tananyagleírások. A projekt jellegéből adódóan különös figyelmet szentelnek a tranzitmódszernek, és az egész anyagot átszövi a földön kívüli élet keresése.

Sajnos diákjaink többsége nemhogy csillagászati vagy fizikai versenyeken nem vesz részt, de a fizika érettségig sem sokan választják, így ilyen formákban nem találkozunk az exobolygókkal. Viszont számukra is érdekes a téma, róla szívesen hallgatnak információkat, gyűjtenek adatokat, néznek kisfilmeket, vagy éppen interaktív internetes oldalakat. Szerencsére rájuk is gondoltak az úrkutatási szervezetek, egyetemek, csillagvizsgálók, természettudományos múzeumok, számos lehetőséget teremtve az exobolygókkal való élményszerű ismerkedésre. Ezek közül ajánlok néhányat a következőkben.

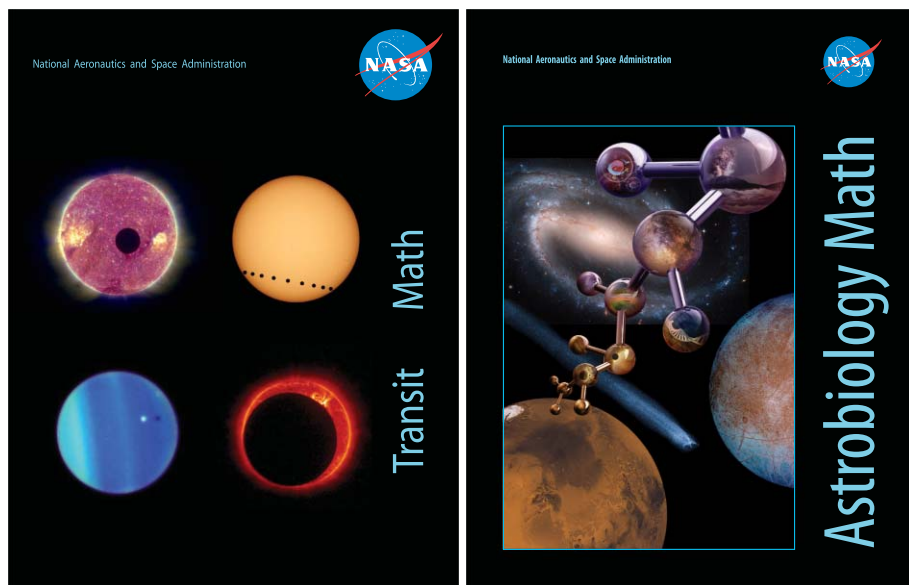
Több exobolygókatalógus is létezik. Ezek közül a *The Extrasolar Planets Encyclopaedia* az egyik leginkább naprakész, hitelességét tudományos cikkekkel támasztja alá [1].

Hasonlóan hiteles és tudományos a NASA *Exoplanet Archive* (A Service of NASA Exoplanet Science Institute) (<http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/index.html>). Ezen a honlapon az exobolygójelöltek adatai is szerepelnek. Az előző *Exobolygó enciklopédiánál* interaktívabb keresést biztosít, és a legújabb exobolygókkal kapcsolatos eredményekre is felhívja a figyelmet.

Az *Open Exoplanet Catalogue* (<http://www.openexoplanetcatalogue.com>) művészi ábrázolásokat is mutat az exobolygókról. Láthatjuk a központi csillag(ok) lakhatósági zónáját és hogy ehhez képest miként helyezkednek el az exobolygók. A Naprendszer bolygóival való nagyság szerinti összehasonlító ábra is segít az exobolygók megismerésében.

A Puerto Rico Egyetem (Planetary Habitability Laboratory) hozta létre a *Lakható Exobolygók Katalógusát* (PHL Mapping the Habitable Universe). Különbözőképpen rangsorolják a lakhatósági zónában keringő exobolygókat, például a Földhöz való hasonlóság szerint, vagy éppen, hogy milyen távol vannak tőlünk. Említésre méltó az exobolygó-felfedező módszereket bemutató animációjuk is, ahol azt mutatják meg, hogy milyennek látnánk egy exobolygó gazdacsillagának fényességváltozását. Az asztrobiológiai híreket is követhetjük ezen a webhelyen. Egy kisfilm (*Wanderers*) is található a kezdőoldalon, amely akár egy jövőbeli naprendszerbeli űrturizmus reklámfilmje is lehetne. Érdemes diákjainknak ajánlani, időről időre felkeresni ezt a honlapot. [4]

A NASA *Eyes on Exoplanet* interaktív oldalán (<https://eyes.nasa.gov/eyes-on-exoplanets.html>) a felfedezett exobolygók és csillagaik adatain kívül az exobolygók csillaguk körüli keringését is láthatjuk. Beállíthatjuk, hogy a program a lakhatósági zónát is mutassa. A Naprendszerrel való összehasonlításra is van lehetőség. Megadják az odaútazás időtartamát különböző közlekedési eszközzel (autó, gyorsvonat, repülő), illetve fénysebességgel haladva. Exobolygós híreket lehet olvasni, különleges exobolygókat keresni, még az exobolygó-kereső űrtávcsovekről is találunk rövid leírást.



3. ábra. A NASA két, exobolygós feladatokat tartalmazó gyűjteménye.

Gl 581d exobolygó adatait és képét mutatják. Az *Alien Safari* a Föld extrém élőhelyeinek lakóival ismerteti meg. Olyan különleges exobolygókat is bemutatnak (*Strange New Worlds*), amelyekhez hasonlókat a Naprendszerben nem találunk. Néhány ilyen exobolygóra való (képzeletbeli) utazáshoz készítettek plakátokat is (*Exoplanet Travel Bureau*). Egyiken, a Tootoone-nak elnevezett exobolygóra invitálnak, ahol árnyékunknak mindig van társa, hiszen a Kepler-16b exobolygó kettőscsillag körül kering, mint a *Star Wars* film Tootoone bolygója. Említésre méltó még a PSO J318.5-22

Készültek olyan csillagászati feladatok (*SpaceMath*), amelyek megfogalmazásukban új ismeretet is tanítanak, és általában egy szép képpel keltik fel az érdeklődést. Ilyen típusú feladatokkal a diákok (tudományos) szövegértését is fejleszthetjük, és nagy értékük még ezeknek a feladatoknak a valós adatok használata. A NASA több kötetnyi feladatsort (<http://spacemath.gsfc.nasa.gov/books.html>) készített, az exobolygós feladatok főleg a *Tranzit* és az *Asztrobiológia* gyűjteményekben szerepelnek (3. ábra). A feladatok részletes megoldásán kívül a felhasznált ismeretek rövid összefoglalóját és a tantervi kapcsolódásokat is megadják, igaz az amerikaihoz viszonyítva. Táblázatban közlik az egyes feladatoknál alkalmazott matematikai ismeretanyagot, és hogy milyen korosztálynak tanácsolják a felhasználásukat. A matematika tanítása során is fontos a valós problémafelvetés, így ezek a csillagászati feladatok a matematikaórákat is színesíthetik.

A legsikeresebb exobolygó-kereső távcső, a Kepler honlapja is gazdag. A projektről, sőt névadójáról, *Johannes Keplerről* és törvényeiről is olvashatunk. A felfedezett exobolygók részletes tulajdonságait tartalmazó táblázaton kívül vannak exobolygókkal és kutatásukkal kapcsolatos videók, animációk is ezen a honlapon. Interaktív módon mutatják be a tranzitos módszer lényegét és a kutatás menetét. Külön foglalkoznak az oktatással, az ajánlott foglalkozásterveket korcsoport szerinti bontásban is megadják [3].

Szórakoztató formában szerezhethetünk ismereteket az *Exoplanet Exploration* (Planets Beyond Our Solar System, <https://exoplanets.nasa.gov/interactives>) honlapról. A *Csillagközi utazástervezővel* (Interstellar Trip Planner) Naprendszerben belül, illetve azon kívül tervezhetünk utakat különböző közlekedési eszközökkel, közöttük a Voyager-űrszondával is. A *Bolygó-készítő* szimulációval láthatjuk, milyen lenne egy általunk elképzelt exobolygó. Csillagától való távolságát, méretét, életkorát és a csillag típusát is változtathatjuk. Összehasonlításképpen a Föld, a Mars és a

exobolygó, amelyet úgy hirdetnek, hogy ott az éjszakai élet soha nem ér véget. Ez az exobolygó szabadon vándorol a csillagok között, így egyik csillag fénye sem elég erős a nappali világossághoz. Az exobolygó-kutatás jelentős állomásait a *Historic Timeline* mutatja be. Az exobolygó-felfedező módszereket pedig látványos szimulációkból érthetjük meg.

A szinte minden diáknál megtalálható okos telefonokra, tabletekre is készültek színvonalas, naprakész exobolygós alkalmazások, ilyen például a *Hanno Rein* által készített és folyamatosan frissített, ingyenes Exoplanet iTunes program.

Versenyegek diákoknak

Vannak olyan versenyek is, ahol a tudományosság mellett az érdekfeszítő feldolgozás- és előadásmód is fontos szerepet játszik. Ezekre hosszan készülnek diákjaink, így a megszerzett tudás is tartósan rögzül bennük. Általában több oldalról is megvizsgálják a kiszemelt problémát, és sokszor van szükség tantárgyközi együttműködésre is. Két ilyen versenyt említek meg, egy hazait és egy nemzetközit, amelyen sikeresen szerepeltek tanulóim.

A *Fizika mindenkinek* és *Matematika mindenkinek* versenyeken két kategóriában vehetnek részt diákjaink: 9–10. és 11–13. évfolyamos tanulók alkotnak külön csoportot. Erre az ingyenes versenyre internetes jelentkezés során egy 15 diás előadás beküldésével lehet jelentkezni, majd a döntőre kiválasztott tanulók 10 percen belül mutathatják be előadásukat [9]. Iskolánkból kilencen diákok a *Matematika mindenkinek* versenyen a Drake-egyenlet feldolgozásával szerepeltek sikeresen (4. ábra). A Drake-egyenletnek nevezett képlet segítségével becsülhető, hogy hány értelmes civilizációval kerülhet kapcsolatba az emberiség. A formula egyes összetevőit felbecsültettük iskolánk diákjaival. A kiértékelés nem volt egyszerű, mert sokan nem számszerűsít-



4. ábra. Brenner Dominik (Kosztolányi Dezső Gimnázium, Budapest tanulója) előadás közben a *Matematika mindenkinek* versenyen.

tették becsléseiket, de az kiderült, hogy nagyon kevés járatosak a témában. Az elkészített előadást nemcsak a versenyen mondták el tanulói, hanem diáktársaiknak is, hogy ők is megismerhessék a tudomány mai állása szerinti eredményeket és összehasonlíthassák az általuk becsült (tippelt) értékekkel. A diasorozat megtalálható iskolánk honlapján [10].

Az *Odysseus* nemzetközi csillagászati versenyen több témakört és azokon belül is több lehetőséget adnak meg, de a versenyzők – három korcsoportban – lényegében bármilyen csillagászati témával jelentkezhetnek. A felső tagozatos korosztálytól rajzot vártak, a 14–18 évesek, illetve az egyetemisták pedig többféle módon dolgozhattak fel egy általuk választott csillagászati témát [11]. Volt, aki kísérletezett-mért, volt, aki filmet-animációt készített, voltak esszé-szerű kidolgozások, tanulói pedig egy sci-fi képregénnyel készültek [9].

Négy nagy témakör szerepelt a versenyen: *A Naprendszer és űrtudományok, Európa az űrben, Emberek a Marson és Asztrobiológia – az élet keresése az Univerzumban*. Két kilencedikes diákom ez utóbbi témakörön belül választotta az *Írj egy sci-fi-t egy olyan űrutazásról, amelyben a fénysebesség 90%-ával repülhetünk egy exobolygóhoz* témát. A verseny első, országos fordulójában a diákok anyanyelvükön dolgozhattak, de a területi, majd az európai döntőre kijutott csapatoknak már angolul kellett előadniuk. Ajánlották, hogy egy projektmunkalapot is töltsünk ki, amelynek megírása folyamán többféleképpen is átgondoltuk a választott témát, megbeszéltük, melyek a valós és melyek a fantasztikus elemek a képregényben. Foglalkoztunk a fenntarthatóság témakörével és a földön kívüli élet kérdéskörének társadalmi vonatkozásaival is. A Grazban tartott területi döntőre készülve nemcsak angolra kellett lefordítani mindkét anyagunkat, hanem új ötletekre volt szükség az előadáshoz, hiszen nem vetíthettük ki diánként a képregényt. Diákjaim az igazi mozifilmekhez hasonlóan, figyelemfelkeltő rövid filmelőzetest készítettek a képregény képeiből. Három helyszínen (Föld, űrhajó, Gliese 667Cc), időrendben összehasonlítva mutatták be a jelentősebb történéseket. Végül pedig az exo-



5. ábra. Malatinszky Adél és Blum Norbert (Kosztolányi Dezső Gimnázium, Budapest tanuló) előadást tartanak *Odysseus-verseny* területi döntőjén Grazban.

bolygókkal kapcsolatos fontosabb ismeretek következtek. Többek között beszéltek az exobolygók változatosságáról, sokféleségéről. Készítettek a lakható exobolygókról egy szöveghőt, külön kiemelve a választott Gliese 667Cc exobolygót. Röviden ismertették a legeredményesebb exobolygó-kereső módszereket, és a legtöbb felfedezést adó Kepler-űrtávcsövet. Elmondták az űrből és a Földről történő távcsöves megfigyelések előnyeit és hátrányait. Megemlítették exobolygó-kereséssel foglalkozó jövőbeli űrmissziókat is. Ezek után beszéltek a lakhatósági zónáról. Megmutatták, hogyan függ e terület elhelyezkedése a csillag típusától, hőmérsékletétől. Ismertették a Földhöz leginkább hasonló exobolygókat, rögtön a lista elején a választott úti céllal, a Gliese 667Cc-vel. Bemutatták, hogy ez az exobolygó csillagának lakhatósági zónájában kering, majd érdekességgéppen a földi és az ezen exobolygón látható naplementéket összehasonlító képet is mutattak. Ezen exobolygó különlegessége, hogy hármas csillagrendszerben kering, így az egén egyszerre akár 3 nap is ragyoghat. Végül hiteles forrásait, segítő tanáraikat, diáktársaikat is megemlítették [9]. Előadásukat színesítette, hogy mindketten egy általuk tervezett, csillagokkal díszített pólót viseltek. Munkájukat nemcsak a területi döntőn adták elő, hanem diáktársaiknak, tanáraiknak is, felébresztve bennük a téma iránti érdeklődést. Említésre méltó, hogy egyikük gyakorlasként egy angol nyelvtanfolyamon is elmondhatta az előadást, amely nagyon tetszett az ott nyelvet tanulóknak és a nyelvtanárnak is (5. ábra).

Segítség a tanároknak

Készültek tanárokat segítő gyűjtemények is, mint például az igazán jelentős hírekhez kapcsolódó NASA *Teachable Moments* (<http://www.jpl.nasa.gov/edu/news/column/teachable-moments>), ebben egy-két éve tanácsokat, leírásokat, internetes forrásokat gyűjtenek össze, amelyek felhasználásával diákjainknak óráinkon hitelesen beszélhetünk ezekről a témákról. Exobolygókkal kapcsolatosan 2015-ben, a leginkább Földre hasonló Kepler-452b felfedezésekor adtak ki

egy ilyen anyagot, illetve a 2016. május eleji Merkúr-átvonulás kapcsán is utaltak az exobolygókra és azok tranzitjára.

Nemrég indult el a *Science WOW!* (<https://blogs.nasa.gov/educationsciencwow>) tanítást segítő csillagászati blog, amelyben egy-egy kérdés kapcsán gyűjtik össze a kapcsolódó anyagokat, forrásokat. A bolygók témaköre is szerepelt a *Mit nevezünk bolygónak?* kérdéskörnél.

Léteznek ingyenes tanártovábbképzések is a neten például *webinar* formában, amelyeken hozzáértő, sokszor tanítási tapasztalattal is rendelkező kutatók segítenek egy-egy téma tanításában. Gyakran tartanak ilyen előadást az exobolygókkal kapcsolatban is, egyiken többek között arra bátorítottak, hogy a Kepler-űrszonda valós adatait felhasználva ismertessük meg diákjainkkal az exobolygókat és felfedezési módszereiket. Ezen alkalmakon tanítást segítő anyagokat is ajánlanak, és fontos, hogy naprakész információkkal ismertetik meg a hallgatóságot, akik bármely országból részt vehetnek, kérdezhetnek, véleményüket nyilváníthatnak ezen webinarokon.

Az eddig leírtak kis szépséghibája, hogy a lehetőségek angol nyelvűek, bár ez diákjainknak már kevesebb akadályt jelent, mint gondolnánk, és a tanárok többsége is rendelkezik megfelelő nyelvtudással.

Léteznek élvezetes magyar nyelvű könyvek, összefoglaló írások, és az exobolygókkal kapcsolatos új hírekről is beszámolnak hiteles folyóiratok, webhelyek is. Könyvek közül a következőket ajánlom: *Almár Iván: Kozmikus társskereső* (Kossuth Kiadó, 2011), *Kereszturi Ákos: Asztrobiológia* (Magyar Csillagászati Egyesület, 2010). A szegedi egyetem exobolygós webes összefoglalóját (<http://astro.u-szeged.hu/ismeret/exo/extrasol.html>) is ajánlhatjuk diákjainknak. Az *Élet és Tudomány* és a *Természet Világa* fo-

lyóiratokban rendszeresen közölnek exobolygókkal kapcsolatos írásokat. A www.csillagaszat.hu és a www.urvilag.hu több éve, rendszeresen hírt adó weboldalakon pedig lehetőség van az újakon kívül a régebbiek között is keresgélni például az exobolygók témájában is.

A cikk terjedelmi korlátai miatt nem tudtam több, exobolygóval kapcsolatos, hiteles, érdekes, sokszor interaktív elemekkel gazdagított honlapot bemutatni, de sok hasznos, tanórákon is felhasználható anyag van még a világhálón. Remélem, sikerült felkeltenem az érdeklődést az exobolygók világában való tájékozódáshoz, hogy ilyen módon is motiválhassuk tanulóinkat. A téma interdiszciplináris, több kapcsolódási pont adódik a csillagászat, fizika, földrajz, kémia és biológia között, de ha a gazdag tudományos-fantasztikus irodalmat, képregényeket, filmeket, műalkotásokat is figyelembe vesszük, akkor a humán tárgyakat is felsorolhatnánk. Színesítsük a fizika és egyéb tanóráinkat az exobolygókkal kapcsolatos ismeretekkel!

Irodalom

1. <http://exoplanet.eu> (3527 ismert exobolygó, 2016. 09. 12.)
2. http://kerettanterv.ofi.hu/03_melleklet_9-12/index_4_gimn.html
3. <http://kepler.nasa.gov/multimedia/artwork/diagrams/?ImageID=221>
4. <http://phl.upr.edu/projects/habitable-exoplanets-catalog/media/pte>
5. <https://portal.nkp.hu>
6. <http://www.oktatas.hu/koznevels/erettsegi/feladatsorok>
7. <http://fizikaiszemle.hu/archivum/fsz1301/horvath1301.html> Horváth Zsuzsa, Érdi Bálint: Exobolygók a fizika érettségén – I–II. *Fizikai Szemle* 63 (2013) 14. és 60. o.
8. http://www.oktatas.hu/koznevels/erettsegi/akkreditalt_vizsgatargyak
9. http://hik.bme.hu/fizika_mindenkinek_2017
http://hik.bme.hu/matematika_mindenkinek_2017
http://hik.bme.hu/matematika_mindenkinek_2016_dijazottak
10. <http://kosztolanyi-bp.sulinet.hu/hirek/eredmenyeink>
11. <http://www.odysseus-contest.eu>

A Nap, ahogy még sohasem láttad.

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

VAN ÚJ A FÖLD FELETT

Keress a fizikaiszemle.hu mellékletek menüpontjában!

HŐMÉRSÉKLETMÉRÉS NAPFOGYATKOZÁSKOR

– a kutatásalapú tanulás alkalmazása

Finta Zsanett – Szombathelyi Nagy Lajos Gimnázium, ELTE Fizika Doktori Iskola – Fizika Tanítása Program
Mitre Zoltán – Nyugat-magyarországi Egyetem, Természettudományi és Műszaki Kar

Jelen írásunkban a kutatásalapú tanulás (KAT) módszerének egyik alkalmazását kívánjuk bemutatni mérési feladaton keresztül, kapcsolódva egy 2006-ban kezdődött kutatás eredményeihez. Először az eljárás módszertani háttérét ismertetjük, majd bemutatjuk a mérés menetét, az adatok feldolgozását. A mérés és a belőle levont következtetések egyaránt kapcsolódnak a fizika, a biológia és a természetföldrajz szakterületekhez.

Bevezetés

Sajnálattal látjuk, hogy a diákok egyre csökkenő érdeklődést mutatnak a természettudományos szaktárgyak – közöttük a fizika – iránt. Ezen probléma lehetséges megoldásaként említik többek között a minél gyakoribb kísérletezést és mérést, valamint a tehetséggondozó szakkörök létrehozását. Esetünkben e kettő kombinációja valósult meg, ahol szakkörön résztvevő diákok végeztek kutatás jellegű tevékenységet, kapcsolódva egy újszerű pedagógiai irányzat célkitűzéseivel, amely lehetővé teszi, hogy a diákok számára kézzelfoghatóvá tegyünk a fizika tudományát.

A hullámtannal kapcsolatos jelenségek a középiskolai fizikatanítás meghatározó és – sajnos – a diákok számára nehezen érthető anyagrészei közé tartoznak, amelyet kísérletek, gyakorlati példák nélkül jól megtanítani szinte lehetetlen. A fény hullámtermészetének tanításához a középiskola kezdeti szakaszán a napsugárzás vizsgálata kapcsolható, ezt szem előtt tartva vé-

geztük a diákokkal az ehhez kapcsolódó mérést. A mérés módszertani jellegét szeretnénk hangsúlyozni, de céljaink között szerepelt, hogy ha lehet, a kapott eredményekből tudományos következtetéseket vonjunk le.

A kutatási feladat megfogalmazása és a mérés menete

A mérés módszertani előkészítése

Sajnálatos tény, hogy a környezetfizika a kötelező gimnáziumi fizika tananyagnak nem (vagy csak elenyésző mértékben) része. Az ide kapcsolódó hősugárzás elmélete kiegészítő anyagként szerepel a 10. évfolyamos tankönyvekben, holott vizsgálata fontos szerepet tölt be 11. évfolyamon tanítandó kvantumfizika megalapozásánál. Abban azonban biztosak lehetünk, hogy a diákok rendelkeznek azokkal az ismeretekkel, hogy a légkör felmelegedésének forrása a Nap sugárzó energiája, illetve, hogy a földfelszíntől távolodva a levegő hőmérséklete egyre csökken. Már általános iskolában megismerik a hőmérséklet fogalmát és mérését, tudják, hogy a hőmérséklet a testek hőállapotát számszerűen – így mérhetően – jellemző fizikai mennyiség. Ezek az ismeretek később, a hőtan tárgyalásánál ismét felelevenítődnek.

A tanulók földrajzórán már a 9. osztályban megismerkednek a légköri jelenségekkel, és a jelenségeket irányító napsugárzással, valamint a rá vonatkozó fizikai törvényekkel. Megtanulják, hogy a sugárzó testek hőmérséklete és a kibocsátott hullámhossz között összefüggés áll fenn, minél nagyobb a sugárzó test hőmérséklete, annál rövidebb a sugárzás jellemző hullámhossza. A 6100 K felszíni hőmérsékletű Nap sugárzásának legnagyobb része a mikrométeres hullámhossztartományba esik. A napsugárzás, mint elektromágneses hullám spektrumát megismerve tudatában vannak, hogy a Napból a látható, az ibolyántúli és az infravörös tartományokba eső sugárzás érkezik, és tudják azt is, hogy a sugárzás terjedéséhez időre van szükség. A sugárzás kapcsán már előkerül a hullámtannal kapcsolatba hozható néhány fogalom is (többnyire a visszaverődés, törés és elnyelődés). Tisztában vannak vele, hogy a földfelszínre eső sugárzás elnyelődve növeli a földfelszín termikus (belső) energiáját, majd visszasugárzódva alulról melegíti a levegőt. Tapasztalatból is tudják, hogy a hőmérséklet napi járása csak bizonyos időközönként követi a Nap járását, így napkelte után nem azonnal emelkedik a hőmérséklet. Az általunk vizsgált jelenség során szintén megfigyelhető az időközés a Nap eltakarásának folya-



Finta Zsanett, a Szombathelyi Nagy Lajos Gimnázium matematika és fizika szakos tanára az ELTE TTK-n 2013-ban végzett matematika- és fizikatanárként. 2014 óta ELTE TTK Fizika Doktori Iskola – Fizika Tanítása Program hallgatója, kutatási témája a hullámtan tanítása.



Mitre Zoltán 2010 óta dolgozik a Nyugat-magyarországi Egyetem Természettudományi és Műszaki Karán. 2009 óta a Gothard Amatőrcsillagászati Egyesület titkára. 2007-től 2014-ig a Szlovák Központi Csillagvizsgálóval közös nemzetközi napfogyatkozáselemző kutatóprogramban vett részt. 2010-től az NymE TTK Karsztkutató Csoportjában geomorfológiai, geofizikai folyamatok kutatásával foglalkozik.



1. ábra. A környezet változását figyelő diákok csoportja (fotó: Finta Zsanett).

az állatok viselkedésének változását is. A mérés során a probléma komplexitását szeretnénk hangsúlyozni a diákoknak, és felhívni figyelmüket arra, hogy egy fizikai jelenség mennyi előre nem látható következményt hozhat magával [2].

Első lépésben fogalmazzuk meg, pontosan mit kívánunk vizsgálni a mérés során.

1) Észlelhető-e a hőmérséklet csökkenése a napfogyatkozás ideje alatt?

2) Hogyan változik a szélerősség a jelenség során?

3) Milyen egyéb változások figyelhetők meg a közvetlen környezetben – madárcsicsergés, kutyaugatás, fényérzet, rovarok viselkedése – (1. ábra)?

mata és a hőmérséklet változása között. Jól látszik tehát, hogy van mire építenünk, így nincs más dolgunk, mint az itt említett fogalmakat tehetséggondozó szakköri foglalkozás keretében a fizikai tartalmakat előtérbe helyezve felidézzük, kiegészítjük, és a nap-sugárzásra vonatkozó ismereteket bevonjuk a fizikatanítási menetbe.

A 2006. március 29-i teljes napfogyatkozás adatainak elemzése során feltárt eredményeket kívánjuk igazolni diákokkal végzett mérés segítségével [1]. Tapasztalati tény, hogy napfogyatkozás esetén érezhetően csökken a levegő hőmérséklete. Emellett gyakran megfigyelhetjük a szél megerősödését, valamint

Kiindulásképpen meghatároztuk, milyen talajtípusok esetén vizsgálódunk: füves, erdős, homokos, aszfaltos és barna, növénytelen talaj. A tanulók 5 fős csoportokat alkottak. A diákok meghatározott magasságokban rögzítettek hagyományos hőmérőket, amelyhez létrát, vagy a mérési hely környezetében elhelyezkedő fát használtak fel. A hőmérők a direkt napfénytől védve voltak, a létrákat például több rétegben fehér lepedővel vontuk be, és a mérőeszközöket a Nappal áttellenes oldalra rögzítettük.

A jelenség fizikai tartalma

A napfogyatkozás mindenki által jól ismert árnyékjelenség, ami akkor jön létre, amikor a Hold pontosan a Föld és a Nap közé kerül. Különböző típusait ismerjük: részleges, teljes, gyűrűs vagy hibrid napfogyatkozás. A napfogyatkozás jelenségével történő ismerkedés közben fontos volt felhívni a diákok figyelmét a megfigyelés veszélyeire, a helyes és biztonságos észlelés szabályaira. A 2015. március 20-i fogyatkozás alkalmával a teljesség sávja az Atlanti-óceán északi sarkkörhöz közeli vidékein volt (2. ábra). Magyarországon részleges, körülbelül 60%-os fogyatkozást figyelhattunk meg (3. ábra).

Szombathelyen a jelenség délelőtt 9 óra 36 perckor kezdődött és 11 óra 56 percig tartott, a maximális takarás 10 óra 45 perc körül következett be. A pontos időadatoknak – 9:35:51, 10:44:48 és 10:56:22 – a diákok előre utánanéztek.

A méréshez mindenütt azonos típusú, alkoholos hőmérőt használtunk, a hőmérőkről az egyes hőmérsékletértékek 0,5 °C pontossággal olvashatók le. Mindegyik hőmérőt azonos körülmények között tároltuk a mérés előtt. Mind az öt csapatnak 5 db hőmérőt osztottunk ki és a hőmérőket háromnegyed órával a mérés megkezdése előtt kihelyeztük a szabad levegőre.

2. ábra. A jelenség láthatóságának térképe. A napfogyatkozás kezdetét (7:40,8 UT) ⊕, míg a Földdel való utolsó kontaktust (11:50,2 UT) ⊙ jelöli (forrás: Fred Espenak, NASA).





3. ábra. Hidrogén-alfa fényben készült felvétel a jelenségről. A napkorong szélén protuberanciák is megfigyelhetők (fotó: Mitre Zoltán).

Néhány diák saját hőmérővel is dolgozott, az ő mérési adataikat is rögzítettük a jegyzőkönyvben. Ezzel is hangsúlyoztuk, hogy tudományos jellegű méréseket nem csak laboratóriumi eszközökkel és körülmények között lehet végezni.

A mérés menete és a kapott adatok feldolgozása

Az adatrögzítés a jelenség kezdete előtt bő fél órával (9:00) indult és a vége után nagyjából háromnegyed órával (12:40) fejeződött be. A jelenség előtt és után 5 percenként, a fogyatkozás ideje alatt 2 percenként rögzítettük az adatokat. A fogyatkozás maximuma (10:45) előtt és után – mindkét esetben negyed órán keresztül – a hőmérsékletértékeket percenként rögzítettük.

A jelenségtől független – annak kezdete előtt és vége után mért – hőmérsékletértékek rögzítésére azért volt szükség, mert azokra az idő függvényében jó közelítéssel olyan lineáris függvény illeszthető, amely mentén a hőmérséklet a napfogyatkozás nélkül változott volna. Természetesen e lineáris függvény illesztéséhez a fogyatkozás ideje alatt mért hőmérsékletértékeket nem használtuk fel. Korábbi vizsgálatok bizonyították, hogy a jelenség előtti és utáni napokon, szinte azonos időjárási körülmények között mért hőmérsékletértékek az illesztett lineáris függvény értékeihez teljesen hasonló módon alakultak [1].

A lineáris függvény illesztését követően meghatároztuk a *napsarlóterület-idő függvényét*. Ez a függvény fejezi ki azon terület nagyságát, amelyet a Hold a fogyatkozás során nem takar ki a Nap-korongból. A Holdat egy x -tengellyel párhuzamosan mozgó körlemezrel modelleztük, amely az y -tengely irányában, a fogyatkozásra jellemző értékkel eltolva halad el a koordináta-rendszer origójában elhelyezkedő, szintén körlemezként modellezett Nap előtt. A két égitest látszó szögátmérője kis mértékben tér csak el egymástól, ezért a függvény meghatározása során egyforma méretűnek, geometriailag egybevágó körlemeznek tekinthetjük azokat. Szintén az egyszerűbb számítás miatt a Hold és a Nap egybevágó körlemezének sugarát egységnyi-nek vettük, mivel e függvénnyel a jelen-

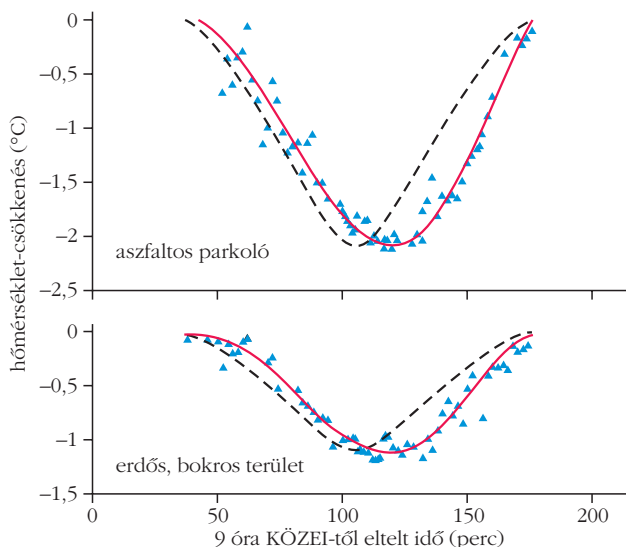
ség során bekövetkező fényváltozás arányait és ütemét kívánjuk modellezni az idő függvényében. A légköri konvekció miatt a hőmérséklet értékének változása késéssel követi a látszó napterület változását. Vizsgálatunk e késés kimutatására is irányult.

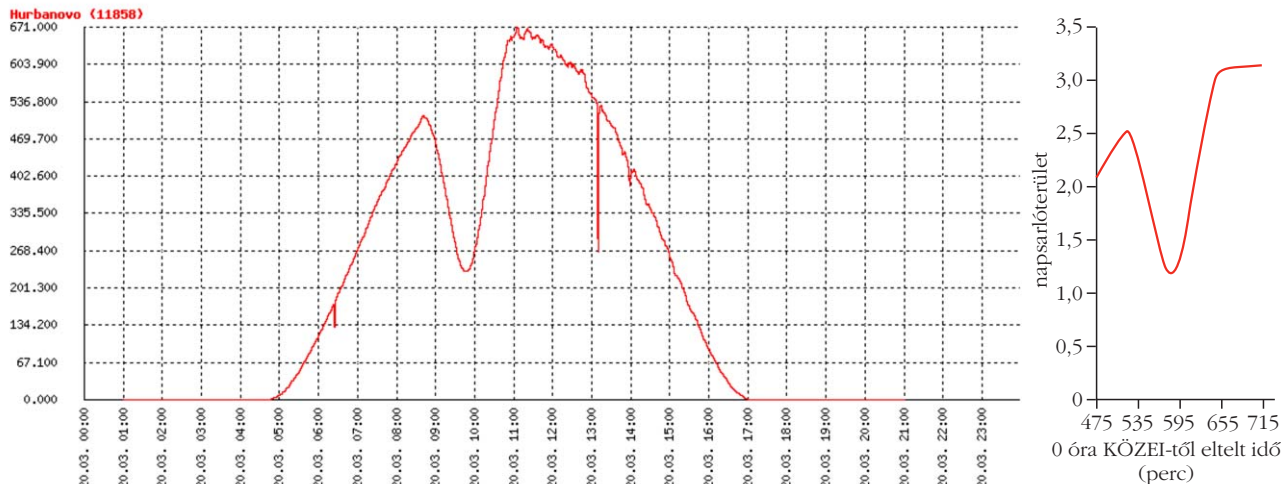
Ezt követően a hőmérséklet-visszaesés értékeit kellett meghatározni a mért hőmérsékletértékek és az illesztett lineáris függvény értékeinek különbségéből minden mérési időpontban. A kapott adatokra számítógéppel polinomot illesztettünk, így megkaptuk a hőmérsékletcsökkenés-idő függvényt, amelynek értékei a hőmérséklet-visszaesésről adnak információt, és ezáltal a napsarlóterület-idő függvénnyel is összehasonlíthatóvá vált. Megjegyezzük, hogy a közös koordináta-rendszerben való ábrázoláshoz és vizsgálathoz (4. ábra) a napsarlóterület-idő függvényt függőleges irányban transzformáltuk [1].

A napsarlóterület-idő függvény meghatározása során – amely a Nap sugárzásának mértékét is hivatott modellezni – több egyszerűsítést is alkalmaztunk, de mert a jelenség közepesen magas napállásnál következett be, a delelés idejét (azaz a legmagasabb Napállást) jóval megelőzően, ezért a légköri fénykioltással (extinkció) korrigáltuk a függvényt. Megnyugtató, hogy az így korrigált Napsarlóterület-idő függvény hasonlóságot mutat a pozsonyi Szlovák Hidrometeorológiai Intézet mérési adataiból kapott ábrával (5. ábra). Megjegyezzük, hogy korábbi vizsgálatok megmutatták, a függvény fénymérővel mért adatokkal is jó hasonlóságot mutat, ezáltal az összehasonlításhoz általunk kívánt pontosságú, azonban a nagyon precíz számításokhoz és a fényváltozás nagy pontosságú leírásához további tényezőket is figyelembe kell venni.

A hőmérséklet visszaesésének alakulását parkban, fák között, illetve az aszfaltos talaj felett is vizsgáltuk, ezen a két helyen volt a legkisebb, illetve a legnagyobb a visszaesés mértéke. A szaggatott vonallal jelölt függ-

4. ábra. A hőmérséklet-változás (háromszögek a mért értékek, folytonos vonal a rájuk illesztett függvény), valamint a napsarlóterület (szaggatott vonal) ábrázolása az idő függvényében két mérési terület adataira.





5. ábra. A Nap globális sugárzása 2015. március 20-án, Ógyallán, és a fényváltozás modellezése a napsarlóterület változásával (forrás: SHMÚ).

vény a napsarló területének alakulását, a folytonos vonallal jelölt pedig a hőmérsékletértékeket mutatja. A különböző talajtípusoknál mutatkozó hőmérséklet-csökkenés és a fáziskésés is várakozásunknak megfelelően alakult. Megfigyelhetjük, hogy a növényzettel sűrűn borított részekben legkisebb a késés (4. ábra).

Következtetések, tapasztalatok

A 2015. március 20-i részleges napfogyatkozás során a szakirodalomban olvasotthoz teljesen hasonló jelenségeket sikerült megfigyelnünk. A hőmérséklet legnagyobb visszaesését ($-2,1\text{ }^{\circ}\text{C}$) az aszfaltos talajon mérő csoport érzékelte, a legkisebb hőmérséklet-visszaesést pedig a parkos környezetben mérő csoport tapasztalta ($-1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$).

A hőmérséklet-változás fáziskéséssel követte a nap-sugárzás mértékének a változását, a korábbi vizsgálatok során leírtaknak megfelelően a jelenség végén vagy az előtt ez a fáziskésés megszűnt. Érdekes eredmény, hogy a totalitás után a hőmérséklet sokkal gyorsabban emelkedett a gyepest és a sima talajos területen, ott még a jelenség befejeződése előtt megszűnt a fáziskésés. A visszaesés maximális értéke a várakozásnak megfelelően az egyes területeknél kü-

lönöző fáziskéséssel következett be. A legkisebb késés (és egyben a legkisebb hőmérséklet-visszaesés) a túlveles növényzetű területen (10 perc) és a parkos területen (11 perc) következett be. Az eredményeket az 1. táblázatban foglaltuk össze.

A környezeti és etológiai változásokat megfigyelve a diákok a hőmérséklet és a fényerősség jól érzékelhető csökkenéséről, a szél megerősödéséről és a madarak viselkedésében beálló változásokról számoltak be.

A március 20-i napfogyatkozás kapcsán a diákok részesei lehettek egy ritka jelenség tudományos vizsgálatának, tapasztalhatták a napsugárzás jól érzékelhető földi hatásait és a jelenség során bekövetkező változásokat. Erős motiváló erővel bírt, hogy az általuk kapott eredmények akár tudományos kutatás céljára is felhasználhatók válhatnak. A tanulók észrevehették, hogy tudományos jellegű mérést nem csak laboratóriumi körülmények között és drága eszközökkel lehet végezni. A mérés egyaránt rendelkezett módszertani és környezetfizikai célokkal, szem előtt tartva, hogy a környezeti megfigyelések eredményei jórészt szubjektív, egyéni tapasztalatokon alapulnak.

A diákok mérései segítségével egyértelműen sikerült kimutatni, hogy a különféle talajborítás és növényzet más-más módon hat a hőmérséklet változására. Ezzel kapcsolatos célirányos, részletes vizsgálat még nem történt a jelenséghez kötődően. A 2006-os törökországi méréskor is csupán annyit állapítottak meg, hogy a hőmérséklet visszaesése az eltérő környezetben (és nagy távolságra) dolgozó mérési csoportoknál különböző volt. A most nyert információ további kutatásokhoz, vizsgálati célkitűzésekhez, valamint a mikroklíma- és városklíma-kutatásokhoz is információkkal szolgáltathat.

Irodalom

- Pintér P., Péntek K., Mitre Z.: Mathematical analysis of temperature results of the total solar eclipse on 29.03.2006. Zborník Referátov Z. 19. Celostátneho Slnecného Seminara, Papradno 2008.
- Makra L., Horváth Sz., Puskás J., Sódar I.: Az 1999. évi teljes napfogyatkozás meteorológiai vonatkozásai Vas megyében. *Vási Szemle LIV/5* (2000) 704–714.

1. táblázat		
A maximális hőmérséklet-visszaesés és időpontkésése a legnagyobb fedés időpontjától		
helyszín jellege	maximális hőmérséklet-visszaesés [$^{\circ}\text{C}$]	hőmérséklet-minimum időkésése (min)
fűves	-1,6	15
aszfaltos parkoló	-2,1	14
tűlevelű fás park	-1,4	10
sima talaj	-1,7	16
erdős, bokros	-1,1	11

Hraskó Péter: RELATIVITÁSELMÉLET

Typotex, 2016, bővített, javított kiadás

Hraskó Péter 2002-ben kiadott *Relativitáselmélet* című könyve tavaly jelent meg javított, bővített formában a Typotex kiadónál. Mindkét kiadás értékehez nagyban hozzájárul, hogy a szerző szívéhez nem csupán maga a tudományterület áll közel, hanem annak *tanítása* is. A könyvön végig érződik a relativitáselmélet oktatásával kapcsolatos pedagógiai kérdések tudatos végiggondolása, a különböző „elmagyarázási módok” gondos számbavétele. Így a könyv (mindkét kiadásban) sokkal több az elmélet száraz ismertetésénél.

Az 1. fejezet a speciális relativitáselmélet kinematikájának szokásos tárgyalását adja (az új kiadásban kicsit bővebben, mint a régiben). A könyv egyik legjobb tulajdonsága már itt megcsillan: az alapos utána-gondolás és több évtizedes oktatói tapasztalat nyomán Hraskó letisztult, világos érvelésekkel halad előre, amelyeket gyakran sommás véleményekkel, ítéletekkel is színesít. Ezeket nem muszáj és nem is szabad kritika nélkül elfogadni (amikor például a Lorentz-kontrakció hagyományos algebrai levezetését Hraskó „teljesen értéktelennek”, „hibás gondolatmenetnek” nyilvánítja, azzal nehéz egyetérteni – a levezetés alapvető helyességét éppen az ugyanabban a pontban szereplő téridődiagram demonstrálja), de érdemes bízni bennük. Nagyon becsülendő a könyvben, hogy megfogalmazásai *aktivizálják* – utánagondolásra, vitakozásra készítik – az olvasót. Az 1. fejezethez még annyit jegyzek meg, hogy ugyanezt a témakört a szerző *A relativitáselmélet alapjai* című vékony kötetében (Typotex, 2009) is alaposan körüljárja, és az – legalábbis számomra – élvezetesebb szellemi kalandot nyújt.

A 2. fejezet a relativisztikus dinamikáról szól, és nagy értéke, hogy a tömeg és az energia kapcsolatát nagyon szabatosan, részletesen, a gyakori buktatókra rámutatva és azokat elkerülve tárgyalja. (A régi kiadás a „mozgási tömeg” és „nyugalmi tömeg” fogalmainak mesterkélttségére is rávilágított. Az újban ezek a mesterkélt kifejezések még negatív példaként sem kerülnek megemlékezésre; marad a „tömeg”.)

A 3. fejezet – *A gravitáció mint geometria* – a fizikai képet, intuíciót erősíti az olvasóban, és előkészíti a terepet a jórészt tisztán matematikai jellegű 4. fejezet – *A Riemann-geometria alapjai* – számára.

Az 5. fejezet – *A pszeudoriemann-téridő és az ekvivalenciaelv* – a görbült téridőbeli mozgást tárgyalja, illetve – még az Einstein-egyenlet nélkül – a Nap körüli metrikát is levezeti, fizikai megfontolások alapján. Az új kiadás itt két alfejezettel is gazdagodott: *Az ikerparadoxon a Föld gravitációs terében* és *A szabadon mozgó tömegpont*.

A 6. fejezet az Einstein-egyenletről szól, azaz arról, hogy a tömegek téridőgörbítő hatása milyen matematikai törvénnyel írható le. A 7. fejezet – *A magányos csillag térideje* – ezek után részletesen foglalkozik az Einstein-egyenlet gömbszimmetrikus, statikus, vákuumbeli megoldásával (álló csillag, illetve álló fekete lyuk körüli téridő), és röviden tárgyalja a *forgó csillag* (és a forgó fekete lyuk) körüli téridő sajátosságait.

A 8. fejezet a gravitációs hullámokról szól, és röviden érinti mind a keltésüket, mind az észlelésüket. (A 2016 februárjában bejelentett nagy horderejű LIGO-észlelés – bizonyára a korábbi nyomdába kerülés miatt – kimaradt a könyvből.) Az új kiadás legfeltűnőbb újdonsága a nagyszerű 9. fejezet, amely tömören, de tartalmilag nagyon gazdagon tárgyalja a kozmológia alapkérdéseit.

A könyvet érdekes, részben a matematikai részleteket tisztázó, részben a történelmi háttérrel felvázoló *Jegyzetek* zárják.

Az ábraanyag nem túl gazdag, az ábrákat csak számok jelzik, feliratuk nincs. A szövegben néha nehéz az ábrákra való utalásokra rábukkanni. Ráadásul, miközben a kevés ábra között is találunk feleslegeseket (az egyik például vízszintes asztallapon fekvő két tömeget mutat, amelyek közül az egyik rugóval a falhoz van rögzítve; ez a szöveg alapján is könnyen vizualizálható lenne), másutt (például a Riemann-geometriát tisztán algebrailag bemutató fejezetben) elkelt volna néhány, az intuíciót segítő, szemléltető kép.

A könyvhöz tartozó *Hibajegyzék* Hraskó Péter honlapjáról (<http://peter.hrasko.com>) pdf-formátumban letölthető.

Végül tanulságos a *Relativitáselmélet* című könyvet összevetni Hraskó műegyetemi kurzusához írt körülbelül 100-oldalas, *Általános relativitáselmélet és kozmológia* című jegyzetével, amely a szerző honlapjáról pdf-ként letölthető. A több mint 400 oldalas könyv tartalmilag természetesen gazdagabb, több



olyan lényeges témakört (például forgó fekete lyukak, gravitációs hullámok) és talán kevésbé lényeges fogalmat (spinorok) is tárgyal, amelyek nem kerültek be a pdf-jegyzetbe. Ugyanakkor a műegyetemi jegyzet igazi remekmű: koherens, tömör, könnyen érthető és rendkívül gazdag. Jóval kisebb terjedelme mellett is részletesen tárgyal olyan fontos fogalmakat

(nemmetrikus sokaság, Lie-derivált), amelyek a *Relativitáselmélet* könyvből kimaradtak. A könyvet és a pdf-jegyzetet ezért együtt ajánlom az általános relativitáselmélet alapjaiban elmélyülni vágyó, az élvezetes szellemi kalandokat kedvelő középiskolai fizikatanároknak, egyetemi hallgatóknak és oktatóknak.

Bokor Nándor

Arthur Koestler: ALVAJÁRÓK

(The Sleepwalkers. A History of Man's Changing Vision of the Universe 1959)

Fordította: Makovecz Benjamin, 1996.

Mivel a lap hasábjain többen emlegették a könyvet, ezért úgy gondoltam, hogy annak tartalmáról, szemléletéről talán érdemes néhány gondolatot leírni az olvasók számára, hátha többen kedvet kapnak arra, hogy elolvassák. Több magyar kiadást (1996, 2007) is megért a könyv az Európa Kiadó jóvoltából. A szerző az emberiségnek a minket körülvevő világmindenségről alkotott elképzeléseit követi nyomon a babiloniaktól *Newtonig*, vagyis az e tárgykörre vonatkozó ismeretek keletkezését teszi vizsgálata tárgyává, nem egy helyen regényesen izgalmas formában. A szerző az alkotás pillanatainak szemtanújává avatja az olvasót. Az *Alvajárók* cím talán éppen azt az elvárásolt állapotot kívánja idézni, amikor a hősök mintegy alvajárókként tapintanak rá az éppen szükséges dolgokra, tényekre.

Egy adott korban a tudósok látásmódját erősen befolyásolja azon korszak ideológiája, amelytől csak nagyon nehezen tudnak megszabadulni. Erre példa a könyvben az egyenletes körmozgás, amelyet *Platón* vezetett be, *Arisztotelész* emelt „dogmává”, majd hosszú évek múlva *Ptolemaiosz* egyenletes körmozgásokból próbálja összerakni a bolygók pályáját, a deferensek mellett számtalan segédkört, ep ciklust felhasználva. Évszázadok múlva *Kopernikusz* is addig helyezi a köröket, amíg végül a bolygók mozgását ő is le tudja írni egyenletes körmozgások eredőjeként.

A történet az *ókorban* kezdődik. A könyv *első* részében a szerző a *Hőskor* című fejezetben az ókori természettudomány kibontakozását tekinti át, amely két fontos tekintetben készíti elő számára az utat. Az egyik az ismeretelmélet alapvonalait illeti, arról van szó, hogyan működik a tudomány és miben rejlik értéke. A másik a csillagvilágban a körkoncepció megjelenése és útja az egyszerű konstruktív ötlettől a téveszme asztronómiai dogmává dermedéséig. A fejezet érdekessége, hogy megmutatja, miként haltak el a pompás meglátások is, a mai eszmék előfutárai, mint szamoszi *Arisztarkhosz* Napközéppontú modellje, *Hérakleidész* félig Napközéppontú modellje, amely mintegy a Föld- és Napközéppontú modellek közötti átmenetnek tekinthető.

A *második* fejezet végén *Koestler* megfogalmazta azt az öt kardinális kérdést, amely a továbbhaladás gátjává vált. Ezek a következők:

1. A világ két minőségre – ha tetszik, égire és földre – volt felosztva, s ami rosszabb, ez nemcsak „geometria” felhasadás, hanem egyben tudathasadás is volt.
2. A világtkép a geocentrizmus dogmájára épült.
3. A mozgás leírása az egyenletes sebességű körmozgások dogmájára épült.
4. A tudomány elszakadt a matematikától.
5. Annak felismerésére való képtelenség, hogy a mozgás, nem pedig a nyugalom a testek természetes állapota.

A *harmadik* rész főszereplője, Kopernikusz, a „félszeg kanonok”, aki nem merte nyilvánosságra hozni elméletét, de nem az egyház ellenkezése miatt, amely valójában nem is létezett, hanem tudóstársai kigúnyolásától félve. *Koestler* a következőt írja erről:

„...bizonyítékok vannak arra, hogy a Vatikán már a legkorábbi időktől fogva jóindulatú érdeklődést mutatott a kopernikuszi elmélet iránt.”

Majd később:

„Minden bizonyíték azt látszik igazolni, hogy nem a mártíromságtól rettegett, hanem a neveltségességtől – mert kétségek mardosták elméletét illetően, és jól tudta, hogy sem bizonyítani nem tudja annak igazságát, sem pedig megvédelmezni a szakértő kritikával szemben.”

Ebbe a hibába majd *Galilei* esik bele évtizedek múlva, az ő témával kapcsolatos tevékenységének könyvbeli sajátos interpretációja sok olvasó számára megdöbbentő élményt jelentett.

Kopernikusz kanonok *De Revolutionibus Orbium Coelestium* (1543) könyve a maga módján rekorder. Úgy csinált forradalmat, hogy ez a mű „minden idők egyik legkevésbé ismert és olvasott könyve”. „A példátlan kudarc oka, hogy e könyv gyakorlatilag olvashatatlan. Mulatságos észrevenni, hogy még a leglelkiismeretesebb tudósok Kopernikuszról szóló írásaiból is kitűnik: soha nem olvasták”. Ezen állításnak egyszerű a bizonyítása: soha senki nem vette a fáradságot, hogy megszámolja, végül is Kopernikusz hány ep cik-

lust alkalmazott. Koestler szerint negyvennyolcat, míg korábban harmincnégyet használtak, amelyet terjedelmes lábjegyzeteinek egyikében be is mutat.

„Kopernikusz távolból nézve az emberi gondolkodás rettenthetetlen forradalmárának látszik, amint azonban közelítünk felé, fokozatosan áporodott, sötét figurává alakul át, az eredeti génusz holdkóros árnyalakjává, aki a jó gondolatra hibás szerkezetet épített fel, ásványi türelemmel halmozva egymásra epiciklusokat és defferenseket, s létrehozta a legszörnyesebb és legolvashatatlanabb könyvet, amely valaha is történelmet csinált.”

A szerző szerint Kopernikusz, a derék lengyel kanonok egy magának való, mogorva, félős öregember volt, aki saját maga sem nagyon hitt abban, amit állított. Valószínűleg egyáltalán nem gondolta, hogy halála után ötven évvel éppen az ő rendszerére kezdtek el hivatkozni az utódok.

Aki hosszú évekig tartó megfeszített szellemi erőfeszítések árán, a Mars pályájának vizsgálatakor megszabadult a köröktől, a *negyedik* rész főhőse: *Kepler*. Kepler életútja is példázza azt, hogy a könyv hősei, az „alvajárók” iszonyú erővel küzdöttek a céljuk felé, miközben nem is egészen voltak tisztában azzal, hogy mit és hogyan csináltak.

Először ő is mindenáron körre akarta illeszteni a megfigyelésekből nyert adatokat, amelyeket nem a Földhöz rögzített vonatkoztatási rendszerben, hanem a Napra, mint középpontra számolt át. Számításai-
ban a szerző szerint nagyon sok számolási hiba található, amelyek nem egy esetben „kikompenzálódnak”, és így jutott el végül a helyes eredményekhez.

De honnan is származtak a Kepler által felhasznált adatok? A szerző élvezetesen írta le a híres dán csillagász, *Tycho Brahe* és Kepler találkozását, és rövid, együtt töltött idejük néhány fontos mozzanatát. Tycho csillagászati jelentőségét az adja, hogy soha előtte nem keletkeztek ilyen pontos adatok. A másik, s talán még ennél is fontosabb pedig e megfigyelések folyamatosága és rendszeressége volt. Ezeket az adatokat „szerezte” meg Kepler Brahe hirtelen halála után.

A könyv hosszan taglalja, hogy Kepler – a mai tudomány szemszögéből nézve – mennyi, vargabetűvel tűzdelt gondolatmenet bejárása után jutott el végül törvényeinek megfogalmazásához. Ezek közül kiemelkedik egyik ifjúkori alkotása, a *Mysterium Cosmographicum*, amelyet öregkorában sem tagadott meg. Alapgondolata az, hogy Isten a teremtéskor, a bolygók pályájának kijelölésekor az öt szabályos platoniai testet tartotta szem előtt. Az egymásba helyezett szabályos testek határozzák meg a bolygók egymás után következő pályáit. (Abban az időben a Szaturnuszon túli bolygókat még nem ismerték.)

Kepler a legszimpatikusabb főszereplő a könyvben, aki megszállottan kereste a válaszokat a saját maga által feltett kérdéseire, és úgy jutott korszakos felfedezésekhez, hogy maga se nagyon tudta azok jelentőségét. A Platón által kitalált és Arisztotelész által kőbe vésett gondolat, a bolygók egyenletes körmozgásáról szóló dogma, közel kétezer évig tartotta magát, és senkinek sem jutott eszébe megkérdőjelezni azt. Helyette tudósok százai kínlódtak, hogy a Világegyetem működését tökéletes körmozgásokkal írják le, amely hibába Kopernikusz is beleesett. Míg nem Kepler neki nem állt a Mars „valódi, a Nap körül” pályájának meghatározásához.

A szerző Galileit kifejezetten antipatikus figuraként állítja elének az *ötödik* fejezetben. Az egyházzal való szerencsétlen konfliktust Koestler szerint ő maga provokálta ki, ugyanis a korabeli egyház egyáltalán nem az a vaskalapos, a csillagászathoz mit sem értő emberek gyülekezete volt, ahogy azt később beállítani igyekeztek. Ha Galilei nem „izgágáskodott” volna, a Vatikán valószínűleg szép lassan elfogadta volna az új, heliocentrikus univerzumképet is.

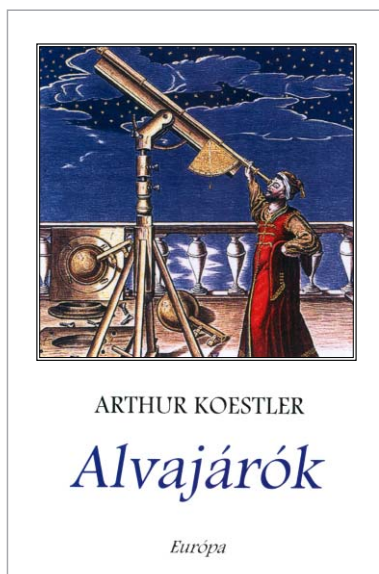
Ki volt Galilei? Koestler lassan szállóigévé vált meghatározása szerint: „Szemben még a legmodernebb tudománytörténet állításaival is: Galilei NEM fedezte fel sem a hőmérőt, sem pedig az ingaórát. NEM fedezte fel a tehetetlenség törvényét, sem az erők eredőjének kiszámítását, sem a napfoltokat. Egy szikrányival sem járult hozzá az elméleti csillagászat fejlődéséhez. NEM ejtett súlyokat a mélybe a pisai ferde torony tetejéről, és NEM igazolta a kopernikuszi rendszer helytállóságát. NEM volt része az inkvizíció kínzásaiban. NEM

sínylődött börtönben. NEM mondta azt, hogy és mégis mozog a Föld, és egyáltalán NEM volt a tudomány mártíra.”

Hát akkor?

„Amit valóban tett: létrehozta a dinamika modern tudományát, ami a történelmet – vagy az emberiség végétét – alakító szellemek közé emeli őt.”

Galileit az irodalomtörténet az olasz didaktikus próza mestereként tartja számon, áttetsző tisztaságú érvelőképessége miatt. Belőle már teljesen hiányzott a középkori miszticizmus, ő már akkor se habozott kiállni vélt igazáért, ha a megfelelő érvei még nem voltak meg, csupán a meggyőződése vezette. Koestler szerint nem Galilei kopernikánus nézetei, hanem inkább ez az arrogancia volt az inkvizíciós eljárás mozgatórugója. Valójában még mindig nehéz eldönteni, hogy melyik oldalon van az igazság. Tény, hogy a protestánsokat zavarta először a kopernikanizmus. A modern csillagászat útját eleinte még a katolikus egyház hívó papjai – mint csillagászok – is egyengették, akik közt számos jezsuita is volt. Valószínű, hogy a



Galilei-perben szerepet játszottak olyan szempontok is, hogy a kopernikánus rendszer átütő bizonyítékai (például a parallaxis kimutatása) még évszázadokig várattak magukra, miközben az ellenreformáció ideológiájának hívei egyre merevebb álláspontot foglaltak el. Ebbe persze belejátszottak hatalmi kérdések is, amelyek olykor látványos megnyilvánulásokkal mutatták az erő, a hatalom igazát (*Giordano Bruno* máglyahalála, 1600).

Galilei gondolkodásának tanulmányozása is sok érdekességet rejt magában. Galilei, aki megoldotta a szabadesés, az egyenletesen gyorsuló mozgások leírásának problémáját, kiváló kísérletező volt, egyszerűen nem tudta elfogadni a bolygópályák ellipszoid alakját. Híres könyvében, a *Dialogóban*, amely a Galilei-per alapját képezte, az egyszerűsített kopernikuszi világképet tárta az olvasó elé. Ebben a bolygók körpályán keringenek a kör középpontjában lévő Nap körül. Tehát a köröktől ő sem tudott megszabadulni. Kérdés, hogy a Kopernikusz által bevezetett sok epikiklusról mi lehetett a véleménye, mivel ezeket meg sem említi könyvében. Ellenben úgy kezeli a kopernikuszi elképzelést, mintha az lenne a végső igazság, és nem csak, mint egy lehetséges hipotézist, számítási segédeszközt. Ez az, ami nem volt elfogadható az egyházatyák, illetve az arisztoteliánusok számára. Ráadásul nem tudott kellő empirikus bizonyítékot felmutatni a kopernikuszi elmélet mellett, hiszen a csillagok parallaxisát akkor még nem lehetett kimutatni. A Vénusz fázisváltozásai – amelyet mint ténylegesen megfigyelhető ténynt hangoztatott – másfépp is magyarázhatók voltak. Ez csak arra bizonyított, hogy a Vénusz a Nap körül kering, de arra már nem, hogy a Föld is ezt teszi.

Maga a szerző következőképp jellemezte könyvét:

„A tudomány haladását általában egyenes vonalú, józanul töretlen fejlődési folyamatnak tekintjük, holott nagyon is szabálytalan, olykor a politikai gondolkodás evolúciójánál is cikcakkosabb csapást követ. Különösen a kozmológiai elméletek fejlődése nevezhető

– túlzás nélkül – a kollektív megszállottság és ki egyensúlyozott skizofréria történetének, s az útvonalát meghatározó egyes felfedezések és felismerések inkább tűnnek egy holdkóros, mint egy elektronikus agy produktumainak.

Amikor Kopernikust vagy Galileit lesegítettem a talapzatról, ahová a tudományos mitográfia állította őket, nem az volt a célom, hogy lealacsonyítsam őket, csupán hogy teremtesek gondolkodásukba belepillantásokat. Nem bánom azonban azt sem, ha a kaland melléktermékeként szembekerülök a legendával, amely szerint a Tudomány józan és szikár, a Tudósok pedig higgadtabbak és szenvedélyektől mentesebbek másoknál (aminek folytán a világ dolgainak irányításában vezető szerepet kellene játszaniuk), és képesek maguknak és kortársaiknak megfelelően racionális megoldásokat nyújtani a más eredetű etikai ítéletek helyett.

Szándékom volt, hogy e bonyolult tárgykört az átlagolvasó számára hozzáférhetővé tegyem, de remélem, hogy az egyetemi ifjúság is haszonnal forgatja majd könyvem.

Galilei *Dialogo* című könyve, melyet már a per után a házi őrizetében írt, volt az egyik nagyon fontos azon művek közül, amelyekből Newton és kortársai tovább építkezhetek, ténylegesen megértve a mozgás törvényszerűségeit, miszerint nem a test állandó sebességű mozgásának fenntartásához, hanem a sebesség megváltoztatásához, a vizsgált test gyorsításához szükséges erőhatás. És ez Galileo Galilei igazi érdeme!

Newton csak a könyv ötödik fejezetének utolsó oldalain kap helyet. A rövid fejezet célja inkább a könyv mondanivalójának, mintegy történeti ívének összefoglalása, és röviden vázolni a newtoni szintézist.

Bízom benne, hogy sikerült felkeltenem az érdeklődést a könyv iránt!

Radnóti Katalin

HÍREK – ESEMÉNYEK

A TÁRSULATI ÉLET HÍREI

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat 2017. évi Küldöttközgyűlése

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat 2017. május 13-án, szombaton 10:00 órai kezdettel tartja tisztújító Küldöttközgyűlését az ELTE Fizikai épületének (Budapest, XI. Pázmány Péter sétány 1/A) 083. előadótértermében (Eötvös-terem).

A Küldöttközgyűlés nyilvános, azon bárki részt vehet. A vitákban a Társulat tagjai részt vehetnek, fel-

szólhatnak, de a szavazásban csak a területi és szakcsoportok által megválasztott, küldöttigazolvánnyal rendelkező küldöttek vehetnek részt. A küldöttek igazolványukat a regisztrációnál mutassák be!

Ha a Küldöttközgyűlés a meghirdetett időpontban nem lenne határozatképes, akkor 10:30-ra ismét összehívjuk, és a Küldöttközgyűlés a napirend előtti

szakmai előadás után kezdi meg munkáját. Az ily módon ismételtén összehívott Küldöttközgyűlés határozatképes, tekintet nélkül a megjelent küldöttek létszámára.

A Küldöttközgyűlés – hagyományosan – napirend előtti szakmai előadással kezdődik 10:00 órakor. Idén Szabó Róbert (MTA CSFK Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézete) *Nap-típusú oszcillációk: pillantás a Nap és a csillagok belsejébe* címmel tart előadást.

Az ELFT Elnöksége a következő napirendi pontokat javasolja a Küldöttközgyűlésnek:

1. A Társulat elnökének megnyitója és az Elnökség által odaítélt Eötvös Emlékplakettek átadása
2. A további napirend elfogadása
3. A Szavazatszámoló Bizottság és a jegyzőkönyv-hitelesítők felkérése
4. Főtitkári beszámoló

4.1 A Társulat 2016. évi közhasznúsági jelentése

4.2 A Társulat 2017. évi költségvetése

5. A Felügyelő Bizottság jelentése

6. Az Elnökség javaslata Társulati kitüntetésekre

7. Pontonkénti vita a 4–6. és nyílt szavazás a 4–5. napirendi pontokról

8. Az Elnökség visszaadja megbízatását a Küldöttközgyűlésnek

9. A Jelölőbizottság előterjesztése az új tisztségviselők megválasztására

10. Vita a jelölésekről, helyszíni jelölés, nyílt szavazás a szavazólapra kerülő jelöltekről

11. Szünet és titkos szavazás az új tisztségviselőkről és a Küldöttközgyűlés által odaítélhető Társulati díjakról

12. Társulati kitüntetések és tudományos díjak átadása

13. A tisztújítás eredményének kihirdetése

14. A Társulat elnökének zárszava

KITÜNTETÉSEK MÁRCIUS 15. ALKALMÁBÓL

Széchenyi-díjban részesült

Frei Zsolt asztrofizikus, a Magyar Tudományos Akadémia doktora, az Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kar Fizikai Intézete Atomfizikai Tanszékének tanszékvezető egyetemi tanára, az MTA–ELTE Lendület Asztrofizikai Kutatócsoportjának vezetője a gravitációs hullámokat elsőként észlelő és ezzel a csillagászat és az asztrofizika számára forradalmi felfedezést tevő nemzetközi LIGO-programban részt vevő egyetlen magyar kutatócsoport megalakítása és irányítása során végzett nagy hatású munkája, valamint a hazai asztrofizikai oktatás fejlődését szolgáló értékes tevékenysége elismeréseként.

A Magyar Érdemrend tisztikeresztje polgári tagozata kitüntetést kapott

Benedict Mibály fizikus, a Magyar Tudományos Akadémia doktora, a Szegedi Tudományegyetem Természettudományi és Informatikai Kar Elméleti Fizikai Tanszékének egyetemi tanára, volt tanszékvezetője;

Dombi József nyugalmazott kísérleti fizikus, kandidátus, a Szegedi Tudományegyetem Természettudományi és Informatikai Kar, Optikai és Kvantumelektromikai Tanszékének címzetes egyetemi tanára;

Sulik Béla János fizikus, a Magyar Tudományos Akadémia doktora, a Magyar Tudományos Akadémia Atommagkutató Intézet, Atomí Ütközések Laboratóriumának tudományos tanácsadója;

Tasnádi Péter, az Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kar Földrajz- és Földtudományi Intézet Meteorológiai Tanszékének nyugalmazott egyetemi tanára;



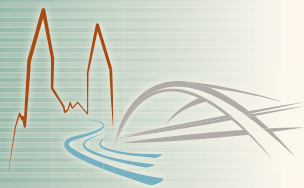
Két friss Széchenyi-díjas az Eötvös Egyetemről: Szathmáry Eörs biológus (balra) és Frei Zsolt fizikus (jobbra).

Magyar Érdemrend lovagkeresztje polgári tagozata kitüntetést kapott

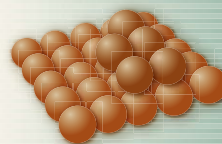
Battistig Gábor villamosmérnök, a Magyar Tudományos Akadémia Energiatudományi Kutatóközpontja Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézete tudományos főmunkatársa, az Intézet Mikrotechnológiai Osztálya vezetője;

Jubász András, az Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kar, Fizikai Intézet Anyagfizikai Tanszékének nyugalmazott egyetemi docense.

A *Fizikai Szemle* és az Eötvös Loránd Fizikai Társulat gratulál a kitüntetetteknek.

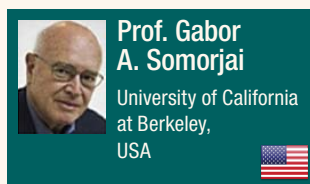


ecoss 33
27 AUG. – 1 SEPT. 2017
SZEGED, HUNGARY



33rd EUROPEAN CONFERENCE ON SURFACE SCIENCE

PLENARY LECTURES



WELCOME OF THE CHAIR

It is our pleasure to announce the **33rd European Conference on Surface Science (ECOSS-33)** organized in Hungary, Szeged. ECOSS is a traditional annual meeting directed jointly by the Surface Science Division of the International Union for Vacuum Science, Technique and Applications (IUVSTA) and the Surface and Interface Section of the European Physical Society (EPS). The conference provides an excellent opportunity for scientists from Europe and from all over the world to meet and discuss the latest advances in surface physics/chemistry and the progress of the surface science approach of the related innovation fields of heterogeneous catalysis, nanoelectronics, bio-nanoscience and light-matter nanotechnology. Szeged, crossed by the Tisza River is a university town of a long cultural tradition in the centre of the Carpathian Basin. The beautiful downtown of Szeged and the pleasant weather in August provide an excellent background for this conference.

András Berkó
Chair of ECOSS-33

Frigyes Solymosi
Honorary Chair

www.ecoss2017.org



Sponsor & Organizing Institutions

UNIVERSITY OF SZEGED
ELI-HU NON-PROFIT LTD
HUNGARIAN ACADEMY OF SCIENCES
ROLAND EÖTVÖS PHYSICAL SOCIETY
HUNGARIAN CHEMICAL SOCIETY
HUNGARIAN VACUUM SOCIETY
NATIONAL RESEARCH, DEVELOPMENT
AND INNOVATION OFFICE
SZEGED CITY COUNCIL

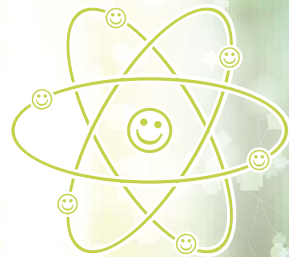
**CONFERENCE
SECRETARY:**

Régió-10 Ltd. • Dugonics sq. 12, H-6720 Szeged, Hungary
Phone/fax: +36 62 710 500 • E-mail: ecoss33secretariat@regio10.hu • www.regio10.hu



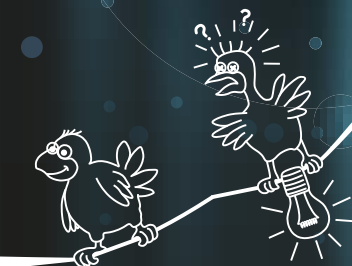


Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat szervezésében

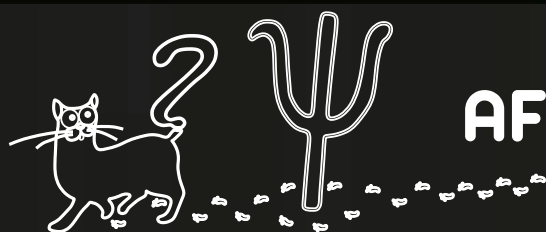


2017.
ÁPRILIS
21-22.

A FIZIKA MINDENKIÉ 3.0



A fizika 2017-ben is mindenkié! A tiéd, miénk és mindenkié — tanároddal, barátaiddal, szüleiddel fizikázz, végezz kísérletet vagy készíts új eszközt, hallgass vagy szervezz előadást —, szóljon minden a fizikáról! Vegyél részt, regisztráld a saját programod és ünnepeljük együtt a fizika kérdéseit és csodás eredményeit! Hiszen a fizika segítségével adunk választ számos, a társadalmat érintő problémára — például energia, közlekedés, kommunikáció, környezetvédelem —, amelyek mindannyiunk életét befolyásolják. Mert A FIZIKA MINDENKIÉ!



Információért látogass el weboldalunkra:

AFIZIKAMINDENKIE.KFKI.HU

Támogatók:

