

fizikai szemle



2019/11

EÖTVÖS LORÁND MŰSZEREI AZ EMLÉKGYŰJTEMÉNYBEN – 6.

Hármas görbületi variométer

1909-ben, a mérési idő további csökkentése érdekében fejlesztették ki a hármass görbületi variométert. A műszerbe három, egymáshoz képest 120° -kal elforgatott lengőszerkezet volt beépítve, ami valóban gyorsította a terepi munkát, azonban lelógó súlyok hiányában csak a nehézségi erő irányváltozására, azaz a szintfelület görbületének gömbtől való eltérése meghatározására volt alkalmas. Tekintettel arra, hogy a gyakorlati mérésekben egyre inkább a gradiens meghatározása vált uralkodóvá, a műszert csak speciális esetekben, főleg geodéziai célból végzett méréseknél alkalmazták. Továbbfejlesztésére, a korlátozott használhatóság miatt, nem került sor.



A sorozatot *Kármán Tamás* állította össze, fényképeit a Magyar Bányászati és Földtani Szolgálat elnöke, *Fancsik Tamás* engedélyével készítette, adta közre.



Eötvös Loránd Emlékgyűjtemény
Magyar Bányászati és Földtani Szolgálat
1145 Budapest, Columbus utca 17–23.
telefon: 06-1-2524999
e-mail: muzeum@mbfsz.hu
web: <https://mbfsz.gov.hu/kiallitasok/eotvos-lorand-emlekgujtemeny>



PÁL LÉNÁRD (1925–2019)

Megrendüléssel vettük a hírt, hogy 2019. október 21-én, életének 94. évében elhunyt *Pál Lénárd* fizikus, Kossuth-díjas akadémikus. Széles körű kutatói munkásságát elsősorban szilárdtestek ferromágneses tulajdonságainak tanulmányozásában, valamint a neutronláncok statisztikus elméletének kidolgozásában fejtette ki, amelynek szigorú matematikai megalapozása az ő nevéhez fűződik (Pál–Bell-egyenlet). Ezenkívül komplex rendszerek biztonságának statisztikai kérdéseivel, és a valószínűségelmélet biológiai és kémiai alkalmazásaival is foglalkozott.

Pályája alatt fontos tudományos szervező és -irányító szerepet töltött be: a 70-es években a Központi Fizikai Kutató Intézet igazgatója, majd főigazgatója; a 80-as években a Magyar Tudományos Akadémia főtitkára, majd az Országos Műszaki Fejlesztési Bizottság és az Országos Atomenergia Bizottság elnöke volt. Alapvető szerepet játszott a KFKI kutatóreaktorának létesítésében, valamint a ZR6 kritikus rendszeren végzett nemzetközi kutatási program megszervezésében. 1978 és 1992 között a *Magyar Fizikai Folyóirat* főszerkesztője, majd 2002-ig folyóiratunk társfőszerkesztője volt. Az Eötvös Loránd Tudományegyetem professzoraként tartott korszerű, szemléletformáló és gondolatébresztő előadásait számos fizikus évfolyam hallgatói élvezhették.

2016-ban nyerte el a Magyar Nukleáris Társaság Szilárd Leó díját. Utolsó napjaiig aktívan dolgozott: legfrissebb munkáját idén szeptember elején fejezte be. Halálával a magyar tudományos élet egy nemzetközileg ismert kiemelkedő kutatója és nagy egyénisége távozott. Munkásságát és emlékét megőrizzük.

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat havonta megjelenő folyóirata.

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

Főszerkesztő:

Lendvai János

Szerkesztőbizottság:

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

Műszaki szerkesztő:

Kármán Tamás

A folyóirat e-mailcíme:

szerkesztok@fizikaiszemle.hu

A lapba szánt írásokat erre a címre kérjük.

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

A folyóirat honlapja:

http://www.fizikaiszemle.hu



A címlapon:

A Szépművészeti Múzeum 2018. októberi újrainításának legfőbb látványossága a – talán – Leonardo-szobor és szoborvázlat-gyűjtemény volt (fotó: Mudra László).

A hátsó borítón:

A szobor vizsgálatokor készült felvételek (lásd Rosta László és munkatársai írását).

Pál Lénárd (1925–2019)	365
<i>Keszei Ernő: Egy magyar tudós két háború között – Báró Eötvös Loránd élete és munkássága</i>	367
<i>Eötvös korának és munkásságának bemutatása, ezúttal egy kicsit a kémia nézőpontjából is.</i>	
<i>Patkós András: A Mindenség története 99,99999%-ának lenyűgöző rekonstrukciója</i>	375
<i>A 2019. évi Fizikai Nobel-díj egyik felének háttere.</i>	
<i>Haris-Kiss András: Fizikai Nobel-díj az első exobolygó felfedezéséért</i>	378
<i>A 2019. évi Fizikai Nobel-díj másik felének háttere.</i>	
<i>Rosta László, Bajnok Katalin, Baranyai Rózsa, Belgya Tamás, Botlyán László, Fábíán Margit, Füzi János, Kis Zoltán, Len Adél, Szentmihályi László: Innováció és a 60 éves Budapesti Kutatóreaktor</i>	381
<i>Az idén 60 éves csillebérci kutatóreaktor környezetében folyó szerteágazó tevékenység bemutatása néhány példán keresztül.</i>	
<i>Kálmán Péter, Keszthelyi Tamás: Tiltott magreakciók („hidegfúzió”)</i>	388
<i>Mennyire megalapozott a fizikusok jelentős részének a hidegfúzió létezését elutasító felfogása?</i>	
VÉLEMÉNYEK	
<i>Abraham Loeb: A tudományban nem a lájkok számítanak</i>	391
<i>Szenvedélyes vélemény a kísérleti megalapozást nélkülöző, fizikát veszélyeztető elméleti spekulációkról.</i>	
A FIZIKA TANÍTÁSA	
<i>Fraller Csaba: Pouillet nyomában – a barometrikus magasságformula, valamint a napneutrínó-fluxus mérése</i>	393
<i>A cikk a 2018–2019. évi ELFT-NI myDAQ pályázaton I. díjjal jutalmazott, a myDAQ-LabVIEW rendszerre alkalmazott mérési ötletek bemutatása.</i>	
<i>Hudoba György: A Hold távolságának és méretének közelítő meghatározása holdfogyatkozáskor készült felvételek segítségével</i>	400
<i>A cikk aktualitását az ideai holdfogyatkozások adják.</i>	

Lénárd Pál (1925–2019)

E. Keszei: A Hungarian scientist between two wars – The life and work of Baron Roland Eötvös

A. Patkós: Enthralling reconstruction of 99.99999% of the history of Universe

A. Haris-Kiss: Nobel prize in physics for the discovery of the first exoplanet

L. Rosta, K. Bajnok, R. Baranyai, T. Belgya, L. Botlyán, M. Fábíán, J. Füzi,

Z. Kis, A. Len, L. Szentmihályi: Innovation and the 60-year-old Budapest

Research Reactor

P. Kálmán, T. Keszthelyi: Forbidden nuclear reactions („cold fusion”)

OPINIONS

A. Loeb: Science is not about getting more likes

TEACHING PHYSICS

Cs. Fraller: Pouillet's footsteps – measurement of the barometric height formula and of the flux of solar neutrons

G. Hudoba: Approximate determination of the distance and dimension of the Moon by using photographs of lunar eclipse

EGY MAGYAR TUDÓS KÉT HÁBORÚ KÖZÖTT

– Báró Eötvös Loránd élete és munkássága

Keszei Ernő

ELTE TTK Kémiai Intézet

Ez év április 8-án éppen 100 éve annak, hogy *Eötvös Loránd* eltávozott az élők sorából. E cikkben ezen évforduló jegyében egyrészt születésének és halálának körülményeiről lesz szó, másrészt a születésekor, valamint halála előtt történt két nagy háború közötti időszak néhány sajátosságáról. Az első, az 1848–49-es magyar honvédő háború csak ideiglenesen, rövid időre érte el Magyarország függetlenségét, de az ország területe megmaradt. A második, az 1914-ben kitört világháború után Magyarország valóban független állam lett, de területének több mint kétharmadát és lakosságának jelentős részét is elveszítette. Amennyire szerencsétlen események történtek az országban Eötvös Loránd születésekor és halála körül, annyira szerencsés időszak volt felnőtté és kutatóvá válásának ideje, amit szokás „boldog békeidőnek” is nevezni – bár ekkor sem volt teljesen felhőtlen a magyar tudományos közélet. Természetesen lehetetlen emlékezni az egyik legnagyobb magyar tudósra anélkül, hogy tudományos teljesítményéről szó ne esne. A cikkben részletesebben – elsősorban a kémiai szempontból különösen érdekes – felületi feszültséggel kapcsolatos vizsgálatairól és az azokból levont Eötvös-szabályról lesz szó, de röviden áttekintjük a gravitációval kapcsolatos eredményeit is, amelyek leginkább felelősek Eötvös tudományos ismertségéért.

A születés és a halál körülményei

Eötvös Loránd 1848. július 27-én született Budán. Születésekor már sok problémával küzdött a március 23-án megalakult „első független magyar felelős minisztérium”, amelyben *Eötvös József*, Loránd apja vallás- és közoktatásügyi miniszter volt (1. ábra). A születés körülményeiről abból a levélből értesülhetünk, amelyet apja Lorándnak, az akkor Heidelbergben tanuló ifjúnak 20. születésnapjára írt:

A *Magyar Kémikusok Lapja* 2019. májusi számának 156–161. oldalain megjelent cikk folyóiratunk számára átírt változata. A *Magyar Kémikusok Lapja* engedélyével közöljük.



Keszei Ernő az ELTE-n szerezte vegyészdiplomáját (1975) és doktori fokozatát (1978); jelenleg emeritus professzor. 1985–91 között négy évet volt vendégkutató a kanadai Sherbrook-i Egyetemen, ahol ultragyors lézerkinetikai (femtokémiai) kutatásokba kapcsolódott be. Jelenleg femtokémiai kísérletek és fehérjekémiai NMR-mérések kinetikai elemzésével foglalkozik. 1993–2007 között a Fizikai Kémiai Tanszék vezetője, 2010–2013 között pedig az ELTE tudományos, kutatási és innovációs rektorhelyettese volt.



1. ábra. Tyroler József színezett metszete az 1848. március 23-án megalakult Batthyány-kormányról. Eötvös József az alul lévő Deák Ferenc fölötti sorban, a jobb oldalon látható.

„Ma töltöd be huszadik évvedet. A nap, melyen születted, éltem egyik legkínosabb napja volt. Anyád a szülés következtében életveszélyben forgott. Benn a városban a felséges nép lázongott, és míg feleségem betegágyánál ülve, remény és kétségbeesés között számoltam érütéseit, a Pest-Budai tornyokról a vészharang hangjai tölték meg az éji csendet, és egyik üzenet jött a másik után, mely minisztertanácshoz szólított. Sohasem szenvedtem többet, mint ezekben az órákban; míg hajnal felé Balassa tudtomra adá, hogy anyád veszélyen kívül van; s őt megcsókolva, a városba lesiettem.” [1]

A kormány szeptember 23-i lemondása után Eötvös József kiutazott Bécsben tartózkodó családjához, majd onnan Münchenbe mentek, ahol 1853-ig (az osztrák–magyar viszonyokban bekövetkezett viszonylagos enyhülésig) maradtak. Itt fejezte be az apa egyik fontos művét, *A XIX. század uralkodó eszméinek befolyása az államra* címűt is. Ebben különösen érdekes a kommunizmussal foglalkozó rész, mintha prófétaként előre látta volna azt az időszakot, amikor Loránd fia meghalt:

„A lényeg, mire nézve a kommunizmus minden követője egyetért, abban áll, miszerint az állam céljaul a teljes egyenlőséget, s eszközül e célja érdekében az egyén föltétlen alárendelését az államnak tekintik. S miután az egyén teljes alávetése az állam hatalmának

csak úgy lehetséges, ha az államot korlátlan hatalommal ruházzuk fel, és mivel az általános egyenlőség elvét akkor lehet leginkább megközelíteni, ha az alól csupán egy személy van kivéve, következik: hogy a despotizmus nemcsak ellentétben nincs a kommunizmus elveivel, sőt szükséges eredménye ennek, s oly forma, melynek elvei annak leginkább megfelelnek. Nem a kommunista elvek győzelme, hanem csupán az lehetetlen, hogy ezen elveket valaha más valósítsa, mint az abszolutizmus. S azért a kommunizmus győzelme mindenkor egyszersmind a despotizmusé leend. S viszont ha azon pártokra fordítjuk figyelmünket, melyek e veszélyek ellenében a társadalom megmentése körül fáradoznak: látni fogjuk, hogy ezek is, ha a küzdőtéren diadalmasan meg akarják állani, oly eszközökhöz kénytelenek folyamodni, melyek – hacsak e részben a történet régi tapasztalatai nem csálnak – szintúgy az abszolutizmus megalapításához vezetnek.” [2]

Érdekes megemlíteni a fiú születésekor anyakönyvezett nevét is: Báró Vásárosnaményi Eötvös Loránd Ágoston Ignác Albert József. Ennek azóta több változata is ismeretes. Maga Eötvös a Lórándot követő neveket nem használta, a Vásárosnaményi előtagot is ritkán; külföldön megjelent publikációiban pedig Roland Eötvös néven szerepelt. A Lóránd hosszú ó-ja nem elírás: Eötvös egész életében így használta, aláírásaiban is így szerepel. Azóta a magyar helyesírás szabályai változtak, ami miatt napjainkban például az egyetem neve is Eötvös Loránd Tudományegyetem. Az akkor éppen Magyar Királyi Pázmány Péter Tudományegyetemnek nevezett intézmény 1950-ben, a kommunista kormányzat nyomására változtatta meg az egyetem nevét Eötvös Loránd Tudományegyetemre.¹ Közderülség tárgyát képezte, hogy az antiklerikális kommunisták az érsek helyett éppen egy báróról engedték elnevezni az egyetemet, noha az arisztokráciát legalább annyira nem kedvelték, mint az egyházakat.

E cikk szerzője még első kézből hallotta barátai orvos nagyanyjától azt a történetet, amelyik egy vizsgán esett meg. A fizika-előadást akkoriban minden hallgatónak (medikusok, tanárjelöltek, gyógyszerészek, valamint bölcsészek – köztük fizikus-, kémikus-, geológus- és biológushallgatók) a fizika előadója, báró Eötvös Loránd tartotta. Egy medika a vizsgán Eötvöst professzor úrnak szólította, amire a következő választ kapta: kedves kollegina, ha gondolja, szólíthat akár Lóránd bácsinak is!

Halála előtt Eötvös Loránd nagyjából egy évig rákbetegséggel küzdött. A „nagy háborúban” kora miatt nem kellett részt vennie, de kedves hegymászó vidéke, a Cortinai Dolomitok – ami akkor Ausztria–Magyarország és Olaszország határa mentén volt – háborús terület lett, így nyári szabadságait sok év után a Tátrába helyezte át. Mivel 1905-ben, 57 éves korában



EÖTVÖS LORÁND, A KIVÁLÓ TERMÉSZETTUDÓS, A PROLETÁRSÁG HALOTTJA. — A TEMETÉSI MENET ELINDULÁSA A NEMZETI MÚZEUMÉL.

2. ábra. Eötvös temetési menetének elindulása a Nemzeti Múzeumból, *Vasárnapi Újság*, 1919. április 20.

visszavonult a közélettől, a háborús politikai életben sem vett részt, és a Tanácsköztársaság idején sem kellett semmilyen szerepet vállalnia. Ennek ellenére 1919. április 8-i halálát követően április 12-én a Nemzeti Múzeumban a Tanácsköztársaság „a proletárhatalom nagy halottjaként” (2. ábra) ravatalozta fel, gyászbeszédét *Lukács György* – akkor közoktatásügyi népbiztos – mondta. Érdekes megemlíteni az MTA 1929. május 12-i, Eötvös Loránd halálának 10. évfordulójára rendezett ünnepi ülésén *Fröblich Izidor* beszédének erre vonatkozó részletét:

„Bár az akkori alkotmány nélküli kormány őt a nemzet halottjának tekintette és őt a Nemzeti Múzeum oszlopcsarnokában közköltségen ravatalozta fel: a hatalmon lévő nem alkotmányos kormány mégsem engedte meg, hogy ravatalánál az Akadémia elnöksége szóhoz jusson.” [1]

A korra jellemző, hogy (nem sokkal halála előtt, április elsején) *Dávid Lajos* matematikusnak, a budapesti Tanárképző Főiskola tanárának Eötvös Lorándot, a tudóst méltató hosszabb írása jelenik meg az akkori idők vezető *irodalmi* folyóiratában, a *Nyugatban* [3]. Ebben elég részletesen, de egyben közérthetően kifejti Eötvös legfontosabb tudományos eredményeit. Az is a korszakhoz tartozik, hogy a Tanácsköztársaság idején a megszűnés veszélye fenyegette a *Nyugatot*, a kommunisták szerint „túlzott demokratizmusa miatt”, de erre már nem került sor. A tanácskormány bukása után megjelenő első számon már a megszálló román hadsereg cenzúrája látható, akik júliusban be is tiltják a lapot, ami csak novemberben, a románok Budapestről történő kivonulása után indulhat újra [4].

Tanulmányok és közéleti tevékenység

Eötvös Lorándot apja közéleti pályára szánta, ezért 1865-ben az egyetem jogi karára iratkozott be. Jogi tanulmányai mellett azonban a bölcsészkaron természettudományos tárgyakat is hallgatott, és *Than Károly* laboratóriumában kémiai kísérleteket is folyta-

¹ Újabb fricska, hogy a rendszerváltás után, 1991-ben – az Eötvös Loránd Fizikai Társulat tiltakozása ellenére – az 1953 óta Eötvös Loránd nevét viselő, az ELTE Jogtudományi Kara melletti utcát visszaváltoztatták az 1874-től 1927-ig viselt Papnövelde elnevezésre (a szerk.).



3. ábra. A heidelbergi német tudományosság egyik „központja”: a Vörös Ökörhöz (Gasthof zum Roten Ochsen) címzett kocsmá (németül: Kneipe). Az 1703-ban épült vendéglátóhely 1839 óta folyamatosan a Spengel-család tulajdonában van.

tott. Apja nagylelkűen támogatta ezirányú tanulmányait, és a könyvek beszerzését a természettudományok területén. Loránd azonban hamarosan belátta, hogy a jogi pálya nem neki való, valamint azt is, hogy kísérleti eszközök nélkül nehezen halad a tanulmányaiban. Erről tanúskodik 1866. március 28-án apjához írt levele:

„Miután beláttam, hogy a jogtanulmányok elmulasztása, ha fentemlített nézetem mellett megmaradok, csak félszeggé tenne, ha pedig más pályát választanék, az elé akadályt gördítene, e gondolattal, melynek megvallom sokáig rabja voltam, felhagytam; de csak megerősödtem azon véleményemben, hogy a természettudományokat, tekintetbe véve azoknak jelen terjedelmét, csak két esztendőre félrevetni, rám nézve nagy hátrány lenne. Jól tudom, hogy Te nem kívánod; sőt a könyvek által, melyeket nekem ajándékozol, magad segítsz előre; de képes vagyok-e én egyedül azokból tanulni?”

Tanulom az ásványtant és nem ismerek ásványt; tanulom a geológiát és a legegyszerűbb formációnál kétségben vagyok; tanulom az állattant állat, a növénytant növény nélkül, egyszóval, a természettudományt, természet nélkül. E bajon, külföldi egyetemen, jó tanárok vezetése alatt, úgy hiszem, segítené.” [1]

Ennek következtében Than Károly javaslatára 1867-ben már a Heidelbergi Egyetemen folytat tanulmányokat, ahol fizikát *Kirchhoff*tól és *Helmholtz*tól, kémiát *Bunsen*től, matematikát *Königsbergertől* és *Hessétől* tanul [5]. Érdekes körülmény az is, hogy a kísérletezés módszereinek elsajátítása érdekében *Kirchhoff* Königsbergbe, *Franz Neumannhoz* küldi. Apjának beszámol erről a választásáról egy 1869. január 30-án írott levélben:

„Amit a jövő érdekében tanulni akarok, az először, miként kell experimentálni, jobban mondva, miként kell a kérdést felállítani úgy, hogy reá a természet megfelelhessen? És másodszer, mi módon lehet az így

nyert feleleteket egyszerű törvényekre visszavezetni. A nagy mester, kitől ezeket legjobban lehet tanulni, Neumann Königsbergben, s ezért szándékom jövőre odamenni.” [7]

Ezzel kapcsolatos reményei ugyan nem válnak be, mivel az ottani oktatást túlságosan „metafizikusnak” (mai szóhasználatunkkal elméletinek) tartja, ezért csak egy félévet tölt Königsbergben. A félév második részében rájön arra, hogy szemináriumokra kell eljárni, és ott megértheti az előadáson elhangzottakat. Azért kísérletekről is tanulhatott ott, mert a későbbiekben említendő felületfeszültség-mérések módszerét éppen Neumann hatására gondolta ki és annak szemináriumában ismertette először [6]. Visszatért tehát Heidelbergbe, hogy ott befejezze tanulmányait. Apjának 1896. november 6-án írt leveléből kiderül, hogy ott jól érezte magát a régi ismerősök között. A tudományos élettel is nagyon elégedett volt, az erről alkotott igen érdekes véleményét (3. ábra) az alábbi levélben részletesen kifejtette:

„Jól érzem magam újra Heidelbergben, fiatal ismerősök társaságában. Hetenként szombaton jó össze az úgynevezett »physikalischer Verein«, hol mérsékeltén söröznek, de mértéktelenül énekelnek. ... Jobb részét annak, amit tudok, a magamféle emberekkel való tudományos beszélgetés által tanultam, mert végre, előbb-utóbb vita keletkezik és kényszeríti az embert erejét összeszedni és tárgyát önállóan áttekinteni.

...Már többször mondtam és teljesen meg vagyok győződve arról, hogy a német tudományosság a német »Kneipe« nélkül nem létezhetnék. Bizonyára nem egy nagy eszme sör mellett született meg, és alkotójától eleinte jó élcnak vagy tréfának volt szánva. Ezért ajánlom, hogy aki a német tudományos életet és a német »Kneipe«-t meg akarja ismerni, az jöjjön Heidelbergbe, itt elég magyar fiatalember van; így *Helmholtz*-nak hét magyar hallgatója van, de nem mind-egyik természettudós: van közte egy teológus is.”

Tanulmányai befejezésekképpen 1870-ben tette le bölcsészdoktori szigorlatát természettan főtárgyból *Gustav Kirchhoff*, matematika melléktárgyból *Leo Königsberger*, és kémia melléktárgyból *Robert Bunsen* vizsgáztatók előtt. Doktori disszertációja a fényforrások relatív mozgását tanulmányozó *Fizeau*-kísérlet elméleti vizsgálatáról szólt – amit később a Budapesti Egyetemen elfogadtak habilitációs munkának is. Doktori diplomájának minősítése *summa cum laude*, ami egy apjának írott levél tanúsága szerint nem volt gyakori a Heidelbergi Egyetemen; 1870-ben rajta kívül csak egy másik magyar, *König Gyula* matematikus kapott ilyen minősítésű doktori oklevelet [1].

Hazatérte után nagyon szerencsésen haladt előre a tudományos közéletben. Az 1. táblázat tartalmaz néhány fontos eseményt, valamint azt az életkort, amikor ez történt. Tudatában volt annak, hogy – tehetsége és tudományos eredményei mellett – ezt a gyors előrehaladást apja, *Eötvös József* tekintélyének köszönheti. (Nem személyes befolyásának, mivel apja 1871-ben, amikor Loránd 23 éves volt elhunyt.) Egész életében ezért arra törekedett, hogy olyan tehetséges

1. táblázat

Néhány esemény Eötvös Loránd életéből, életkorának feltüntetésével.

életkor (év)	esemény
23	egyetemi magántanár
24	rendes egyetemi tanár
25	akadémiai levelező tag
30	tanszékvezető (élete végéig)
35	akadémiai rendes tag
41	az akadémia elnöke (16 évig)
43	az egyetem rektora (1 évig)
46	miniszter (7 hónapig)
47	visszatér az egyetemre
57	visszavonul a közéletől (ingamérések)
71	halála

személyek, akiknek származásuk okán nem adatott meg a lehetőség, hogy az ő életútját követhessék, mégse szenvedjenek hátrányt emiatt. 1895-ben, minisztersége idején javasolta a Bárány Eötvös József Collégium megalapítását, amely a Budapesti Tudományegyetem tanárszakos hallgatóinak internátusa volt. Az intézmény az akkor már 101 éves párizsi École Normale Supérieure mintájára kiváló képzést is nyújtott az ott lakó hallgatóknak. Első igazgatója Eötvös Loránd fizikus kollégája, *Bartoniek Géza* volt – akit a bentlakó hallgatók egyszerűen „Bégé úr” néven emlegettek. A Collégium (az 1950 és 1989 közötti kihagyástól eltekintve) azóta is töretlenül neveli a tehetséges hallgatókat jelmondatának megfelelően: szabadon szolgál a szellem.

A Magyar Tudományos Akadémia elnökeként is fontos tevékenységet folytatott. Ezt a megbízását 16 éven keresztül folytatta, amikor lemondott a tisztségről. Az akkori idők légkörét jellemzi a lemondásáról szóló egyik karcolat, amelynek írója *Cholnoky Viktor*, a nagy földrajztudós *Cholnoky Jenő* öccse. A *bét* című politikai és irodalmi szemlében megjelent írás néhány részletét idézzük:

„Mivel a tekintélyek közül az áltudomány az egyetlen, amely nem ismer semmiféle csodát, tehát tökéletes és befejezett csoda, hogy Eötvös Loránd báró csak most mondott le a tudományos Akadémia elnöki tisztségéről...”

Eötvös Loránd, a vízcsepp kutatója sohasem tudott [egy vízcseppet csak] vízcseppnek látni. Láta ... hogy ez a víz nem csupán H_2O , hanem egy csomó baktérium is. Egy csomó élősd. Akik ott benn a Magyar Tudományos Akadémiában – akarom mondani a vízcseppben, egymást falják fel, sőt esetleg a pályadíjakat is elnyerik egymás elől, de akár így, akár úgy cselekszenek, mindenképpen élősdiek... Vigasztaló ellenben az, hogy az igazi tudásnak még a Magyar Tudományos Akadémia sem árt.” [8]

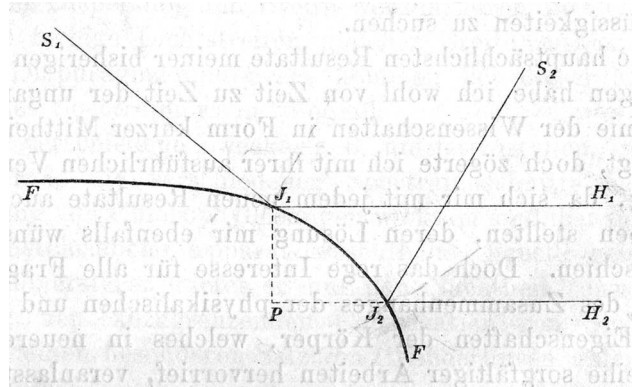
Eötvös akadémiai elnöksége alatt sem volt elégedett a magyar tudományos közélettel. Fellendítette a Természettudományi Társulat munkáját, 1891-ben pedig többedmagával megalapította a Matematikai és Fizikai Társulatot és elindította annak folyóiratát, a *Mathematikai és Fizikai Lapokat* (ami a *Fizikai Szemle* elődje). 1894-ben elindította az országos tanulmányi versenyeket matematikából és fizikából, amit később róla neveztek el Eötvös-versenynek. Tervei szerint és az ő irányítása mellett épült fel 1883 és 1886 között az egyetem új fizikai intézete az Eszterházy (ma: Puskin) utcában. (Pestlőrinci villájából az új fizikai intézetbe lóháton járt be. Lovát az intézethez közeli Nemzeti Lovarda épületében hagyta, amíg viszsa nem indult [9].)

Felületi feszültség vizsgálata és az Eötvös-szabály

Eötvös az egyetemi fizikatanítás mellett intenzív tudományos tevékenységet is folytatott. Kísérleteit folyadékok kritikus állapotának vizsgálatával kezdte, azonban ezen kísérletek üvegedényben igen veszélyesek voltak, ezért hamarosan áttért a felületi feszültség vizsgálatára, aminek megbízható eredményekre vezető módszerét még königsbergi tanulmányai során dolgozta ki. Az alkalmazott módszerről először 1876-ban számolt be magyar folyóiratban [10], majd a mintegy tíz éves rendszeres tanulmányairól és azok alapos elemzésének eredményéről 1886-ban, a tématerület vezető német folyóiratában [11]. A módszer szemléltetését utóbbi közleményéből másolva a 4. ábrán mutatjuk be.

A felületi feszültség pontos meghatározását folyadékok felületének a folyadék-szilárd határfelülethez közeli görbülete teszi lehetővé. Ez a görbület pedig az S_1 és S_2 irányoknak olyan módon történő beállításával mérhető egyszerűen, hogy a két beeső fénysugár a H_1 és H_2 irányban éppen párhuzamosan (és vízszintesen) verődjön vissza a felületről. A beeső sugarak vízszintessel bezárt szögét, valamint a kilépő fénysugarak távolságát pontosan megmérve – az ismert összefüggések alapján – kiszámítható a felület görbülete, abból pedig a felületi feszültség. Ennek az akkoriban

4. ábra. Eötvös Loránd ábrája a felületi feszültség mérésének elvéről az *Annalen der Physik und Chemie* 1886-os kötetében.



2. táblázat

Eötvös Loránd eredeti adatai a k Eötvös-állandó értékéről különböző folyadékokban [11].

folyadék	hőmérséklet-tartomány (°C)	Eötvös-állandó*
dietyl-éter	6–62	0,228
	62–120	0,226
	120–190	0,221
etilén-bromid	20–99	0,227
	99–213	0,232
kloroform	20–60	0,230
metil-higany	20–99	0,228
karbonil-klorid	3–63	0,231
széndioxid	3–31	0,228
víz	3–40	0,159
	40–100	0,180
	100–150	0,228
	150–210	0,227
ecetsav	21–107	0,132
	107–160	0,132
	160–230	0,138

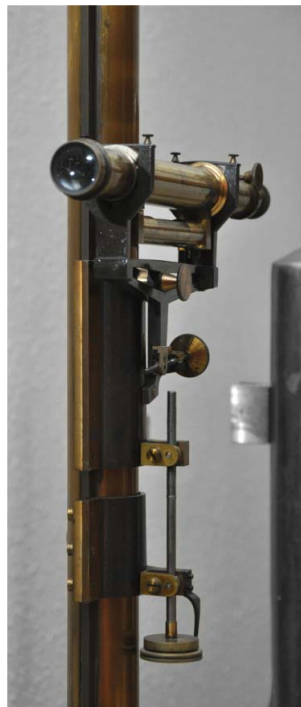
* Az állandó milligrammsúly $\text{mm K}^{-1} \text{mol}^{-2/3}$ egységben van megadva ($1 \text{ mgsúly mm K}^{-1} \text{mol}^{-2/3} = 9,80665 \cdot 10^{-7} \text{ J K}^{-1} \text{mol}^{-2/3}$).

használt módszerekkel szemben több előnye is volt. Egyrészt a reflexiós módszer eredménye független attól, hogy a folyadék mennyire nedvesíti az edény falát. Másrészt Eötvös a folyadékot addig párologtatta, amíg az kiszorította a levegőt a gőztérből, ezt követően pedig leforrasztotta az üvegedényt (általában csövet). A csőben így igen hosszú ideig változatlan volt a felületi feszültség, mivel az nem szennyeződött a levegőből. A leforrasztott csőben a hőmérsékletet is egyszerűen lehetett változtatni, így a felületi feszültség a forráspontonál lényegesen magasabb hőmérsékleten is mérhető volt – meg lehetett közelíteni a kritikus hőmérsékletet is.

Mindezek miatt a mérések – a korábbinál nagyobb pontosság mellett – egyrészt bizonyították, hogy a felületi feszültség időben állandó, másrészt korábban soha nem látott széles hőmérséklet-tartományban tették lehetővé a hőmérsékletfüggés mérését. A kapott adatok elemzésével jutott el Eötvös a később róla Eötvös-szabálynak nevezett összefüggéshez:

$$\gamma V_m^{2/3} = k(T_0 - T).$$

A képletben γ a felületi feszültség T hőmérsékleten, V_m a moláris térfogat, T_0 pedig az a hőmérséklet, amelynél a felületi feszültség zérusra csökken. (Eötvös szerint ez jó közelítéssel a kritikus hőmérséklet.) A képlet jelentése akkor érthető könnyen, ha azt az ideális gázok állapotegyenletének $pV_m = RT$ alakjához hasonlítjuk. Ez utóbbi egy *háromdimenziós* állapotegyenlet, ami a háromdimenziós gázra érvényes. Az Eötvös-szabály a *kétdimenziós* felületre érvényes. Ennek megfelelően a háromdimenziós p nyomás helyett a kétdimenziós γ felületi feszültség szerepel ben-



5. ábra. Teodolit, Eötvös Loránd felületfeszültség-mérő eszköze.

ne, a V_m háromdimenziós moláris térfogat helyett pedig a $V_m^{2/3}$ mennyiség, ami a „moláris felület”, azaz egy mól felületi molekula által lefedett felület. Az R általános gázállandó szerepét a két dimenzióban érvényes k Eötvös-állandó veszi át. A T hőmérséklet helyett a $T_0 - T$ különbség pedig azért szerepel benne, mert a kritikus T_0 hőmérséklet felett már nem létezik folyadékfázis, azaz a felületi feszültség értéke ott zérusra csökken. (Azóta kiderült, hogy folyadékoktól függően már 3-6 fokkal előbb nagyon megközelíti a zérus értéket, de ez csak egy apró korrekció: T_0 értékét változtatja meg a kritikus hőmérséklethez képest.) A 2. táblázatban Eötvös 1886-os, különböző folyadékok k értékére vonatkozó eredményeit, illetve az 5. ábrán a mérésekhez használt, az Eötvös Loránd Emlékmúzeumban látható teodolitot mutatjuk be.

Eötvös arra is rájött, hogy mi az oka annak, ha a k állandó eltér a táblázat elején található egyszerű folyadékokra kapott értéktől (ami körülbelül 0,227; SI egységekben kifejezve körülbelül $2,23 \cdot 10^{-7} \text{ J K}^{-1} \text{mol}^{-2/3}$). A táblázatból látható, hogy ez vízre az olvadásponthoz közelebb 0,159, míg a forrásponthoz közelebb 0,180; ecetsav esetében pedig elég nagy hőmérséklet-tartományban 0,132. A moláris térfogatot a moláris tömeget a sűrűséggel elosztva számíthatjuk ki. Ha az olvadásponthoz közeli vízre vagy 160 °C-ig az ecetsavra úgy számolunk, hogy a moláris tömeget egy víz-, illetve ecetsav-dimerre adjuk meg, akkor ezekre is kijön a 0,227-es eredmény a k állandó értékére. Ez azt jelenti, hogy ebben a hőmérséklet-tartományban mind a víz, mind pedig az ecetsav két molekulája asszociálódik a folyadékban, azaz ott a monomer molekula tömegének kétszerese a molekulatömeg, így a molekulák csak fele akkora helyet foglalnak el a folyadék felszínén, mintha monomer formájában léteznének a folyadékban. A víz hőmérséklettel változó k értéke pedig azt tükrözi, hogy a forráspont feletti hőmérsékleten a folyadékban már nincs jelentősebb mértékű asszociáció. Az ecetsav esetében az asszociáció nem teljes mértékben szűnik meg a hőmérséklet emelkedésével, de 160 °C felett már vannak monomer molekulák is a folyadékban.

Eötvös eredményei alapján tehát akár ismeretlen folyadékok moláris tömegét is kiszámíthatjuk, ha a hőmérséklet függvényében – elgendően nagy hőmér-

séklet-tartományban – meghatározzuk a felületi feszültségüket. Ismert folyadékok esetén pedig információt kaphatunk a molekulák esetleges asszociációjának mértékére. Azóta az is kiderült, hogy nemcsak kisebb k értékek léteznek, hanem a 0,227-nél sokkal nagyobbak is. A glicerín-trisztearát esetén ez elég széles hőmérséklet-tartományban 0,6 körüli érték; ennek magyarázata az, hogy a hosszú molekula nem „fekszik fel” a felületre, hanem egy kefe szőreihez hasonlóan csak kis része (az észterkötés felőli vége) van a folyadék felszínén, a hosszú szénláncok pedig „kilógnak”, így a molekula felületigénye a folyadék felszínén az egész molekula felületének csak töredéke.

Érdemes itt azt is megjegyezni, hogy Eötvös fényugarak reflexióján, illetve ezen keresztül a görbület mérésén alapuló felületfeszültség-meghatározási módszerét a róla elnevezett egyetem Fizikai Kémiai Tanszékén manapság is alkalmazzák. A fényelhajlást vékony elektródalemezek egyik oldalára leválasztott anyagok felületfeszültség-változásának nyomkövetésére használják. Függő cseppek alakjának számítógépes képiértékelésével kapott görbület meghatározásából pedig egyszerűen számítanak felületi feszültséget [12–14].

Eötvös eredményei a gravitáció területén

Eötvös felületi feszültséggel kapcsolatos eredményei nagyon jelentősek voltak a maga korában, és amint fentebb írtuk, a kétdimenziós folyadék-állapotegyenletet is róla nevezték el. A tudományos közösség azonban főleg gravitációval kapcsolatos eredményei alapján tartja őt számon. Az eredmények részletezése nélkül említjük itt azt az elméleti és gyakorlati szempontból egyaránt fontos felfedezését, hogy a torziós inga (más néven torziós mérleg) általa jelentősen továbbfejlesztett változatával sikerült a nehézségi gyorsulást 9 tizedesjegy pontossággal meghatározni. Ez akkora érzékenységgel felel meg, amely a torziós inga közelében elhelyezkedő tömeg néhány kilogrammos változását is képes pontosan érzékelni. Eötvös méréseinek pontosságát csak 1963-ban sikerült körülbelül 50-szeresével (plusz két tizedesjeggyel) növelni [15]. Amikor a Göttingeni Királyi Tudományos Társaság 1906-ban meghirdette a Benecke Alapítvány pályázati kiírását a gravitációs mérések pontosságának növelésére, azt az Eötvös és munkatársai által végzett mérések leírását tartalmazó pályamunka – a 3400 márka pályadíjjal együtt – nyerte el. Az elvégzett munka során olyan pontossággal igazolták a súlyos (tömegvonzásból adódó) és tehetetlen (adott erő hatására történő gyorsulásból adódó) tömeg azonosságát, ami megegyezett az akkor elérhető legnagyobb tömegmérési pontossággal [16]. Ez az eredmény kísérletileg is megalapozta Einstein 1915-ben felfedezett általános relativitáselméletét [17].

A kifejlesztett igen pontos eszköz és a mérések kiértékeléséhez szükséges elméleti módszerek részletes kidolgozása után lehetővé vált a gravitációs állan-

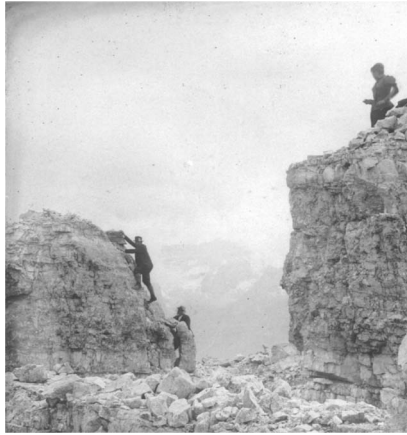


6. ábra. Az Eötvös-féle torziós inga egyik változata, a kettős inga (ennek két kivételéről a *Fizikai Szemle* 2019/6 és 2019/9 számában írtunk részletesebben – a szerk.).

dó, valamint a földi nehézségi gyorsulás igen pontos meghatározása. Ez a pontosság lehetővé tette azt is, hogy a Föld felszínén 1 m-nél kisebb felbontással lehetett meghatározni a nehézségi gyorsulás változását, amelynek oka a Föld mélyében rejlő egyenetlen tömegeloszlás. Ha egy adott területen jelentősen kisebb a nehézségi gyorsulás, mint körülötte, akkor ott kőolaj, illetve földgázkészletek lehetnek a föld alatt. Ha viszont nagyobb a nehézségi gyorsulás a környezetben mértnél, akkor ott nehezebb kőzetek (például kőso vagy fémérc) lehetnek a föld alatt. Emiatt az Eötvös-féle torziós inga² (6. ábra) felfedezése óta jelentős szerepet tölt be a nyersanyagkutatásban.

Mivel Eötvös eredményei alapján a nehézségi gyorsulás irány menti változásának mérésére is lehetőség nyílt, ezért annak egységét is róla nevezték el. A gravitációs gyorsulás SI mértékegysége a ms^{-2} ; ennek távolság szerinti változását pedig a távolsággal osztott mértékegység, azaz s^{-2} adja meg. A Föld felszínén jól mérhető különbségek ennél sokkal kisebbek; ezek jellemzésére szolgál az 1 Eötvös = 10^{-9}s^{-2} . (Az egység rövidítése: E.) A legnagyobb mérhető különbségek magas hegyekben fordulnak elő; ezek értéke elérheti a néhány száz Eötvös értéket.

² Az Eötvös-ingával, működési elvvel, módozataival, gyakorlati felhasználásaival és elvi jelentőségével idén jőpár írás foglalkozott a *Fizika Szemlében* (a szerk.).



7. *ábra.* Eötvös lányaival – akik örökölték apjuk, sőt nagyapjuk szenvedélyét és egészen kiváló hegyászok voltak – gyakran túrázott a Dolomitokban. Az ott készült felvételek üvegnegatívjai a Magyar Földtani és Geofizikai Intézet Országos Geofizikai Szakkönyvtárában találhatóak.

Eötvös egyik utolsó, gravitációval kapcsolatos eredménye az azóta róla elnevezett Eötvös-effektus felfedezése, amit először a tengeri hajókon végzett gravitációs gyorsulás-mérések elemzésével bizonyított. Ennek lényege, hogy a Földön a kelet felé haladó testek súlya csökken, a nyugat felé haladóké nő a nyugvó helyzethez képest. A jelenség magyarázata pedig az, hogy a gravitációs gyorsulás mérhető értéke a Föld vonzása és a centripetális gyorsulás eredőjeként áll elő. A Föld nyugatról kelet felé forog, ha ezzel szemben, keletről nyugat felé mozog egy test, akkor a centripetális erő kevésbé csökkenti a Föld vonzását,

azaz súlya nagyobb lesz, mint nyugvó esetben. A hatás nyugatról kelet felé mozgás közben pont ellentétes, a centripetális erő jobban csökkenti a Föld vonzását. E jelenség egyszerű kísérleti bemutatására Eötvös nagyon szellemes berendezést épített, amit Eötvös-mérlegnek nevezünk. Ez egy olyan mérleg, amelynek karjain viszonylag nagy, egyenlő tömegű súlyok vannak. Álló helyzetben a mérleg éppen ki van egyensúlyozva. Ha a mérleget egy forgó alaplzatra helyezzük és olyan körfrekvenciával forgatjuk, ami éppen megegyezik a mérleg lengési idejével, akkor a mérleg mozgása úgy áll be, hogy akkor mozog az egyik súly fölfelé, amikor az éppen keletről nyugati irányba mozdul (azaz könnyebb), miközben a másik súly nyugatról keletre mozogva nehezebb, mint állva. A megfelelő forgási frekvencia beállítása esetén így a mérleg addig fog növekvő amplitúdóval fordulatoként egyet lengeni, amíg a felfüggesztés és a légellenállás okozta csillapítás éppen egyenlő lesz a forgás okozta lengést növelő hatással. Az erről szóló közleményt Eötvös Loránd már a halálos ágyán írta; az csak posztumusz, munkatársai szerkesztői közreműködésével jelenhetett meg [18].

Eötvös sportteljesítményei

Eötvös Loránd lelkes természetjáró volt. Legkedveltebb kirándulóhelye a Dolomitok, ahol 16 éves korától az I. világháború kitöréséig szinte minden nyáron hosszabb időt töltött. Amikor *Rolanda* és *Ilona* lányai felnőttek, hármásban jártak oda hegyet mászni. Eötvös, ki fényképésznek is kiváló volt, ezeket is megörökítette (7. *ábra*). A tudományos közélet mellett nemcsak politikai szerepet vállalt (kulturális miniszter), hanem nagyon aktív szerepe volt a magyar turistaélet szervezeti háttérének megteremtésében is. Többek között a Magyar Kárpát Egyesület Budapesti Osztályát is elnökölte. Egyik elnöki beszédében kifejti „hitvallását” a turizmusról:

„Turista az, a ki útra kel azért, mert foglalkozásának egyformasága, gondjainak sokasága közepett álmaiban feltűnik előtte egy olyan szebb világ, melyben zöldebb a fű, kékebb az ég, magasabbak a hegyek, szebbek vagy különösebbek a házak, barátságosabbak az emberek, s a ki ez álomkép eredetijét fárad-



8. ábra. Az Eötvös-csúcs (Cima di Eötvös; 2837 m) a Cortinai Dolomitok Cadini di Misurina hegyvonulatán.

ságtól vissza nem riadva keresi – keresi, s mert hiszen e földön élünk, talán soha meg nem találja, de azért jó kedvét el nem veszti, hiszen örömét éppen ez a keresés teszi.” [19]

Nagyon eredményes hegymászó tevékenységét földrajzi nevek is őrzik, például az Északi Dolomitokban egy 2837 m magas csúcs, a Cima di Eötvös (8. ábra), illetve a Déli Dolomitokban a Croda da Lago hegyvonulat déli oldalán egy völgy, a Forcella di Eötvös. A leggyakoribb talliumásvány felfedezője, Krenner József mineralógus (Eötvös egyik fiatalkori nevelője) 1896-ban az ásványt Eötvös Loránd tiszteletére Loránditnak nevezte (összetétele: $TlAsS_2$.)

A hegymászó Eötvös – annak ellenére, hogy nem volt robusztus felépítése – a Tiroli hegyekben szívós, nagy erejű és kitartó embernek számított. Sporthoz való viszonyáról árulkodik az is, hogy az idén alapításának 120. évfordulóját ünneplő BEAC sportklub első elnöke is ő volt. Amint korábban írtuk, pestlőrinci nyaralójából az egyetemre lovon járt be (9. ábra). Lovát ilyenkor abban a Nemzeti Lovardában hagyta, amelynek ő is tagja volt. Lányjaival együtt kerékpározni is szerettek. Többször előfordult, hogy valamely munkatársával az egyetemről kora délután biciklikörútra indultak, néha egészen Budatétényig kerekézve, majd onnan visszatértek a munkába. Egy alkalommal két lányával egészen az Alpokig, Schluderbachig bicikliztek, igaz, nem Budapesttől, mert a túlzott anyai féltés miatt ártatlan vonatútnak álcázták a kalandot. Fehérváron – ahová titokban előreküldték a bicikliket – viszont leszálltak és onnan indultak a bő 600 kilométeres túrára [9].

Azt hiszem Eötvös Loránd igazán megvalósította az antik költő, Iuvenalis eszményét: *mens sana in corpore sano*.³

³ A latin mondat jelentése: egészséges testben egészséges szellem. Szokásos magyar változata: ép testben ép lélek.



9. ábra. Eötvös Loránd a Szent István Társulat székháza – jelenleg a Pázmány Péter Katolikus Egyetem Jog- és Államtudományi Kara, VIII. kerület, Szentkirályi utca 28–30. – előtt.

Irodalom

- Fröhlich I.: *Báró Eötvös Loránd emlékezete*. (1929), elérhető: <http://mek.oszk.hu/02000/02054/html/eotv9.html>
- Eötvös J.: *A XIX. század uralkodó eszméinek befolyása az államra*. (1849); újabb kiadása: Szépirodalmi Kiadó (1981), elérhető: <http://mek.oszk.hu/06600/06619/html/01.htm#49>
- Dávid L.: Eötvös Loránd. *Nyugat* XII/7, 1919. április 1.
- https://nyugat.oszk.hu/html/szakirodalom_kronologia.htm
- Kovács, L.: *Eötvös Loránd, a tudós-tanár*. Studia Physica Savaariensis VIII (2001).
- Tangl K.: Vizsgálatok a kapillaritásról. *A Matematikai és Fizikai Lapok* Báró Eötvös Loránd Füzete (1918).
- Károlyházy F.: Hungariae gentis decus. *Fizikai Szemle* 48/12 (1998) 397.
- Ch. V.: Eötvös Loránd báró. *A hét* XXV/42 (1905) 682–683.
- Kiss D. D.: *A természetszerető Eötvös Loránd; levéltári és kéziratári kutatások*. Magyar Tudománytörténeti és Egészségtudományi Intézet, Budapest (2017).
- Eötvös L.: Új módszer a capillaritási tünemények tanulmányozására. *Műegyetemi Lapok* (1876/1) 2–10.
- Eötvös, R.: Ueber den Zusammenhang der Oberflächenspannung der Flüssigkeiten mit ihrem Molekularvolumen. *Annalen der Physik und Chemie* 27 (1886) 448–459.
- Rokob, T. A., Láng, G. G.: Remarks on the electrochemical application of optical methods for the determination of stress in electrodes. *Electrochimica Acta* 51 (2005) 93–97.
- Láng, G. G.: Interface Stress Measurements in an Electrochemical Environment. In: Klaus, Wandelt (szerk.) *Encyclopedia of Interfacial Chemistry Surface Science and Electrochemistry*. 1st Edition, Elsevier, New York, Amsterdam, London, Tokyo (2018) 95–206.
- Varga I., Keszthelyi T., Mészáros R., Hakkel O., Gilányi T.: Adsorption of Sodium Alkyl Sulfate Homologues at the Air/Solution Interface. *J. Phys. Chem. B* 109 (2005) 872–878.
- Roll, P. G., Krotkov R., Dicke R. H.: The Equivalence of Inertial and Passive Gravitational Mass. *Annals of Physics* 26 (1964) 442–517.
- v. Eötvös, R., Pekár, D., Fekete, J.: Beiträge zum Gesetz der Proportionalität von Trägheit und Gravität. *Ann. Phys.* 373 (1922) 11–66.
- Einstein, A.: Zur allgemeinen Relativitätstheorie. *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften* (Berlin) (1905) 778–786.
- Eötvös, R.: Experimenteller Nachweis der Schweränderung die ein auf normal geformter Erdoberfläche in östlicher oder westlicher Richtung bewegter Körper durch diese Bewegung erleidet. *Annalen der Physik* 59 (1919) 743–752.
- Eötvös Loránd elnöki megnyitó beszéde a Magyar Kárpát Egyesület Budapesti Osztályának 1891. február 14-i ülésén. Idézi [9]; megjelent a *Herkules* című újság 1891. évi 9. (máj. 1.) számában.

A MINDENSÉG TÖRTÉNETE 99,99999%-ÁNAK LENYŰGÖZŐ REKONSTRUKCIÓJA

Patkós András
ELTE Fizikai Intézet



James Peebles, a 2019. évi fizikai Nobel-díj egyik felének kitüntetettje, a Princeton Egyetem professzor emeritusa, a kitüntetés alkalmából – 2019. október 8-án, az egyetemen – tartott sajtókonferencián.

Évezredünk első 20 fizikai Nobel-díjából az ötödiket ítélték oda 2019. október 8-án asztrofizikai felfedezésekért. *R. Giacconi* (2002, kozmikus röntgenforrások), *J. C. Mather* és *G. F. Smooth* (2006, kozmikus mikrohullámú sugárzás feketetest-természete és anizotrópiája), *S. Perlmutter*, *B. P. Schmidt* és *A. G. Riess* (2011, az Univerzum gyorsuló tágulása), *K. Thorne*, *B. Barish* és *R. Weiss* (2017, gravitációs hullám) elismerését követően idén „csak” felerészben jutalmazott a Svéd Akadémia égbolton végzett megfigyelésekkel elért felfedezéseket (*M. Mayor* és *D. Queloz* munkáját önálló cikk mutatja be). A 2019. évi fizikai Nobel-díj felét *James Peeblesnek* ítélték.

Peebles „fizikai kozmológiában tett elméleti felfedezéseinek” elismerését éppen munkássága elméleti jellegének hangsúlyozása teszi különlegessé. A Princeton Egyetem professzora az 1960-as évektől mindmáig főszereplője az einsteini gravitációelméletet a megfigyelhető Univerzum egészére alkalmazó modell fejlesztésének és jóslatainak a nagy pontos-



Patkós András (1947) akadémikus az ELTE emeritus egyetemi tanára. Elméleti fizikus, aki a kvantumtérelméletek megoldási módszereit fejleszti, az erős és az elektrogyenge anyag fázisátalakulásait, azok kozmológiai szerepét kutatja. Számos tankönyv (társ)-szerzője. Rendszeresen ír tudományos-népszerűsítő cikkeket is.

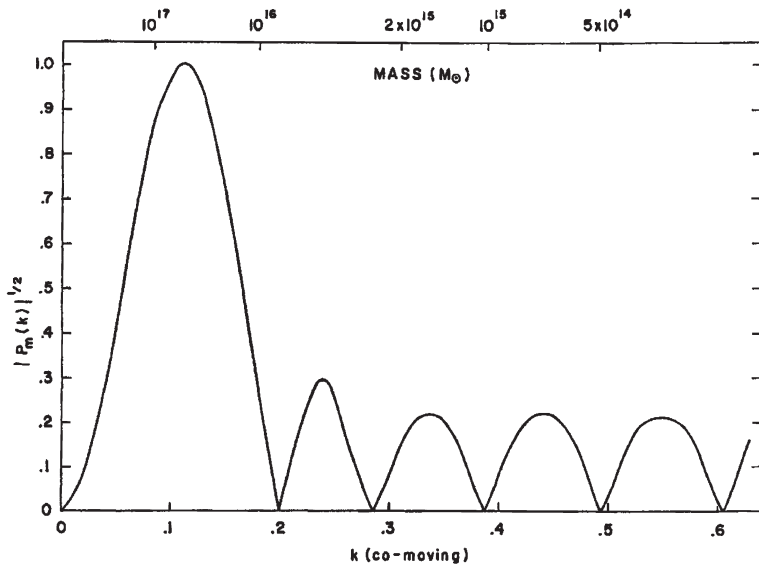
ságú megfigyelésekkel való összevetése kidolgozásának.

Pályáját a Princeton Egyetemen *Robert Dicke* vezetésével kezdte el. Az 1950-es évek végén Dicke és *Wheeler* hirdették meg a kísérleti gravitációfizika kutatási stratégiáját. Ennek egyik első sikere volt az Eötvös-kísérlet megjavított pontosságú megismétlése 1963-ban. Szinte párhuzamosan folytatta Dicke a forró Univerzum termikus sugárzásának kísérleti kimutatására való készülődést többek között *D. T. Wilkinson* részvételével (akinek nevét az általa szervezett, csak halála után végrehajtott WMAP – Wilkinson Microwave Anisotropy Probe – misszió örökítette meg), amelynek elméleti számításaihoz kapcsolódott be az 1962-ben PhD-t szerzett fiatal kutató. Közismert *Penzias* és *Wilson* 1965-ös felfedezése értelmezésének anekdotikus története, amelynek Peebles a Bell Laboratory

antennatervező kutatói és a Princeton Egyetem asztrofizikusai között közvetítő szereplője volt. A publikációs adatbázisok számára lényeges száraz tény annyi, hogy a kozmikus mikrohullámú sugárzás felfedezését bejelentő cikk és eredetének elméleti asztrofizikai értelmezését nyújtó Dicke–Peebles–Roll–Wilkinson-írás egymás mellett jelent meg az *Astrophysical Journal* 142. kötetében.

Már ez a cikk hangsúlyozta a sugárzás és a kozmikus anyageloszlás sűrűsége és ingadozásai közötti kapcsolatot. Peebles annak részletes elméletével foglalkozott a következő öt évben. 1970-ben jelent meg *J. T. Yuval* közös munkája, amelyben az Einstein-egyenletek Friedman-féle gömbszimmetrikus megoldásában az anyagsűrűség lokális ingadozásai hatására bekövetkező módosulásnak a háttérsugárzás spektrumára gyakorolt hatását mutatták be. Numerikus számításaik bemenő információjaként a sűrűség-ingadozások spektrális sűrűségére az *E. R. Harrison* által ugyanabban az évben javasolt skálafüggetlen tulajdonságot tételezték fel. Ennek a (kicsiny, de lényeges korrekciókkal megjavított) spektráliseloszlásnak ma Harrison–Zeldovics-spektrum a neve. A számítások a kozmikus háttérsugárzás spektrális eloszlására az *1. ábrán* látható (a Nobel-díj szakmai indoklásában idézett) eredményre vezettek, jó negyedszázaddal az előtt, hogy a WMAP annak periodikus szerkezetét meggyőző pontossággal kimutatta.

A Nobel-díj bizottsága ezt az eredményt tekinti Peebles előrelátó, a megfigyelési stratégiák kidolgozására alapvető hatást gyakorló első eredményének. Az



1. ábra. Peebles és Yu jóslata a kozmikus háttérsugárzás spektrális teljesítménye négyzetgyökének függésére az együttmozgó rendszerben mért hullámszámtól. (P. J. E. Peebles, J. T. Yu: Primeval adiabatic perturbation in an expanding universe. *The Astrophysical Journal* 162 (1970) 815–836.)

eredményekből leszűrhető fizikai kép igen egyszerű: az anyag (ion-elektron plazma) a gravitációs potenciálnak a horizonton belül kialakuló állóhullámszerű ingadozásaiban hoz létre egyensúlyt a termikus foton-gázzal. A megfigyelt relatív spektrális hőmérséklet-ingadozás ($\delta T/T$) és a sűrűség-ingadozásokból származó gravitációs potenciál-ingadozás ($\delta\phi$) kapcsolatát a Sachs–Wolfe-képlet határozza meg:

$$\frac{\delta T}{T} = \frac{\delta\phi}{3c^2}.$$

A Nobel-méltatás nem felel meg az anyagsűrűség akusztikus állóhullámai kialakulásának tárgyalásában *Ya. B. Zeldovics* és *R. A. Sunyaev* úttörő munkájának említéséről.

Mielőtt rátérnék a Peebles Nobel-díját megalapozó második elméleti eredményének bemutatására, rövid pihenőként a 2. ábrára irányítom az Olvasó figyelmét. Az ELTE TTK fizika szakkönyvtárából kértem el az emlékeimben jól megőrzött, kissé szakadozott felületű könyvet, Peebles 1970-ben írt munkáját. A Dicke körüli csoport biztatását megköszönő szerző 1969-ben tartott doktori kurzusának jegyzeteit alakította könyvvé. Ez időben rajtuk és a Szovjetunióban Zeldovics és A. Szaharov hatására létrejött tudományos iskolán kívül nem sokan voltak, akik hittek a kozmológia pontos, kvantitatív jóslatokra képes területé alakulásában. A *Marx György* hagyatékából származó kávéfoltos, agyonhasznált könyv bizonyítja, hogy Magyarországon gyorsan követőkre találtak (lásd még alább!).

A sötét anyaghoz kapcsolódó megfontolásokat ma már nem szükséges alapoktól induló részletes beszámolóval kezdeni. Elég emlékeztetni arra, hogy galaxisok forgási görbéitől indulva a könnyű atommagok szintéziséig számos érv gyűlt össze ahhoz, hogy az 1970–80-as évek fordulójára a sugárzást kibocsátani

képtelen, nem relativisztikus mozgást végző („hideg”) sűrűségkomponenst önálló, ráadásul domináló alkotórészként iktassák be a plazma+sugárzás együttes mozgását meghatározó háttérként. A sugárzó komponens valójában a sötét anyag által meghatározott sűrűségfluktuációk által kialakított potenciálban alakítja ki sugárzási egyensúlyát. Peebles 1982 decemberében publikálta az Univerzum méretű skálán kialakuló hőmérséklet- és sűrűség-ingadozásoknak a domináns sötét anyagkomponensre alapozott elméletét. A sötét anyag átlagsűrűség-értékének az akkori adatokhoz igazított becslését felhasználva jutott a

$$\frac{\delta T}{T} = 5 \cdot 10^{-6}$$

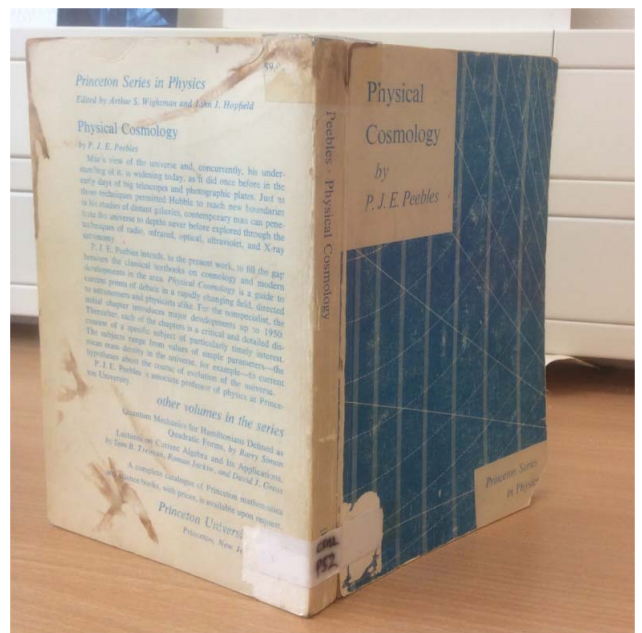
jóslatra. Nagyságrendileg ez a jóslat is bevált a WMAP mérések tükrében.

Újfont megállhatunk rövid szubjektív emlékezésre. A Svéd Akadémia Peeblesnek az úgynevezett hideg sötét anyag feltevézésével végzett számításaihoz a következő mondatot fűzi hozzá: „Más kutatók az 1980-as évtized közepén továbbfejlesztették az elméletet.” A megadott két referencia egyike:

[45] J. R. Bond, A. S. Szalay: The collisionless damping of density fluctuations in an expanding universe. *Astrophys. J.* 274 (1983) 443.

Ha ehhez hozzáteszük *Bond, Szalay és Turner* cikkét, amelyet *Formation of galaxies in a gravitino-dominated universe* címmel a *Physical Review Letters* 48. kötetében tették közzé (1982. június), akkor bizvást tekinthetjük Szalay Sándort a sötét anyag kozmológiai hatását részleteiben kidolgozó elmélet egyik

2. ábra. Peebles *Physical Cosmology* könyvének agyonolvasott példánya az ELTE Fizikai Szakkönyvtárából.



társalkotójának. E cikkek motivációja annak felismerése volt, hogy a sötét anyagnak kínálgó (akkor tömegnélkülinek ismert) neutrínók relativisztikus természetük miatt alkalmatlanok a struktúrák kialakulásához vezető sűrűségfluktuációk közegének szerepére. Helyettük kényszerültek egy tömeges, a sugárzás kibocsátásának időszakában már nem relativisztikus mozgású részecskét feltételezni. Szalay amerikai tanulmányútjai előtt szoros kapcsolatot épített ki a Zeldovics-csoporttal. A velük folytatott kutatásokban kialakult tudományos érdeklődése természetes módon vezette a sötét anyag kozmológiai elméletének kidolgozásához.

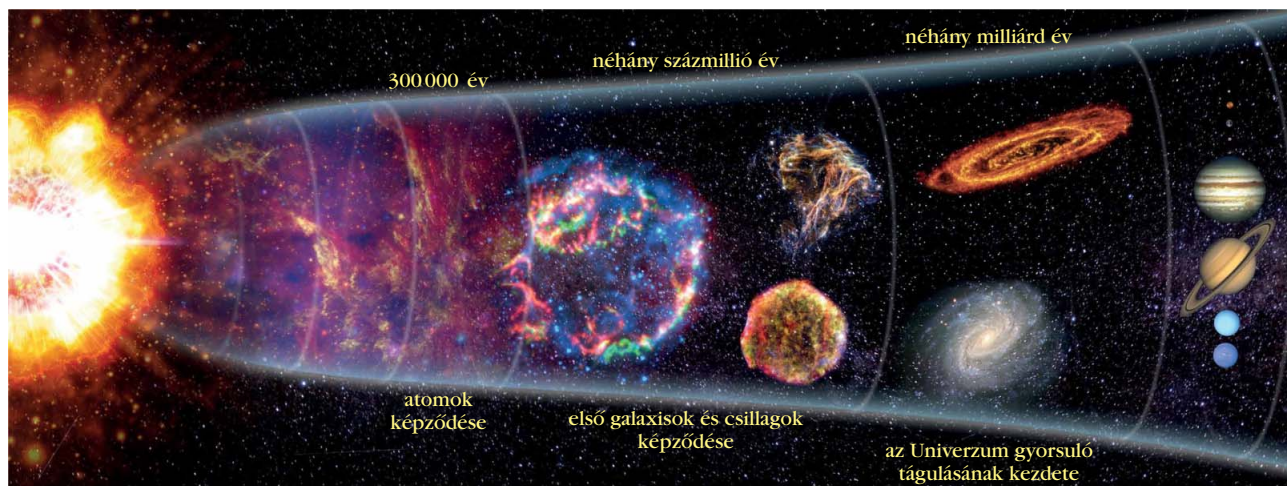
A kozmikus struktúra kialakulását kutatókat folyamatosan izgatta a (skálainvariáns) őseredeti sűrűség-ingadozások dinamikai háttere. Az 1980-as évtized elején született meg a kozmológiai infláció gondolkodási kerete (*Starobinsky*, 1980; Guth, 1981), amely az ősröbannást követő 10^{-32} s rövidségű időtartományban kozmológiai állandóként viselkedő energiasűrűséget alkotó hipotetikus *inflaton* részecske kvantumingadozásaira alapozta a gravitációs potenciálban a háttersugárzás kibocsátása időszakában jelenlévő fluktuációk eredetét. Az exponenciális tágulás során az Univerzum térbeli görbülete kisimult, sík geometria jött létre, egyben az inflációt megvalósító különböző változatok más-más, a Harrison–Zeldovics-spektrumtól kissé eltérő viselkedésű spektrumokra vezettek. (Hangsúlyozni kell, hogy a Nobel-díj odaítélése nem tulajdonítja Peeblesnek és nem is tekinti bizonyítottnak az inflációs szakasz létezését.)

A sík geometria kialakulásának előfeltétele, hogy az Univerzumot kitöltő energiasűrűség az úgynevezett kritikus energiasűrűséggel nagy pontossággal egyezzen. Amennyiben a galaxisok skáláján érvényes teljes (világító és sötét) anyagsűrűséget a kozmológiaival egységesen szeretnénk tárgyalni, akkor meg kell szabadulni kritikus sűrűség és a galaxisok kinematikai vizsgálatából levont anyagsűrűség eltérésétől, mivel az utóbbi nagyjából ötöde a kritikusnak.

E fejlemények hatására kezdett Peebles foglalkozni egy nullától különböző, kis értékű kozmológiai állandó hatásának kérdésével az Univerzum fejlődésének kései (vég)fázisára. Miután a kozmológiai állandó által képviselt energiasűrűség nem hígul, egy kicsiny érték feltételezése nem befolyásolja a galaxisok keletkezésének korai szakaszát, de a táguló Univerzumban híguló közönséges anyagsűrűség és sugárzási energiasűrűség hatására a kései fázisban dominánssá válik. Ez vezet a tágulás gyorsuló jellegéhez. Ugyanakkor a ma sötét energiának nevezett komponens jelen korunkban alkalmas a teljes energiasűrűségnek a kritikusra történő felnövelésére. 1984-ben közzétett elemzéseivel Peebles elsőként újította fel a kozmológiai állandó nem zérus értékének ideáját, öt évvel megelőzve *Steven Weinbergnek* antropikus érvekkel alátámasztott elképzelését. A gyorsuló tágulás megfigyelési bizonyítékával pedig közel másfél évtized múlva lepték meg a csillagász közösséget. Peebles az évtized végén *Bharat Ratra-val* részletes térelméleti modellt is alkotott, amelyben a kozmológiai állandó helyett időben lassan változó térmennyiséget vezettek be, ami reményt ad létezése dinamikai következményeinek jövőbeli feltárására.

A három anyagi összetevő – a sötét anyag, a világító (barionikus) anyag és a kozmológiai állandó –, valamint a sugárzás fotonanyagának összerakásával 1995-ben *Ostriker* és Peebles megfogalmazták a kozmológia úgynevezett összhangzó (concordance) modelljét, amely néhány megfigyelési eredményekhez igazított paraméter beállításával nagy pontossággal képes számot adni a kozmikus háttersugárzás kibocsátásának korától (A.BB. $3 \cdot 10^5$) a galaxisfelmérésekből megismerhető galaxiskeletkezési és -fejlődési korszakon át a gyorsuló tágulással jellemzett mai korig (A.BB. $1,38 \cdot 10^{10}$) tartó kozmológiai fejlődésről (3. ábra). (Az A.BB. jelölést az A.D. rövidítés mintájára vezettem be.) E két szám összehasonlítása magyarázza meg jelen cikk címét és adja meg James Peebles hozzájárulásának jelentőségét: az összhangzó kozmológia számot képes adni a kozmológiai fejlődésről az Univerzum létezési időtartamának 99,99999%-a során.

3. ábra. A kozmológiai történelem menetéből J. Peebles munkássága a 300 000 és néhány milliárd év közötti időszak dinamikájának részletes tárgyalását alapozta meg.



FIZIKAI NOBEL-DÍJ AZ ELSŐ EXOBOLYGÓ FELFEDEZÉSÉÉRT

Haris-Kiss András
ELTE és CSFK Csillagászati Intézet

1995 októberében két svájci csillagász, *Michel Mayor* és *Didier Queloz* bejelentették, hogy felfedeztek egy Jupiter-nagyságú bolygót az 51 Pegasi csillag mellett, ami attól mindössze nyolcmillió kilométerre kering.

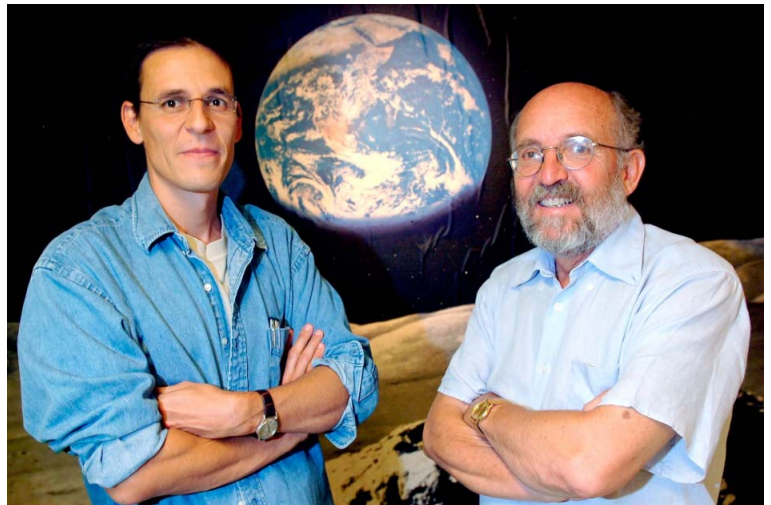
Ekkor első alkalommal sikerült megfigyelni egy bolygót, ami egy Naphoz hasonló csillag körül kering, ráadásul hozzá elképesztő közelségben, jóval a Merkúr pályájának (58 millió km) megfelelő távolságon belül. Csillagát mindössze 4,2 nap alatt kerüli meg.

A felfedezéssel új korszak kezdődött a csillagászatban, amelynek fontosságát jelzi az is, hogy a két felfedező munkáját idén fizikai Nobel-díjjal tüntették ki.

Mayor és Queloz az 51 Pegasi b-re keresztelt bolygót a Haute-Provence-i Csillagvizsgálóban működő ELODIE spektrográffal detektálták. Módszerük – amelyet *radiális sebesség módszernek* neveznek – lényege az, hogy a csillag spektrumában észlelhető vöröseltolódás segítségével periodicitásokat keresnek a csillag mozgásában. Ha azt tapasztalják, hogy a csillag egy ideig távolodik, majd közeledik, és ez a mozgás folytonosan ismétlődik, az azzal magyarázható, hogy a csillag a bolygóval közös tömegközéppontja körül való keringése során hol távolabb, hol közelebb kerül a megfigyelőhöz.

Az ELODIE a saját m/s nagyságrendű sebességfelbontásával bőven elég érzékeny volt, hogy az 51 Pegasi b által okozott körülbelül 118 m/s sebességeltéréseket megfigyelje a csillag mozgásában.

Mivel a nagyobb tömegű bolygók nagyobb, így könnyebben kimutatható változásokat okoznak egy csillag sebességében, az elsők között felfedezett exobolygók mind nagy, a Jupiteréhez hasonló vagy még annál is nagyobb tömegűek voltak. Bár ez a módszer határozottan eredményes, és a mai napig fedeznek fel így exobolygókat, illetve erősítenek meg más módon felfedezett exobolygó-jelölteket, az új



Didier Queloz és Michel Mayor

bolygók megtalálásának ma már nem ez a legsikeresebb módja.

1999-ben két független kutatócsoport, az egyik *David Charbonneau*, a másik *Greg Henry* vezetésével a HD 209458 jelű csillag fényességét vizsgálva parányi mértékű, ismétlődő elhalványodást vett észre, amelyet egy már korábban radiális sebesség módszerrel felfedezett bolygó okozott azzal, hogy amikor felőlünk nézve elhaladt a csillaga előtt, fényének egy részét kitakarta.

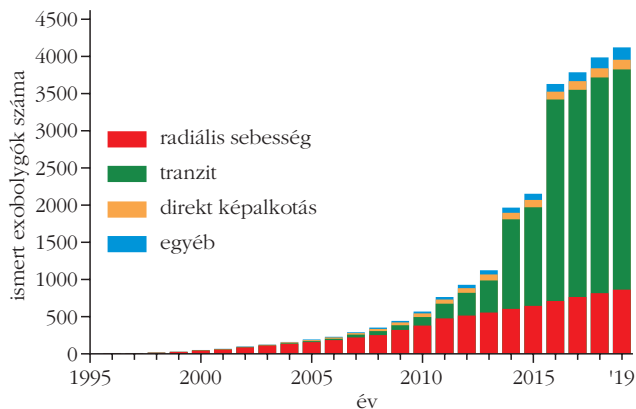
A bolygófelfedezés ezen módját, amikor egy csillag fényességének az előtte elhaladó bolygó okozta csökkenéséből következtetünk a bolygó létezésére, *tranzitmódszernek* nevezzük. Napjainkban ennek segítségével fedezik fel a legtöbb exobolygót és az exobolygókat kutató űrtávcsövek is ezt a módszert alkalmazzák.

E módszer előnye még az is, hogy olyan apróbb bolygókat is ki tud mutatni, amelyeket radiális sebesség-mérésekkel nem feltétlenül lehetne felfedezni. Mivel a kisebb tömegű bolygók viszont általában kisebb átmérőjűek is, ezek kisebb területet takarnak el a csillagukon, és így csak gyengébb elhalványodást okoznak. Ennek megfelelően minél kisebb fényességváltozást tudunk észrevenni, annál kisebb átmérőjű bolygókat tudunk felfedezni.

Az exobolygók felfedezésének harmadik fontos módja az, ha közvetlenül képet alkotnak az égitestről. Ez először 2008-ban sikerült, amikor a Déli Hal csillagkép legfényesebb, 25 fényév távolságra lévő Fomalhaut nevű csillagánál sikerült azonosítani a csillag körüli törmelékgyűrűben egy három Jupiter-tömegű bolygó elmozdulását a Hubble-űrtávcső 2004 és 2006 között



Haris-Kiss András az ELTE csillagász szakos hallgatója, a CSFK Csillagászati Intézet demonstrátora. Kutatásának célja olyan exobolygók azonosítása, melyek körül stabil pályán keringhetnek potenciálisan lakható holdak.



1. ábra. Az ismert exobolygók száma időrendben a felfedezésük módja szerint megkülönböztetve (az adatok forrása: <http://exoplanet.eu>).

készített felvételein (ez a kép szerepelt a *Fizikai Szemle* 2019. októberi számának címlapján). Azóta több exobolygót is sikerült így, *direkt képalkotással* beazonosítani számos földi és űrtávcső fényképein.

Az exobolygók detektálásának ezen kívül még több módja is van, amelyeket a cikk terjedelme miatt nem részletezünk. Megemlítendő, hogy egy pulzár (a csillagmaradványok egyik típusa) körül már 1992-ben kimutattak bolygókat a pulzárjel ismétlődési idejének modulációjából (*Aleksander Wolszczan* és *Dale Frail* felfedezése).

A különböző felfedezési módszerek elterjedtségét és az ismert exobolygók számát évekre bontva az 1. ábra mutatja.

Az első exobolygókat mind egyesével találták a csillaguk körül, azt a látszatot keltve, hogy a miénkhöz hasonló több bolygóból álló naprendszer ritkaságnak számít. 1999-ben az addig „egybolygós” v Andromedae rendszerben még két új bolygót fedeztek fel. Ma már az ismert bolygórendszerek több mint 20%-áról tudjuk, hogy egynél több bolygó kering bennük, a legnépesebb ismert bolygórendszerben lévő bolygók száma pedig megegyezik a saját Naprendszerünkével. Ez a Kepler-90 elnevezésű bolygórendszer viszont sokkal kompaktabb, mint a miénk. Itt a csillagtól legtávolabbi bolygó is csak egy csillagászati egységre, tehát olyan távolságban kering, mint a Naptól a Föld.

Az öt, illetve még több bolygót tartalmazó ismert rendszerek túlnyomó többsége szintén legalább ennyire szűkös.

Természetesen a Földön kívüli élet kutatása is izgalmas lehetőség, amelynek új lendületet adott az exobolygók kutatása. Lakható zónának nevezzük a csillagtól vett azon távolságtartományt, ahol a bolygó felszíni hőmérséklete – a Földéhez hasonló légkört feltételezve – lehetővé teszi, hogy a felszínen folyékony víz geológiai időskálákon stabilan fennmaradjon. Az első bolygót a lakható zónában 2001-ben fedezték fel a Genfi Egyetem kutatói. Ez a HD 28185 b, tömege a Jupiter tömegének hatszorosa. Ahogy egyre több exobolygót fedeznek fel, egyre gyakrabban számolnak be lakható zónában keringő

bolygókról, amelyek híre gyakran a közvéleményhez is eljut. Ma már több tucatnyi potenciálisan lakható exobolygót ismerünk, amelyek között több a Földéhez hasonló tömegű.

Szintén 2001-ben történt, hogy először tudták tanulmányozni egy exobolygó légkörének összetételét. Ahogy a HD 209458 b jelű bolygó elhaladt a csillaga előtt, a légkörén áthaladó fényben nátriumot mutattak ki a Hubble-űrtávcső spektrográfiájával. Az elemek ilyen módon történő felismerése rendkívül fontos lesz az élethez elengedhetetlen víz kimutatásához egy bolygón. Egy bolygó saját, csillaggal nem összesimosott spektrumát először 2007-ben tudták rögzíteni az infravörösben mérő Spitzer-űrtávcsővel.

A csillagok körülbelül 50%-a kettős vagy többes csillagrendszer tagja, így az exobolygók kutatása szempontjából fontos kérdés volt, hogy létezhetnek-e ilyen, első hangzásra különös rendszerekben keringő bolygók, akár csupán az egyik, akár mindkét csillagot megkerülve.

A kérdés első részét hamar megválaszolták: az 1996-ban az amerikai Lick és McDonald csillagvizsgáló munkatársai által egymástól függetlenül felfedezett 16 Cygni Bb egy hármas csillagrendszer egyik komponense körül 2,2 éves periódussal kering. A válasz második felére 2011-ig kellett várni, ekkor jelentették be a Kepler-16b felfedezését. Ez a Szaturnusz nagyságú bolygó egy 0,2 Nap-tömegű vörös törpecsillagból és egy 0,6 Nap-tömegű csillagból álló rendszerben kering, két „szülőcsillagát” 229 nap alatt kerüli meg. (Viszont meg kell jegyezni, hogy fősorozati csillagból és barna törpéből álló kettős rendszerben keringő bolygót már 2005-ben találtak.)

Az exobolygók kutatása 2003-ban kezdett kitelepníni a világűrbe. Ekkor indították Kanada első űrtávcsővét, a bőröndnyi nagyságú MOST-ot (Microvariability and Oscillations of Stars), amivel rendkívül pontosan lehetett mérni a csillagok fényességváltozását, így az asztroszeizmológiai mérések mellett tranzitmódszerrel is újabb exobolygókat lehetett felfedezni.

A következő nagy érzékenyséű űrtávcső, amit exobolygók felfedezésére alkalmaztak, a 2006-ban indított francia gyártású CoRoT (Convection, Rotation et Transits planétaires) volt. Első bolygóját (CoRoT-1b) 2007 májusában fedezte fel. A távcső hét éven át maradt aktív.

Valószínűleg a legismertebb űrtávcső, ami közvetlenül az exobolygókhoz kötődik, a 2009-ben indított Kepler. Az ismert exobolygók száma korábban is folyamatosan gyarapodott, de az igazán ugrásszerű növekedést a Kepler mérési adatai okozták.

A Kepler ugyancsak a csillagok elhalványodásának mérésével kereste az exobolygókat. A bolygókeresés mellett más céljai az asztroszeizmológiai vizsgálatok voltak, illetve bármely, látómezejében található asztrofizikai objektumra (például kisbolygók vagy változócsillagok) akár éveket átfogó nagyon pontos fénygörbéket tudott előállítani. A Kepler a Hattyú és Lant csillagképek határán fekvő 575 holdkorongnyi területet folyamatosan figyelte majdnem négy éven keresztül.

Amikor a Kepler több stabilizáló lendkereke is elromlott, és már nem lehetett folyamatosan egy irányban tartani a távcsövet, elkezdődött a K2, a Kepler második küldetése, amelynek során az űrtávcső az ekliptika mentén készített felvételeket, körülbelül 80 naponként megváltoztatva a látómezőjét.

A Kepler adatai alapján véve változtatták meg az exobolygókról alkotott elképzeléseinket. A Kepler óta ismert például, hogy a csillagok legalább 70%-ának van bolygója, illetve, hogy minden hatodik csillagnak van a Merkúrnál közelebb keringő Föld-méretű bolygója. Összesen 2662 megerősített exobolygó-felfedezést köszönhetünk a Keplernek.

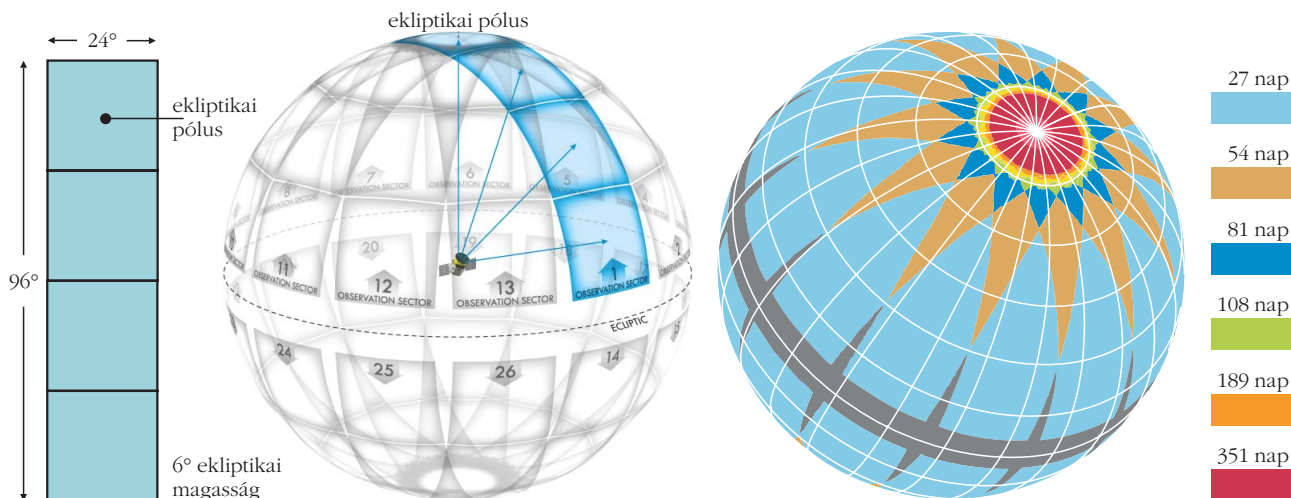
A Kepler és a K2 misszióról a *Fizikai Szemle* 2019/7–8. számában jelent meg *Boldog Ádám* összefoglalója.

Az űrtávcsövek ugyanakkor nem szorították ki a korábbi módszereket. 2016-ban radiálissebesség-mérésekkel mutatták ki, hogy a Naphoz legközelebbi csillag, a Proxima Centauri körül Föld nagyságú kőzetbolygó kering. A Proxima Centauriból áramló erős csillagszél miatt viszont a kutatók nem tartják valószínűnek, hogy a bolygón élet alakulhatna ki.

Jelenleg második évét tölti az űrben az exobolygókat kereső legújabb űrtávcső, a TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite), amely 2018 augusztusában látta meg „első fényét”. Célja annyiban más az előző hasonló küldetésektől, hogy két év alatt az egész égboltot végig fogja észlelni. Ezt úgy teszi, hogy 27 napon keresztül az ég egyik féltékéjének 1/13-át figyeli meg, majd továbbfordul a következő, eddig feltérképezetlen égrészre. Ennek az az előnye, hogy a 27 naposnál rövidebb keringési periódusú bolygók, amelyek kellően fényes csillag körül keringenek ahhoz, hogy a TESS megfigyelje őket, mind ismertek lesznek (50 ppm érzékenység a 9–15 magnitúdó fényességtartományban). 2019 novemberéig 29 megerősített bolygó felfedezése fűzhető a TESS-hez.

A TESS által vizsgált égbolterületeket a 2. ábra mutatja be.

2. ábra. A TESS űrtávcső által végigpásztázott égterületek. A bal oldali éggömb színezett része szemlélteti, mekkora égterületet figyel meg egy 27 napos észlelési kampány során. A jobb oldali éggömbön a színek a különböző megfigyelt területek közötti átfedést érzékeltetik. Minél lejjebb van egy szín egy jelmagyarázatban, annál hosszabb egy befüggő adatsort kapunk az adott színel jelölt területről (NASA, TESS) (forrás: <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/teess/operations.html>).



Az elmúlt huszonnégy évben felfedezett több mint négyezer exobolygó – tömege és bolygórendszerén belüli helyzete szerint is – elképesztően sokféle. A legnagyobb ismert tömegű exobolygó körülbelül 82 Jupiter-tömegű, míg a legkisebb a Föld tömegének hét tizedrészét sem éri el. A legrövidebb keringési periódusú bolygó 40 perc alatt kerüli meg csillagát, míg van olyan is, aminek 2000 év szükséges egy keringéshez.

Ismerünk forró, Jupiter-szerű gázóriásokat, amelyek annyira közel keringenek a csillagukhoz, hogy felszínük több ezer kelvinre felhevül, csillaguktól távol keringő, Neptunuszhoz hasonló jeges bolygókat, és a Földhöz hasonló kőzetbolygókat is, amelyek akár a miénkhez hasonló életnek is otthont adhatnak.

Az exobolygókkal kapcsolatos eredményekhez magyar kutatók is hozzájárultak. A *Bakos Gáspár* által vezetett HATNet (Hungarian Automated Telescope Network) projekt egy automata távcsövekből álló hálózat, amely tranzitmódszerrel keres exobolygókat. A HATNet a mai napig 63 bolygót fedezett fel.

A TRAPPIST-1 egy hét bolygóból álló rendszer, amelyet a CSFK Csillagászati Intézet kutatói is vizsgálnak. A magyar kutatók témái fedik még az exobolygók körül keringő lehetséges holdakat (exoholdak) és az M színképosztályú törpecsillagokat, amelyek körül a bolygók keresése a jövő évtized űrtávcsöveinek egyik kiemelt feladata lesz (a TRAPPIST-1 is M színképosztályú törpecsillag).

Jelenleg 2500 exobolygó-felfedezés vár megerősítésre. A tervek szerint 2019 végén indítják az Európai Űrügynökség exobolygó-kutató CHEOPS (Characterising Exoplanets Satellite) űrtávcsövét, amit 2026-ban a PLATO (Planetary Transits and Oscillations of Stars), 2028-ban pedig az ARIEL (Atmospheric Remote-sensing Infrared Exoplanet Large-survey) űrtávcsövek követnek majd. Az előreláthatóan 2021-ben induló James Webb űrtávcső egyik célja az exobolygók légkörének kutatása lesz spektroszkópia segítségével.

Az első exohold felfedezése szintén néhány éven belül várható (az ilyen holdak felfedezésének a lehetőségével *Simon Attila* foglalkozott a *Fizikai Szemle* 2012/7–8. számában).

Egy ennyire fiatal tudományágtól már a jelenlegi ismereteink is kimagasló eredmények, a tervezett kutatásokat látva pedig az exobolygókkal és idegen

naprendszerekkel kapcsolatos tudásunk további jelentős bővülésére és akár újabb vaskos meglepetésekre is számíthatunk.

Az exobolygók kutatásáról szemléletes összefoglalást ad a <https://exoplanets.nasa.gov>, az összes ismert exobolygót tartalmazó archívum a <http://exoplanet.eu> linken érhető el.

INNOVÁCIÓ ÉS A 60 ÉVES BUDAPESTI KUTATÓREAKTOR

Rosta László,¹ Bajnok Katalin,¹ Baranyai Rózsa,² Belgya Tamás,² Bottyán László,² Fábíán Margit,¹ Füzi János,¹ Kis Zoltán,² Len Adél,² Szentmiklósi László²

¹Budapesti Neutron Centrum, Wigner Fizikai Kutatóközpont

²Budapesti Neutron Centrum, Energiatudományi Kutatóközpont

Az MTA csillebérci kampuszán lévő Budapesti Kutatóreaktor idén ünnepelte 60 éves fennállását – először 1959. március 25-én kezdte meg működését. Ez egy kiemelkedő jelentőségű mérföldkő volt a magyar tudomány és technológia fejlődésében: a Budapesti Kutatóreaktor (BKR) folyamatosan megújuló és bővülő műszerparkja azóta is a legnagyobb, jelentős számú felhasználót kiszolgáló kutatási infrastruktúra hazánkban, sőt a közép-európai régióban is. A BKR megbízható üzemelésével meghatározó szerepet játszik az európai neutronkutatói közösség életében is, és az elkövetkező évtizedben ez még hangsúlyosabb lesz, hiszen egyre több európai ország dönt úgy, hogy hasonló típusú kutatóreaktorait bezárja. Jelenleg mintegy 200 hazai és – két éves átlagban – körül-

belül ugyanannyi külföldi kutató használja a neutronos módszereket, munkájukhoz a jövőben is a BKR által biztosított neutronok szolgáltatják a kísérleti háttérrel, amihez a reaktor élettartamának hosszabbítását tervezik.

Az 1959-ben indított új létesítmény akkor számos újdonságértékű, különféle fizikai jelenségek kutatásával kapcsolatos tevékenységet mozdított elő, különösen a neutronfizika, reaktorfizika, szilárdtestfizika, egészségügy, valamint a nukleáris kémia és sugárvédelem terén. Ezen kívül lehetővé tette Magyarország számára új nukleáris eszközök tervezését, előállítását, valamint az izotópgyártás beindítását. Az alapkutatások mellett az innováció és technológiatranszfer, valamint a kereskedelmi hasznosítás is mindig komoly hangsúlyt kapott a BKR-nél végzett tevékenységek során.

A reaktor jelenlegi formájában (10 MW teljesítmény, hidegforrás és neutronvezető rendszer, 16 felhasználói berendezés) a legutóbbi átfogó átalakítást (1986–92) követően 1993-ban kezdte meg működését egy 30 évre szóló üzemidő-engedéllyel. Ezzel egy időben alakult meg a Budapesti Neutron Centrum (BNC) [1], amely a neutronos mérőállomásokat üzemeltető laboratóriumok konzorciumaként működik azzal a céllal, hogy összehangolja a reaktor kutatási célú hasznosítását, ehhez biztosítsa a tudományos és műszeres háttérrel, így lehetővé téve a hozzáférést a mérőberendezésekhez a hazai és nemzetközi neutronfelhasználó közösség számára. Ugyancsak a BNC adja a keretet a kísérleti javaslatok befogadására és szakmai kiválóságának biztosítására a nemzetközi bizottság bírálati rendszerén keresztül. Így a neutronokkal történő kutatás vált a reaktor hasznosításának fő profiljává. A BNC tagja az európai neutronközpontok hálózatának és konzorciumi partner az EU keretprogramjainak számos projektjében is. Kulcsfontosságú tevékenység a jövőbeli tudományos szakértők képzése is. Magyar és külföldi egyetemekkel együttműködve hallgatókat fogad la-

Az írásban szereplő eredmények a Budapesti Kutatóreaktor több évtizedes sikeres innovációs tevékenységét tükrözik – ezért a munkáért nagyon sok korábban, illetve jelenleg is itt dolgozó kollégát illeti köszönet. Az alábbi fénykép a reaktor vezérlőjében készült 2018-ban és a reaktorüzemben, valamint a kísérleti állomásokat üzemeltető laboratóriumokban dolgozó mintegy 100 fős kollektíva akkor jelen lévő tagjait mutatja.

Az eredmények számos hazai és nemzetközi projekthez is köthetők, amelyek a finanszírozáshoz jelentősen hozzájárultak, itt a jelenleg is futó SINE 2020 (EU H2020 Grant No. 654000), a V4-Korea RADCON (NKFIH NN17 127102), az NKFIH K17 124068 és a CAK (NVKP_16-1-2016-0014), BrightnESS-2 (EU H2020 Grant No. 823867) projekteknek nyilvánítunk köszönetet.



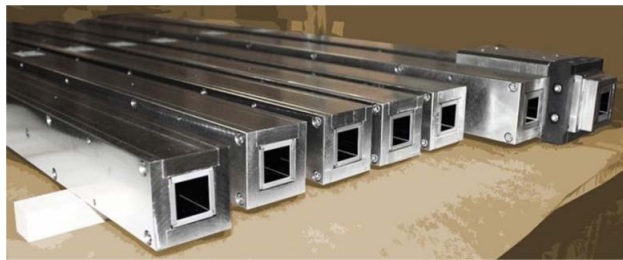
boratóriumi gyakorlatokra, hogy a diákok nukleáris alapú technikákat tanulhassanak. Fiatal kutatók képzésének, illetve új felhasználók figyelmének felkeltése céljából a BNC rendszeresen megszervezi a Közép-Európai Neutronszórás Iskolát (Central European Training School, CETS).

Innováció

A neutronok – mint különleges tulajdonságokkal rendelkező részecskék – fizikai természetéből fakadóan a neutronkutatás interdiszciplináris jellegű. Ezért a Budapesti Kutatóreaktor – az eredetileg és alapvetően fizikai alapkutatásokra megépített nagyberendezés – egyre inkább nyitottá vált a más tudományágak felől érkező igényekre, valamint az ipari felhasználás, innovációs és technológiatranszfer lehetőségeire. A reaktor hatvan éves történetét áttekintve alább példákat mutatunk be a legjelentősebb eredményekből, amelyek jól szemléltetik az itt folyó szerteágazó innovációs tevékenységet. Radioizotópok előállítása, nukleáris műszerek fejlesztése és gyártása, neutronnyalábokkal végezhető anyagvizsgálatok, technológiafejlesztési, minőségellenőrzési alkalmazása, vagy besugárzással végezhető anyagmódosítás kereskedelmi célokra – mind a reaktor komplex és multidiszciplináris hasznosításának esetei.

Izotópgyártás

A neutronnal besugárzott anyagok más elemekké vagy radioaktív izotóppokká alakulhatnak. Néhány ilyen radioaktív terméket a diagnosztikában és terápiában használnak fel. A radioizotópok előállítása a Budapesti Kutatóreaktorban már az 1960-as években elkezdődött. A fejlett technológiának hála az itt előállított termékek minősége felülmúlta az abban az időben a Szovjetunióból vagy az Egyesült Királyságból importáltakét. A hazai izotópgyártás és -forgalmazás fő képviselői az Izotóp Intézet Kft. és az Izinta Kft. Az elmúlt évtizedekben a következő izotópok előállítása és kereskedelme volt leginkább jellemző: ^{32}P , ^{35}S , ^{90}Y , ^{99}Mo , ^{125}I , ^{131}I , ^{153}Sm , ^{166}Ho és ^{188}W . A felsoroltak közül például ^{32}P radioterápiás eszközként, illetve biomolekuláris nyomjelzőként használható; az ^{35}S egy alapvető radioizotóp, amely a ként tartalmazó aminosav-készítmények molekuláris jelölésére szolgál. Az ^{90}Y -et is humánterápiás céllal hasznosítják, itt a béta-sugárzás kibocsátása a jellemző, ami mintegy 3,5 mm-es környezetben nyelődik el és tipikusan az ilyen méretű tumorsejtek elpusztításában hatékony. A humán diagnosztikában és terápiában egyre nagyobb szerepet kapnak a radiológiai eljárások, mivel a betegek nagy többsége inkább a besugárzásos kezeléseket, mint a sebészeti beavatkozásokat részesíti előnyben. A 90-es évekre a budapesti reaktorban előállított orvosi izotópok évente félmillió hazai pácienshez jutottak el, vagyis a magyarországi lakosság 5%-a profitált a hazai izotóptermeleésből.



1. ábra. A Mirrotron Kft. által szabadalmaztatott és forgalmazott „vasüveg szendvicsszerkezetű” neutronvezető, amelyben az üvegcső belső falát mintegy 1000 Ni és Ti rétegből álló szupertükrör borítja.

Nukleárisműszer-fejlesztés

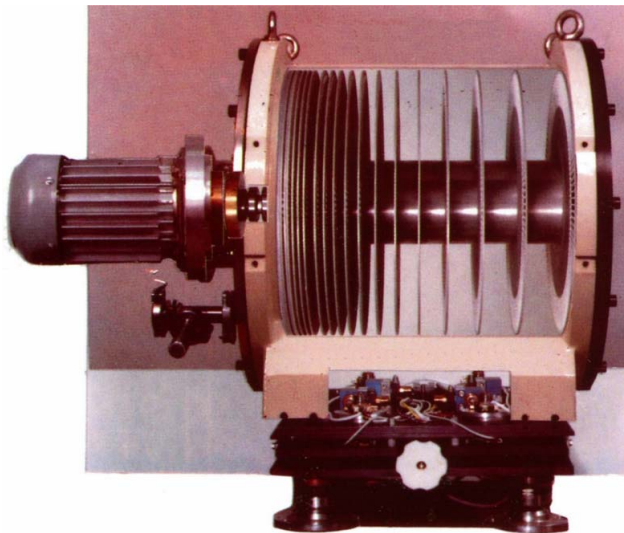
A neutronkutatás területén az egyik legnagyobb hatású felfedezés a szupertükrö-elv (supermirror, SM) és -eszközök felismerése, illetve megalkotása volt. Ez a korszakos innováció Mezei Ferenc nevéhez fűződik, 1974-ben a KFKI-ban készültek és a BKR-nél lettek bevizsgálva az első szupertükrök [2]. Az ipari méretű gyártást lehetővé tevő, csúcsmínőségű, vékonyréteg-technológia az 1990-es évek közepén vált elérhetővé. Azóta a neutronvezetőként és polarizáló optikai eszközként használt szupertükrök világszerte elterjedtek, a neutronkutató berendezések szerves részévé váltak (1. és 2. ábra). A Mirrotron Kft.-t spin-off vállalkozásként a Budapesti Kutatóreaktorhoz közeli fizikusok és mérnökök alapították szupertükrök előállításának céljából. Mára a szupertükrök piaca évi több milliós nagyságrendű, ebből a Mirrotron részesedése körülbelül 25%. Az alapvetően tudományos elgondolásból született elv, illetve kifejlesztett eszköz az innovatív technológiatranszfer révén ipari terméké, profittermelő tevékenységgé fejlődött. Ennek elismeréseképpen Mezei Ferenc és a Mirrotron Kft. 2019. március 28-án Innovációs Díj kitüntetésben részesült.

A műszerfejlesztés egy másik sikertörténete a mechanikus neutronsebesség-szelektorok fejlesztése, gyártásba vitele és üzleti forgalmazása. Ez a nagyfordulatú eszköz többféle spektrométerben kulcsfontosságú komponensként a neutronok monokromatizálására használatos. Az 1986-ban megépített prototípus, amely a soktárcsás eljárás alapul, mind a fizikai elvet, mind a mechanikai és vezérléstechnikai koncepcióját tekintve jelentős innovációt képviselt [3]. A szelektort (3. ábra) nemzetközi szabadalommal védtek le és az eszközt megalkotó fizikusokat és mérnököket 1987-ben Jánossy-díjjal jutalmazták.

1993 óta például ilyen szelektor van használat-



2. ábra. A Mirrotron Kft. által készített neutronvezető az Oxford melletti ISIS neutronkutató központban.



3. ábra. A soktárcsás neutronsebesség-szelektor felépítése.

ban a BKR kisszögű szórásvizsgáló (SANS) berendezésében, amely a legnépszerűbb kísérleti állomás – így a szelektor sok száz sikeres kísérlet megvalósításához járult hozzá. A szelektort – annak csúcstechnológiájú mechanikus rotorját és vezérlő elektronikáját – kereskedelmi terméké fejlesztették, mára több mint 40 hasonló berendezést gyártottak és installáltak szerte a világ neutronlaboratóriumában (4. ábra).

Például a National Institute of Standards and Technology (Washington DC, USA) 3 szelektort vásárolt az Exxon olajcég által finanszírozott SANS berendezésekhez, amikor a 90-es években egy szigorúan titkosított projekt keretében SANS vizsgálatokat végeztek, hogy felkutassák az Egyesült Államok palaolaj-tartalékait és kifejlesszék a kinyerésükhöz szükséges technológiát. Ez a palaolaj-kutatás a neutronos technológiatranszfer egyik legnagyobb sikertörténete, amely

4. ábra. Soktárcsás neutronsebesség-szelektor a pekingi kutatóreaktor SANS berendezésénél.



nek a magyar szelektorok is részesei voltak. A Mirrotron Kft. jelenleg is gyárt és értékesít ilyen szelektorokat, miközben a BKR is minden értékesítés hasznélvezője, hiszen a neutronos bevizsgálás, ami bevétel a reaktornak, a minőségbiztosítás része.

Neutronszórás autóiipari alkalmazása

Ismeretes, hogy a gépjárműipar új technológiai alkalmazásainak legnagyobb része a versenyautók fejlesztéséből származik. Az alábbiakban egy rövid példát mutatunk be egy Forma-1-es autón elvégzett neutronvizsgálatra. A tanulmány oka az volt, hogy a versenyszabályok megváltoztatása miatt meg kellett növelni a motor élettartamát, ugyanis előírták, hogy a versenyautóknak motorcsere nélkül legalább két versenyciklust (például egy edzőfutam és a verseny) kell teljesíteniük. A motor élettartamát a rendkívüli igénybevételnek (17 000 rpm, 900 LE) kitett, minimális tömegűre munkált dugattyúk (5. ábra) határozták meg, amelyeknél – feltételezhetően – a felső peremen keletkezett repedések okozták a dugattyú rövid használat utáni megszorulását. A feladat tehát a repedések kialakulásának felderítése, a probléma kezelésére irányuló javaslat megtétele volt.

A kísérletekben kisszögű neutronszórással tanulmányoztuk a széleskörűen használt $\text{AlSi}_2\text{CuNiMg}$ ötvözetből készült valódi dugattyúkban előforduló fém-

5. ábra. A Ferrari Forma-1 versenyautó és motorjának dugattyúja.



szerkezeti kiválások mikrostrukturális kialakulását. A vizsgálatot a világbajnok Ferrari csapat 3000 cm³-es, hathengeres motorjainak új és használt dugattyúkoronáin végeztük. A SANS görbéket mindkét dugattyú 5-5 különböző pontján (a lehetséges repedési gócpontokon), 10 mm átmérőjű nyalábbal mértük meg. Az új minta központi részein izotróp szórás volt megfigyelhető, a dugattyú oldalsó részein azonban a szórás anizotróppá vált, jelezve a gyártás által előidézett textúra jelenlétét. Továbbá, az Al-Mg-Si ötvözetek olyan mechanikai jellemzőkkel bírnak, amelyek igen érzékenyek a hőkezelésekre. A működési hőmérséklet általában nagyon közel van az előregedési hőmérséklethez és a korona egyes részein meg is haladja azt. Az öregedés gyakorlatilag azt jelenti, hogy a többkomponensű ötvözetben egyes alkotóelemek elkülönülnek („kiválnak”) ezáltal gyengítve az eredetileg homogén ötvözet megfelelő mechanikai tulajdonságait. Tipikusan a réz szerepel precipitációs göcképzőként az anyagokban [4].

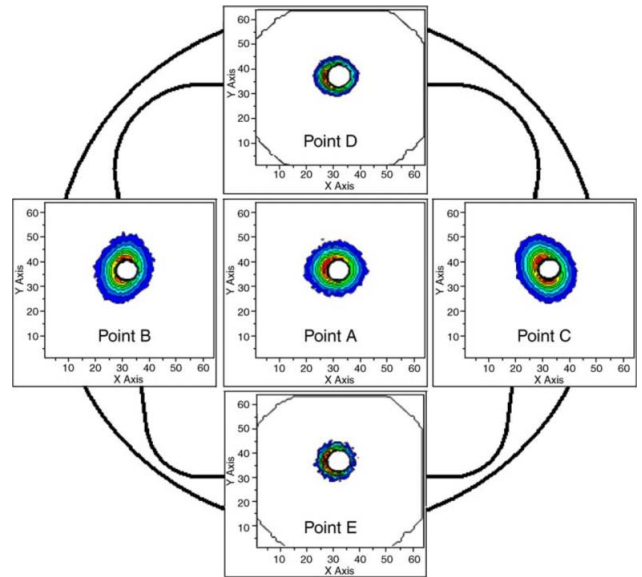
Összehasonlítottuk a mechanikai tulajdonságok öregítési kezeléssel előidézett változásait a kiválások szerkezetében bekövetkezett változásokkal és megállapítottuk, hogy 4–20 nanométeres kiterjedésű, Cuban feldúsult precipitátumok keletkeznek (6. ábra). Kimutatható volt, hogy a használat korai stádiumban keletkezett kiválások képezik a mikrorepedések gócait és ezek terjedése a kiválás méretétől függően változik; leggyorsabban a 10 nm körüli kiválások/repedések terjednek. Javasoltuk a dugattyúk gyártás-közi hőkezelését, ami a kiválások homogenizálásához vezethet, így a mikrorepedések terjedése is lelassul. Végeredményben a SANS eredmények elősegítették a gyártási technológia optimalizálását, és hozzájárultak a motor élettartamának jelentős növeléséhez, sőt a teljesítmény csekély növelését is lehetővé tették, ami viszont döntően hozzájárult a Ferrari csapat akkori kiemelkedő győzelmi sorozatához.

Csapágyak kenési problémájának feltárása

Egy elhasznált és egy új kétsoros golyóscsapágy összehasonlító vizsgálatában [5] a neutronok segítségével feltárhattuk nemcsak a konkrét hibát, a repedéseket és töréseket, hanem az okát is (*root cause analysis*, RCA).

Neutrontomográfia módszerével ugyanis (a röntgentomográfiával ellentétben) a fémes részek mellett a szerves anyagok is láthatóvá tehetők. Ezzel a csapágy megbontása nélkül lehetett kimutatni, hogy a tapasztalt kopás és törés kenési elégtelenségre vezethető vissza. Figyeljük meg a 7. ábra jobb alsó paneljén, hogy az alsó tárgyból a fehéren látszó kenőanyag szinte teljesen hiányzik, és számos repedést fedezhetünk fel.

Amennyiben a mintadarabot szétszedés után további vizsgálatnak (például neutrodiffrakció) vetjük alá, az első lépésben végzett neutrontomográfia egyértelműen rögzíti a tárgy geometriáját és a későbbiekben segíti a szerkezeti információ értelmezését, kontextusba helyezését.

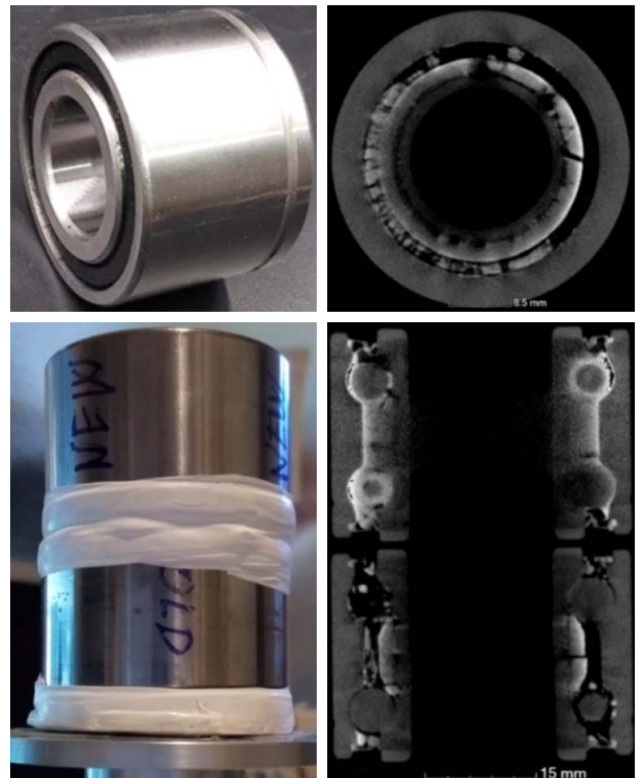


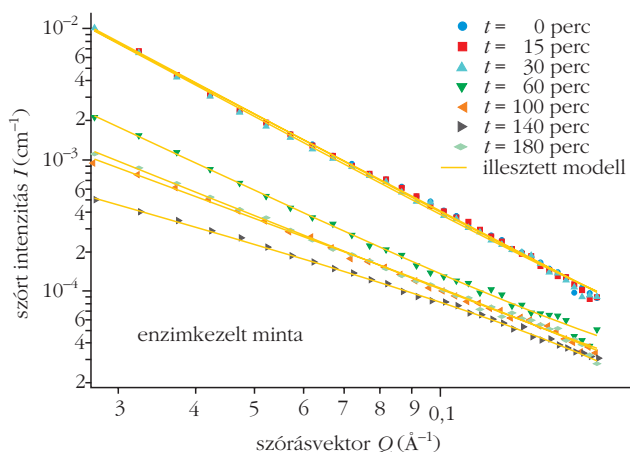
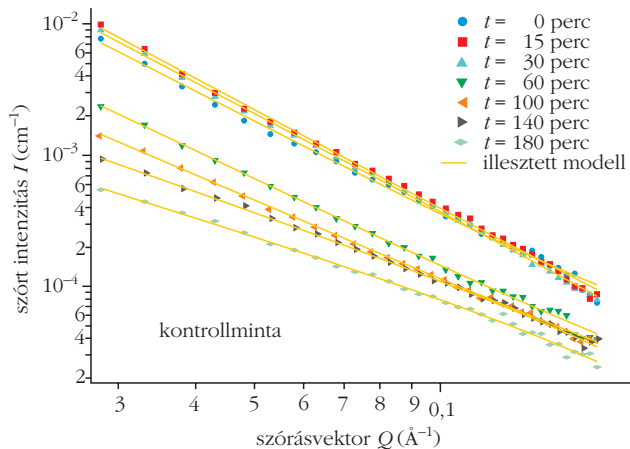
6. ábra. A dugattyú felülnézeti képe 2D SANS intenzitáseloszlás-spektrumokkal.

Élelmiszerminőség-javítás

Neutronnyaláb-kísérletekkel joghurtokban vizsgáltuk a fehérjemicellákra gyakorolt enzimhatást. A mikrobiális transzglutamináz enzimet (mTG) az élelmiszeripar azon területein használhatják állománymódosítóként, ahol a mátrixban valamilyen fehérje található – ilyenek például a tej- vagy a húsipari ter-

7. ábra. Egy új és egy elhasznált kétsoros golyóscsapágy neutrontomogramja. A jobb alsó panelen észrevehető, hogy az alsó mintából a fehéren látszó kenőanyag szinte teljesen hiányzik.



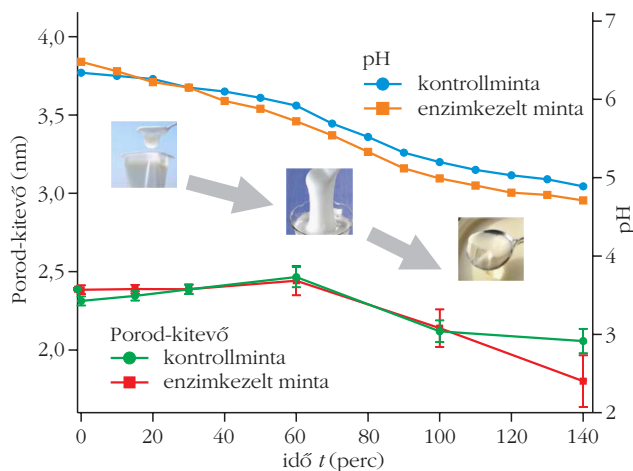


8. ábra. A joghurt erjedésének folyamatából vett, kontroll- és enzimekelt minták kisszögű szórásgörbéi. A folyamatos vonal az illesztett modellgörbét (a Porod-függvényt) jelenti.

mékek. Az enzim a fehérjékben lévő glutamin és lizin aminosavak között hoz létre keresztkötéseket és így polimerizált fehérjemolekulák keletkeznek. Ennek következtében a kialakuló fehérjeháló vissza tudja tartani a vizet, savófehérjéket, valamint a zsírcseppecskéket. A mikrobiális transzzglutamináz enzim egyik legjobb szubsztrátja a tejfehérjék 80%-át alkotó kazeinfehérje.

Az enzim hatására a kazeinmicellák aggregálódnak és olyan komplex kazeinmátrix jön létre, amely joghurtok esetén nagyobb gélzilárdságot és kevesebb savóeresztést eredményez, a sajtgyártásban pedig a savófehérjék beépítésével növeli a kihozatalet és emeli a sajt tápértékét. Kutatásaink a fermentáció kazein-

10. ábra. MirroBor márkanevű rugalmas neutronvédő anyag.



9. ábra. A transzzglutamináz enzim hatása a joghurt erjedési folyamatára, a térhálós szerkezet az enzimekelt mintában hamarabb kialakul, ami a Porod-kitevő változásában látható.

micellára gyakorolt változásának nyomon követése, az enzim hozzáadásával és anélkül; amelyhez a kisszögű neutronszórás vizsgálat különleges lehetőséget adott. A méréseket a BKR Yellow Submarine berendezésén végeztük, 43 °C hőmérsékleten, amely optimális hőmérséklet a joghurtkulturákhoz. Az enzimadagolt minták esetében a megfelelő mérési pontok előtt 70 °C-on inaktívtuk az enzimet, így egészen a folyamat végéig követni tudtuk a mikrobiális transzzglutamináz enzim adott időpillanatokbeli hatását a tejsavas erjesztésre.

A 8. ábrán az erjedés folyamatából vett, kontroll- és enzimekelt minták szórásgörbéi láthatók. A mért értékek illesztéséből megkaptuk az úgynevezett Porod-kitevőt, amely az enzim hatására történő szerkezetváltozást jellemzi. A kisebb kitevő kompaktabb szerkezetre utal, az 1 és 2 közötti kitevő pedig a térhálós szerkezet jellemzője.

A 9. ábrán látható, hogy az enzimekelt minta esetében a térhálós szerkezet hamarabb kialakul, mint a kontrollminta esetében, bár a pH-mérések alapján a joghurtok hasonló ütemben savanyodtak. A joghurt alvadási folyamata során fellépő térszerkezeti változások neutronszintű megértése úttörő eredményt jelenthet az élelmiszertudomány területén, és egyúttal választ kaphatunk arra is, hogy a folyamat során az mTG enzim miként módosítja a kialakuló gél szerkezetet [6].

Új sugárvédelmi anyag fejlesztése

2012-ben egy új, neutronsugárzás elleni védelmet nyújtó anyagot fedeztünk fel. Egy nagyon hatékony, bór-tartalmú rugalmas műanyag neutronvédő anyagot fejlesztettünk ki (10. ábra), amely végső soron jobbnak bizonyult, mint bármely más, hasonló anyag a piacon.

A technológiatranszfernek hála a Mirrotron Kft. ezt is kereskedelmi termékévé fejlesztette (MirroBor márkanev alatt le is védette), amely mostanra a világpiacon a legkeresettebb lett a hasonló termékek közül [7].



11. ábra. Különböző ékszerészeti formára csiszolt kék topáz kristályok a besugárzás után.

Kereskedelmi célú besugárzás

A gyorsneutron-besugárzás különleges alkalmazási területe az ékszerminőségű drágakövek előállítására. Ez a tevékenység ugyan nem a legrelevánsabb a tudomány számára, mégis ez a reaktor egyik legjövedelmezőbb kereskedelmi tevékenysége, amely 2002 óta folyamatosan zajlik.

A neutronbesugárzás defekteket okoz a topáz kristályszerkezetében, amelyek színpontként jelennek meg (11. ábra). Ezáltal a színtelen, csiszolt kövek kék színűvé változnak, így 100-szorosára növelik az ékszer értékét. Ezt a színezési eljárást a BKR-ben fejlesztették ki, és az elmúlt 15 évben több 10 tonna topázkristályt sugároztak be, ezzel biztosítva jelentős bevételt a reaktornak.

Az innovációs tevékenység társadalmi hatása

Költséghatékonyság

Ahogy alább láthatjuk majd, a reaktorban rejlő lehetőségek kihasználása – a tudományos eredmények mellett – gazdaságilag is jövedelmezőnek bizonyult. Egyfelől a reaktor besugárzásos és neutronnyaláb-technológiák általi alkalmazása biztosít különféle termékeket és szolgáltatásokat a társadalom, ipar, egészségügy, kereskedelem és oktatás szektorainak, aminek jelentős és közvetlen gazdasági hatása van. Másrészt a nukleáris/neutron kutatási szektor tudományos módszereinek és eszközeinek fejlődése indirekt gazdasági hatással is jár. A tényleges gazdasági hozam számszerű megítélése bonyolult kérdés, viszont megállapítható, hogy az izotópgyártás, csakúgy, mint a nukleáris-energia-szektor technikai és biztonsági támogatása százmilliárd forint nagyságrendű hozzájárulást jelentenek az ökoszisztémához. A műszeripari hozadékok viszont meglehetősen pontossággal meg lehet becsülni: például a reaktor neutronfizikai eszköztárának piaci értéke – a 16 mérőállomás + a hidegforrás – mintegy 20 millió euro áron került telepítésre, beleértve a

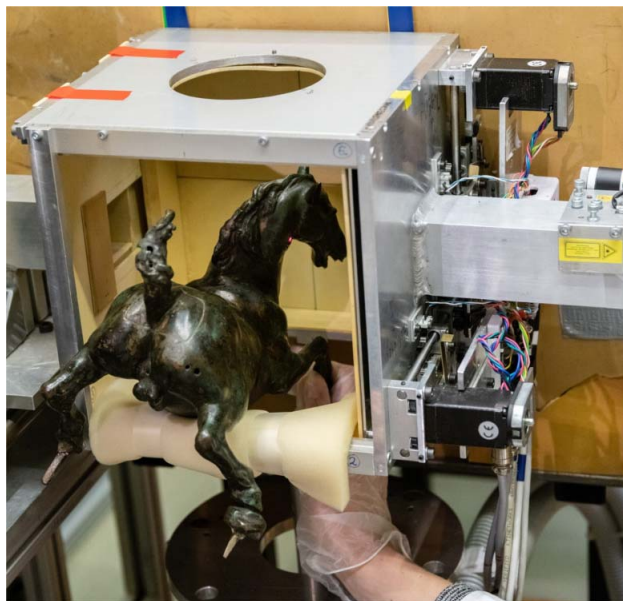
munka- és eszköz költségeket, míg a piaci értékük körülbelül 42 millió euro lenne. A technológiatranszfer révén a spin-off kis- és középvállalkozások neutronberendezés-eladásai az elmúlt 20 évben 45 millió euro exportárbevételt hoztak (összehasonlításként: a reaktor jelenlegi éves működése 2,4 millió eurónyi költséget tesz ki).

Kulturális örökség

Az egyik legérdekesebb társadalmi hatás a nemzeti kulturális örökséghez kapcsolódik: *Leonardo da Vinci* bronz lovasszobrának neutronos vizsgálata. A kis bronzfigura a Magyar Szépművészeti Múzeum 19. század előtti szoborgyűjteményének részét képezi. Sok rövid életű próbálkozással ellentétben, amelyek során szobrokat próbáltak Leonardónak tulajdonítani, a budapesti ló és lovasa (lásd a címlapon) alkotójának személye körül élénk eszmecsere bontakozott ki a művészettörténészek körében az elmúlt száz évben. Annak megfajtása céljából, hogy a szobor létrejöttére csak inspirációként hatottak-e Leonardó ötletei vagy a szobor a mester saját kezének munkája is lehet, 2017–18-ban átfogó neutronalapú vizsgálatokat végeztek a kis bronzszobron a Budapesti Neutron Centrumban (12. ábra). A 3-dimenziós neutrontomográfia kiváló minőségű, tizedmilliméter felbontású képeket (13. ábra) eredményezett a szobor belsejéről [8]. További képek a hátsó borítón találhatók.

A neutrontranszmissziós kísérletek az öntési anyag maradványait is megjelenítették, amelyek a tárgy belsejében maradtak a viaszveszejtési eljárás után. Ezen maradványok elemi összetételét prompt-gamma-spektroszkópiával határozták meg, míg a neutrodiffrakció bebizonyította, hogy a lovat és lovasát ugyanabból a bronzanyagból öntötték, csupán

12. ábra. A Szépművészeti Múzeum 2018 októberi újraindításának legfőbb látványosságát, az esetleg Leonardo-alkotta szobrot prompt-gamma aktivációs analitikai vizsgálatra készítik elő.





13. ábra. A szobor belsejének neutrontomográfiás leképezése.

az eljárás volt különböző. Ezek a komplex vizsgálatok sem szolgálták minden kétséget kizáró bizonyítékot arra, hogy ez maga a mester keze munkája, de a begyűjtött új argumentumok mindinkább ezt látszanak alátámasztani.

2018 októberében három évig tartó, átfogó felújítási munkálatok után a Szépművészeti Múzeum újra megnyitotta kapuit és a fő látványossággá a „Leonardo-szobor” időszakos kiállítása vált [9], amelynek keretében megtekinthetők voltak a windsori Royal Collectionból érkezett, a szobrokhoz készült tanulmányrajzai is. A neutronvizsgálatokat bemutató film¹ is szerves része volt a kiállításnak, amelyet 65 000 magyar és külföldi műzeumlátogató tekintett meg.

Oktatás, a nukleáris kultúra fenntartása

A nemzeti és közép-európai régió felhasználói közösség (körülbelül 500 szakember) tevékenységének népszerűsítése érdekében, illetve új felhasználók neutronos berendezésekhez való hozzáféréseinek támogatása céljából, a BNC immár 1992 óta rendszeresen nemzetközi konferenciákat, iskolákat, szakmai tréningeket szervez. A BNC jelenleg az úgynevezett bevezető jellegű neutroniskolák európai koordinátora, és így képzéseket szervez karrierjük elején lévő kutatóknak, nemcsak a CETS neutronszórás iskola keretében, hanem egyéb tudásközpontokban is Európán-szerre.

A BKR/BNC szívügyének tekinti a tudósok következő generációinak képzését. Magyar egyetemekkel (BME, ELTE, Pannon Egyetem, Pécsi Egyetem stb.) együttműködve a BNC hallgatókat fogad, akik nukleáris tudományok és technológiák tematikájú la-

¹ A Szépművészeti Múzeumtól kapott engedély alapján a *Fizikai Szemle* olvasói a <http://fizikaiszemle.hu/extra/leonardo> helyen megnézhetik a filmet.

boratóriumi gyakorlaton vehetnek részt. A Nemzetközi Atomenergia Ügynökséggel együttműködve a BNC ilyen témájú tanfolyamokat tart külföldi és hazai hallgatóknak. A reaktor kapui nyitva állnak a nagyközönség előtt is. A BNC szakértői tematikus előadásokat tartanak szerte az országban minden év november 3-a körül, a magyar tudomány napjának részeként, amelyet a Magyar Tudományos Akadémia szervez.

Jövőbeli tendenciák

A nukleáris kutatási infrastruktúra és különösen az európai neutronközpontok száma drasztikus változáson fog keresztül menni a következő évtizedben. Előszörban az extrém nagy berendezések fogják kielégíteni az egész kontinens neutronkutatási szükségleteit (például a Svédországban két milliárd eurós beruházással épülő csúcserendezés, az ESS – European Spallation Source), illetve a besugárzott anyagok tulajdonságainak vizsgálatát (Jules Horowitz Reactor, Cadarache, Franciaország) és a radioizotópok előállítását (High Flux Reactor, Petten, Hollandia). A BKR azon közepes méretű létesítmények egyike, amely a következő évtizedben valószínűleg tovább fog működni – a működési engedély 10 éves meghosszabbításának előkészítése folyamatban van. A reaktor tevékenységei döntő fontosságúak ebben az átmeneti időszakban, tehát a BKR szándékában áll továbbra is magas szintű szolgáltatásokat biztosítani a hazai és régióbeli felhasználók számára, akik így felkészülhetnek a vezető európai központok jövőbeli használatára. Továbbá, a reaktorfelhasználó közösség számára szintén fontos szempont, hogy a fokozódó tevékenység mellett, kielégítve az igényeket, a BKR biztosítsa a folyamatosságot és megalapozza egy nélkülözhetetlen, következő generációs hazai kísérleti bázis létesítését.

Irodalom

1. Budapesti Neutron Centrum, www.bnc.hu
2. Mezei, F.: Novel polarized neutron devices: Supermirror and spin component amplifier *Comm. Phys.* 1 (1976) 81–85.
3. Rosta, L.: Neutron Physical Properties of a Multidisc Velocity Selector. *Physica B* 156–157 (1989) 615–621.
4. Rogante, M., Lebedev, V. T., Nicolaie, F., Rétfalvi, R., Rosta, L.: SANS study of the precipitates microstructural evolution in Al 4032 car engine pistons. *Physica B* 358 (2005) 224–231.
5. Rogante, M., Rosta, L.: BNC Experimental proposal No. 687 (2017) és Kis Z., Szentmiklósi L.: BNC vizsgálati jelentés (2018).
6. Len A., Füzi J., Darnay L., Harmat P., Koncz K., Rosta L.: Nanostruktúra-vizsgálat kisszögű neutronszórással. *Fizikai Szemle*, 64/1 (2014) 9–13.
7. <http://mirrotron.com/en/products/radiation-shielding>
8. Szócs, M.: Megmértetve, avagy lehet-e a lovas Leonardo alkotása: A Szépművészeti Múzeum kisbronz Washingtonban. *Artmagazin* 4 (2009), 74–79. és Kis, Z., Bakonyi, E.: Neutron Tomography of the Budapest Horse and Rider. In Kárpáti, Z. (ed.): *Leonardo da Vinci & the Budapest Horse and Rider*. Budapest, Museum of Fine Arts (2018) ISBN: 978-615-5304-82-8, 191–201.
9. A szobor és a kiállítás honlapja: <http://leonardo.szepmuveszeti.hu/hu> és a megjelent írás a tomográfiás vizsgálatokról: <http://leonardo.szepmuveszeti.hu/hu/research/technical>

TILTOTT MAGREAKCIÓK («HIDEGFÚZIÓ»)

Kálmán Péter, Keszthelyi Tamás
BME, Fizikai Intézet

1989-ben jelent meg *M. Fleischmann* és *S. Pons* azóta hírhedtté vált közleménye, amelyben azt állították hogy LiOD nehésvízis oldatának palládiumkatód és platinaanód közötti elektrolízisekor magfizikai folyamatoknak tulajdonítható extra hőfejlődést észleltek [1]. Azóta ezt a „hidegfúzió”-nak nevezett jelenséget sokan vizsgálták. A kísérletek azonban megmagyarázhatatlan és sokszor reprodukálhatatlan jelenségeket szolgáltatnak, és elfogadható elméleti magyarázatot a szobahőmérséklet közelében lejátszódó atommagfúziós reakciókra eddig még senki nem adott. Ezért a tudományos közélet a jelenséget illetően erősen megosztott, a fizikusok jelentős része, elfogadható elméleti magyarázat híján, még a hidegfúzió létezésének lehetőségét is elutasítja.

Az elutasító magatartásnak három alapvető oka van. Az egyik, hogy a felszabaduló többletenergiát produkáló kísérletekben nem tudták kimutatni a magfizikai tudásunk alapján várt reakciótermékeket és nem tapasztaltak számottevő radioaktív sugárzást sem. A másik, hogy a kísérletek bizonytalanul reprodukálhatók, vagyis a jelenség hol van – hol nincs. (Ez tűnik a leginkább zavaró momentumnak, bár annak fényében, hogy elméleti útmutató hiányában a kísérletezők vaktában tapogatódnak, érthető.) A harmadik pedig, hogy magfizikai ismereteink alapján a részecskék között fellépő elektromos taszítás miatt a szobahőmérséklethez közeli, alacsony hőmérsékleten még kimutatható (mérhető) effektus sem várható. Ezt most bővebben (vázlatosan) kifejtjük.

Az azonos előjelű, z_1 és z_2 töltésszámú, töltött részecskék közötti magreakciók hatáskeresztmetszete [2]:

$$\sigma(\varepsilon) = S(\varepsilon) \frac{\exp[-2\pi\eta_{12}(\varepsilon)]}{\varepsilon}, \quad (1)$$

ahol $S(\varepsilon)$ az asztrofizikai S -faktor, ε a mozgási energia a tömegközépponti koordináta-rendszerben és $\eta_{12}(\varepsilon)$ a Sommerfeld-paraméter. (σ egy felületdimenziójú mennyiség. $N\sigma\Phi$ az időegységként végbemennő magreakciók száma, a hozam, ahol N a bombázott céltárgyrészek száma és Φ a bombázó részek fluxusa, vagyis a felületegységenként egységnyi idő alatt beeső részek száma.)

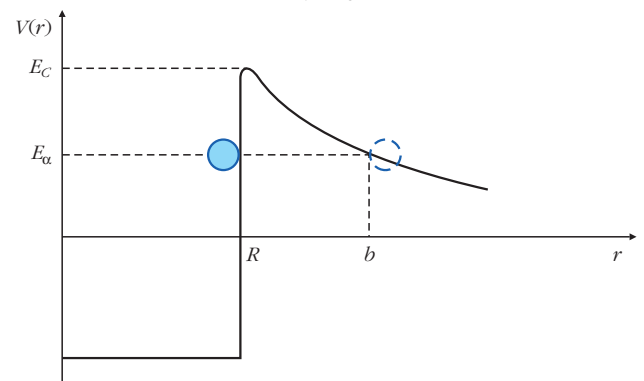
Ha a reakció energiája $\Delta > 0$ (Δ a kezdeti és a végállapot nyugalmi energiáinak a különbsége), akkor az energiamegmaradás teljesül és a spontán folyamat (magreakció) megengedett. Azonos töltésű részecskék között azonban $\varepsilon \rightarrow 0$ esetén a folyamat tiltottá válik, mivel ekkor $\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \sigma(\varepsilon) = 0$, ugyanis $\varepsilon \rightarrow 0$ esetén $S(\varepsilon)$ energiafüggése az

$$\frac{\exp[-2\pi\eta_{12}(\varepsilon)]}{\varepsilon}$$

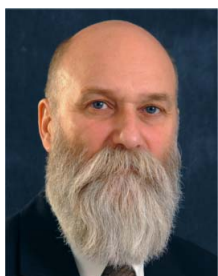
mellett elhanyagolható. Szobahőmérsékleti ε energiákon σ értéke oly mértékben lecsökken, hogy a vele arányos hozam kísérletileg megfigyelhetetlenné válik (a „hidegfúzió” kritikai bírálatát illetően lásd [3]). (Ha a magreakcióba lépő részek egyike semleges, mint például a neutronbefogási folyamatok esetén, akkor a hatáskeresztmetszet $\varepsilon \rightarrow 0$ estén véges marad, lásd például a termikusneutron-befogási hatáske- resztmetszeteket [4].)

A matematikailag a $\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \sigma(\varepsilon) = 0$ összefüggés miatti tiltottá válás fizikai oka a Coulomb-taszítás. Az 1. ábrán töltött (például alfa) részecske által érzett nukleáris és Coulomb-potenciálok összege látható. R az atommag sugara, E_α a töltött (például alfa) részecske energiája, E_C a Coulomb-gát magassága. Az $r < R$

1. ábra. Töltött (például alfa) részecske által érzett nukleáris és Coulomb-potenciálok összege. R az atommag sugara, E_α a töltött (például alfa) részecske energiája, E_C a Coulomb-gát magassága.



Kálmán Péter, az MTA doktora, nyugalmazott, a BME-n habilitált egyetemi docens az ELTE-n szerzett fizikusi diplomát. Főbb kutatási területei: a sugárzás és anyag kölcsönhatásának szemiklasszikus elmélete, ionkristályok mechanikai tulajdonságai, elektrooptikai és piroelektromos anyagok alkalmazásai, fizikai folyamatok intenzív lézerterekben és plazmakörnyezetben, valamint alacsonyenergiás magfizikai folyamatok.



Keszthelyi Tamás, PhD a fizikai tudomány kandidátusa, nyugalmazott egyetemi docens, a BME TTK volt dékánja, a Magyar Köztársasági Érdemrend Lovagkeresztjének birtokosa az ELTE-n szerzett fizikusi diplomát. Főbb kutatási területei: ionkristályok mechanikai tulajdonságai, fizikai folyamatok intenzív lézerterekben és plazmakörnyezetben, valamint alacsonyenergiás magfizikai folyamatok.

esetén a rövid hatótávolságú magerők keltette vonzó potenciál dominál – ez a potenciálgödör – az $r > R$ esetén pedig az azonos töltésű részecskék közötti taszító Coulomb-potenciál a domináns.

A magreakció hatékony létrejöttének – klasszikusan gondolkozva – az a feltétele, hogy az ütköző részecskék a közöttük lévő Coulomb-taszítás ellenére $r \lesssim R$ közelségbe kerüljenek egymáshoz azért, hogy a közöttük lévő potenciál vonzó része – amit az erős kölcsönhatás produkál – is érvényesülhessen. Vagyis a részecskéknek meg kell mászniuk az E_C magasságú potenciálhegyet és ehhez mozgási energia szükséges. (Mechanikai analógia: az ábrán jobbról gurítunk be egy golyót. Ez csak akkor tud E_C magasságig felmenni, ha kinetikus energiája kellően nagy.) A kvantummechanika szerint azonban a részecskének nem kell teljesen megmásznia a potenciálhegyet, elég csak $r = b$ távolságig közelítenie és ekkor az alagúteffektus segítségével a potenciálgáton mintegy átfúrva magát képes megjelenni az $r \lesssim R$ tartományban. Egy adott b távolsághoz meghatározott mozgási energia szükséges, ami az alagúton történő átjutás valószínűségét határozza meg. Ezt a Coulomb-faktor [4]

$$F_{Cb} = \frac{2\pi\eta_{12}}{\exp(2\pi\eta_{12}) - 1} \quad (2)$$

adja meg, ahol

$$\eta_{12} = z_1 z_2 \alpha_f \sqrt{\frac{\mu c^2}{2\varepsilon}} \quad (3)$$

z_1 és z_2 az ütköző részecskék töltésszáma, $\alpha_f = 1/137$ a finomszerkezeti állandó, μ az ütköző részek redukált tömege

$$\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2},$$

ahol m_1 és m_2 az ütköző részecskék nyugalmi tömegei, c a fény vákuumbeli sebessége. A magreakció hozama (másodpercenkénti eseményszáma) arányos F_{Cb} -bal. $\varepsilon \rightarrow 0$ esetén pedig $F_{Cb} \rightarrow 0$, vagyis a hozam eltűnik.

Mindezek ellenére – a probléma energiatermeléssel való szoros kapcsolata miatt – 1989 után egy új, sokak által problematikusnak tartott kutatási terület fejlődött ki, amelyet napjainkban alacsonyenergiás magreakcióknak (low-energy nuclear reaction után: LENR) neveznek. Tehát, habár az állítások alapvetően ellentmondanak (1)-nek, sok laboratóriumban folyik LENR-kutatás – egy 2017-es felmérés alapján (Anthropocene Inst., USA) a világban akkor 114 intézményben foglalkoztak publikusan LENR-kutatással – és nagy számban jelennek meg ilyen témájú publikációk. A téma művelői évente rendszeresen konferenciát tartanak, az idei (az ICCF-22) 2019. szeptember 8–13. az olaszországi Assisiben volt. Az alacsonyenergiás magreakciókkal (LENR) kapcsolatos legtöbb információ a LENR-CANR.org internetes felületen érhető el. *Jour-*

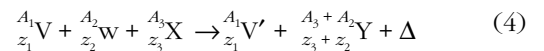
nal of Condensed Matter Nuclear Science – Experiments and Methods in Cold Fusion címmel 2007-ben kifejezetten e témában indítottak folyóiratot, amely 2019 augusztusában már a 29. köteténél tartott. A témában az összefoglaló cikkek [5, 6] mellett több könyv is (például [7]) született.

Az alacsonyenergiás magreakciók elméleti lehetősége: általános állítás és példák

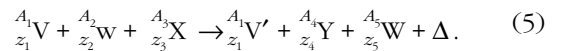
Tiltott magreakciók esetén az atomfizikai tiltott elektromágneses átmenetek, mint például a hidrogén $2s_{1/2} - 1s_{1/2}$ átmenete esetében szerzett tapasztalataink szolgálhatnak útmutatóul. Ilyenkor a perturbációszámítás másodrendjében kaphatjuk meg a megfelelő eredményeket. (A további gondolatmenet és az eredmények részleteit illetően lásd [8].)

E tapasztalatot esetünkre alkalmazva kiderül, hogy bármilyen perturbáció lényeges változást okozhat a kezdeti, $\varepsilon = 0$ energiájú állapoton azáltal, hogy kicsi, de véges amplitúdóval $\varepsilon \neq 0$ állapotokat kever hozzá. Ez azt eredményezi, hogy az eredetileg tiltott reakciónak a neutronabszorpcióénál ugyan sokkal kisebb, de véges hatás keresztmetszete és hozama lesz az $\varepsilon \rightarrow 0$ határátmenetben. Tehát a tiltott magreakciók hatás keresztmetszetét és hozamát a kvantummechanika perturbációszámításának szabályai szerint kell számolni. *Állításunk* minden olyan magfolyamatra érvényes, amelyre $\sigma(\varepsilon)$ (1) alakú és amelyre így $\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \sigma(\varepsilon) = 0$ érvényes, vagyis *általánosan a töltött részecskék alacsonyenergiájú magfizikájára*.

A fenti általános érvényű állítást egy konkrét példán illusztráljuk. A tiltott magreakciókban résztvevő részecskéknek a magreakcióban részt nem vevő, úgynevezett szennyezővel történő Coulomb-kölcsönhatása által okozott változással foglalkozunk. A modellt a következő fejezetben adjuk meg. A mechanizmust az alábbi folyamatokkal szemléltetjük:

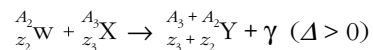


és



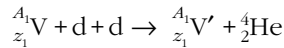
A (4) reakció egy szennyező (${}_{z_1}^{A_1}V$) által katalizált (${}_{z_2}^{A_2}W$) részecskebefogás, például proton (p), deuteron (d, azaz ${}^2_1\text{H}$), triton (t, azaz ${}^3_1\text{H}$) stb. befogás, (5) pedig a szennyező (${}_{z_1}^{A_1}V$) által katalizált kétfragmensű reakció, amelynek a feltételei az alábbiak: $A_2 + A_3 = A_4 + A_5$ és $z_2 + z_3 = z_4 + z_5$. A reakciók Δ energiája a kezdeti és végállapotbeli nyugalmi energiák különbsége. Mivel az 1 részecske csak katalizálja a folyamatokat, ezért nyugalmi tömege nem változik.

Általában egy ${}_{z_2}^{A_2}W$ részecske befogása az



reakcióban történik, ahol γ -emisszióra az energia- és impulzusmegmaradás teljesülése miatt van szükség.

Ezért (4) egy új típusú ${}_{z_2}^{A_2}\text{W}$ -befogás. Ilyen új típusú befogás lehet például az

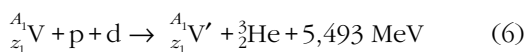


reakció is, amelyben tehát két deuteronból ${}_2^4\text{He}$ keletkezik anélkül, hogy γ -részecske is keletkezne. A szokásos ${}_{z_2}^{A_2}\text{W}$ befogási reakcióban a reakciót az elektromágneses kölcsönhatás okozza, és az ${}_{z_1+z_2}^{A_3+A_2}\text{Y}$ és a γ -részecskék viszik el a reakció energiáját. A (4) reakcióban a másodrendű reakciót a Coulomb- és az erős kölcsönhatások együttesen okozzák, és az ${}_{z_1}^{A_1}\text{V}'$ és ${}_{z_3+z_2}^{A_3+A_2}\text{Y}$ részecskék viszik el a reakció energiáját. Ez a „hidegfúzió” két rejtélyének is a megoldása: egyrészt, hogy *nem a várt reakciótermékek keletkeznek* másrészt, hogy *a magreakciókat nem kíséri γ -sugárzás*.

Egy konkrét modell és eredményei

Az alkalmazott modellben [8] három pozitív töltésű, szabad részecske és a részecskék között árnyékolt Coulomb-kölcsönhatás van. Kezdetben az 1 (katalizáló) részecskére szabad, a 2 és 3 részecskékre Coulomb-megoldást veszünk. Az 1 és 2, valamint az 1 és 3 részecske közötti Coulomb-kölcsönhatást tekintjük perturbációnak. Ez a modell jól írhatja le az olyan magok közötti reakciókat, amikor mindhárom részecske atomi vagy atomion állapotban van, tehát atomos gáz, elektrolitok és plazma (elektrolízis és gázkisülés) esetében. Főleg az ilyen esetekben figyeltek meg tiltott magreakciókhoz köthető jelenségeket.

A perturbációs számítás segítségével meghatároztuk a háromtestprobléma közelítő megoldását a 2 és 3 részecske közötti, a két magsugár összegénél kisebb $|r|$ távolság esetén. Majd ezzel a közelítő megoldással kiszámítottuk a 2 és 3 részecske közötti magreakció $\sigma_{23}^{(2)}$ hatáskeresztmetszetét és hozamát. A befogási reakció példajaként az



reakcióval foglalkoztunk. A hatáskeresztmetszetre ekkor és a kétfragmensű reakciók esetén is [8]

$$\sigma_{23}^{(2)} = \frac{n_1 z_1^2 K}{v_{23}}$$

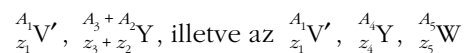
alakú eredményt kapunk, ahol n_1 a katalizáló 1 részecske részecskeszám-sűrűsége, z_1 pedig a töltésszáma (rendszáma), v_{23} a 2 és 3 részecskék közötti relatív sebesség és K egy állandó. $\sigma_{23}^{(2)}$ -nek a termikusneutron-abszorpcióéhoz hasonlóan $1/v_{23}$ a sebesség függése. Modellünkben a (6) reakció, 0,1 eV kezdeti mozgási energia, $z_1 = 54$ (Xe) és $n_1 = 2,65 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ (ennyi a normál állapotú atomos gáz számsűrűsége) esetén $\sigma_{23}^{(2)} = 6,6 \text{ pb}$ ($1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$) adódik, ami 10–15 nagyságrenddel kisebb, mint a termi-

kusneutron-abszorpció hatáskeresztmetszetei. A kétfragmensű reakciók hatáskeresztmetszetével itt nem foglalkozunk.

A hatáskeresztmetszet segítségével kiszámítható a térfogategységre eső hozam, ebből pedig a teljesítménysűrűség, ami a folyamatban résztvevő részecskék n_j részecskeszám-sűrűségeinek $n_1 n_2 n_3$ szorzatával arányos. A teljesítménysűrűségek meghatározásánál katalizáló részecskének ismét Xe-t ($z_1 = 54$) és $n_1 n_2 n_3 = 1,86 \cdot 10^{61} \text{ cm}^{-9}$ -t vettünk és a Xe-katalizált $\text{p} + \text{d} \rightarrow {}_2^3\text{He}$ reakció esetén $0,901 \text{ W cm}^{-3}$ teljesítménysűrűséget kaptunk. Néhány Xe-katalizált kétfragmensű magreakció esetén a teljesítménysűrűség jelentős. Ezek közül kiemelnénk a $\text{d}(t,n){}_2^3\text{He}$ reakciót, amelynek teljesítménysűrűségére ugyanilyen $n_1 n_2 n_3$ érték esetén 5570 W cm^{-3} adódott.

Atomai állapotú részecskék esetében az $n_1 n_2 n_3$ szorzattal a 10^{61} cm^{-9} -es nagyságrendet meghaladni nagy kihívás. Ez várhatóan kétatomos molekulákból (például H_2 , HD és D_2 -ből) álló molekuláris gáz fűtésével fém felületeknél érhető el, mivel a kétatomos molekulák egyes fém (például Pd és Ni) felületeknél nagy valószínűséggel atomizálódnak [9]. Kis szemcseméretű port vagy nanorészecskéket tartalmazó minták esetében (a [8] I. táblázatában felsorolt némely reakciónál) talán el lehet érni olyan kölcsönhatási térfogatot, ami már elég nagy ahhoz, hogy precíz, kalorimetrikus mérés segítségével mérhető mennyiségű hő keletkezzen.

A (4) és (5) reakciókban a reakció energiáját az



részecskék mozgási energia formájában viszik el, amit – mivel nehéz, töltött részecsről van szó – a sűrű környezetben megtett igen kicsi távolság alatt lefékeződve, hővé alakulva veszítenek el. Ezért a reakciótermékek közvetlen megfigyelése nehéz. Viszont a fent említett kísérleti körülmények között nukleáris elemátalakulások történnek, amelyek megfigyelhetők. A fentiekben leírtakkal és az itt bemutatott kvalitatív és numerikus eredményekkel a LENR-megfigyelések harmonizálni tűnnek.

Záró gondolatok

Megmutattuk, hogy bizonyos körülmények között miért lehetségesek az alacsony energiás magreakciók [8]. Az itt közölt elméleti megfontolások és numerikus eredmények gyakorlati szempontból is reménykeltők és felvetik annak lehetőségét, hogy az eddiektől eltérő módon konstruáljunk nukleáris alapon működő erőműveket. Egy forró fúziós berendezés – például ITER – árának elenyésző töredékéért lehetne „hidegfúziós” erőműveket előállítani, ha a „hidegfúzióval” kapcsolatos problémák tisztázódnak. Ráadásul úgy tűnik, hogy a nukleáris folyamatot nem vagy elenyésző mértékben kíséri emberre káros radioaktív sugárzás.

A jelenségek elméleti hátterét nagyon sokan próbálták-próbálják tisztázni, eddig kevés sikerrel. Ezzel szemben a hagyományos fizika elvi alapjain nyugvó elméletünk [8] – aminek néhány lényeges eredményét itt közöltük – úgy tűnik, hogy átfogóan és jól magyarázza a jelenségeket.

Megjegyzés: cikkünk megírása után jelent meg [10] a LENR jelenségkörének átfogó kísérleti vizsgálatáról és ezek negatív eredményeiről tudósító közlemény. Úgy véljük, hogy a negatív eredmények jó része azzal magyarázható, hogy a kísérleteket – elméleti útmutató hiányában – nem megfelelő paraméterekkel végezték [11].

Irodalom

1. M. Fleischmann, S. Pons, *J. Electroanal. Chem.* 261 (1989) 301.
2. C. Angulo és mások, *Nucl. Phys. A* 656 (1999) 3.
3. J. R. Huizenga: *Cold Fusion: The Scientific Fiasco of the Century*. University of Rochester Press, Rochester, 1992.
4. J. M. Blatt, V. F. Weisskopf: *Theoretical Nuclear Physics*. Wiley, New York, 1952.
5. E. Storms, *Naturwissenschaften* 97 (2010) 861.
6. E. Storms, *Current Science* 108 (2015) 535.
7. E. Storms: *The Science of Low Energy Nuclear Reaction*. World Scientific, Singapore, 2007.
8. P. Kálmán, T. Keszthelyi, *Phys. Rev. C* 99 (2019) 054620.
9. G. J. Kroes és mások, *Acc. Chem. Res.* 35 (2002) 193.
10. C. P. Berlinguette és mások, *Nature* 570 (2019) 45; <https://www.nature.com/articles/s41586-019-1256-6.pdf>
11. P. Kálmán, T. Keszthelyi, arXiv 1907.05211v2

VÉLEMÉNYEK

A TUDOMÁNYBAN NEM A LÁJKOK SZÁMÍTANAK

Abraham Loeb
Harvard Egyetem, Csillagászati Tanszék

A közösségi médiában egy ötlet sikerét a kapott lájkok számával mérik. A tudományos sikert az méri, hogy mennyire közelíti az ötlet az igazságot. A fizika tudományában az igazság szinonimája a kísérleti bizonyíték. Ezért azt várjuk, hogy a fizikusok a sikert azzal mérik, hogy mennyire illeszkednek ötleteik az adatokhoz, és nem azzal, hogy milyen népszerűsége tesznek szert a fizikusok körében. Meglehető módon ez a naiv elvárás manapság nem teljesül az elméleti fizika területén.

Olyan matematikai konstrukciókat, mint a szuper-szimmetria, húrelmélet, Hawking-sugárzás, AdS/CFT és a multiverzum a ma mértékadó elméleti fizika cáfolhatatlannak és magától értetődőnek tekint, anélkül, hogy kísérleti bizonyítékok alátámasztanák azokat. Egy kiemelkedő fizikustól hallottam néhány hónapja egy konferencián: „ezek az elképzelések biztosan igazak, még akkor is, ha nincs rájuk kísérleti bizonyíték, hiszen fizikusok ezrei hisznek bennük, és nehéz

elképzelni, hogy matematikában jártas tudósok ilyen nagy közössége tévedne”. Amikor a mainstream kultúra ilyen belterjes fázisba ér, nincs szüksége többé külső ellenőrzésre. Az általánosan elfogadott ötletek alapvetően matematikai szépségük miatt helyesek, a kísérletek szerepe alkalmasint annyi lehet, hogy szűkítsék a rugalmas matematikai keret által megengedett lehetőségek széles körét.

Az elméleti fizikusok korábbi nemzedékei kevésbé voltak arrogánsak; az általuk felvetett lehetőségek között volt olyan, amely lehetővé tette elméleteik kísérletekre alapozó cáfolatát. A jelenlegi belterjes kultúra dőzsöl a saját elméleti levében, elveti az alternatívákat, mert azok kevesebb lájkot hoznak. Ha a díjakról vagy pályázatokról döntő bizottságokat a népszerű paradigma képviselői alkotják, akkor évszázadokra lehet szükség ahhoz, hogy helyesbítsünk egy utat, amelyen eleve el se kellett volna indulni. Elegendően nagy csoportok legitimálhatnak spekulatív koncepciókat, figyelmen kívül hagyva *Carl Sagan* megállapítását: „a rendkívüli állításokhoz rendkívüli bizonyítékok szükségesek”. Ehhez hozzátenném a *Galileo Galileitől* származó alapvető tanulságot, miszerint a kísérletezés azért elengedhetetlen, mert rendkívüli csoportgondolkodás rendkívüli tudatlansághoz vezet. Galilei megfigyelései előtt népszerű volt gyönyörű absztrakt rendszereket konstruálni annak a feltételezésével, hogy a nehéz tárgyak gravitáció hatására gyorsabban esnek, mint a könnyebbek és hogy a Nap a Föld körül forog.

Van valami új és aggasztó a jelenlegi fizikusok belterjes kultúrájában, vagy mindig volt ilyen, még Galilei után is? Személyes benyomásom szerint az elméleti

Fordította *Lendvai János*. A cikket a szerző engedélyével közöljük. Eredeti elérhető: <https://blogs.scientificamerican.com/observations/science-is-not-about-getting-more-likes/>



Abraham Loeb a Harvard Egyetem Csillagászati tanszékének vezetője, a Harvard Fekete Lyuk Kezdeményezés alapító igazgatója és a Harvard Smithsonian Asztrofizikai Központ Elméleti és Számítástechnikai Intézetének igazgatója. Elnöke továbbá a Nemzeti Akadémiák Fizikai és Csillagászati Tanácsának, valamint a „Breakthrough Starshot” projekt tanácsadó testületének.

fizikusok még egy fél évszázaddal ezelőtt is sokkal inkább hajlottak a kísérleti igazolás alapul vételére. De most, amikor közel vagyunk ahhoz, hogy elfogadjuk a szuperszimmetriát, annak ellenére, hogy a Nagy Hadronütköztető nem talált bizonyítékot rá; ha ragaszkodunk ahhoz, hogy a Hawking-sugárzásnak léteznie kell annak ellenére, hogy paradoxonra vezet *Einstein* általános relativitáselmélete és a kvantummechanikai információ megmaradásának alapelve között; ha úgy gondoljuk, hogy a multiverzumnak léteznie kell – és bármi, ami megtörténhet, megtörténik benne végtelen számú alkalommal – anélkül, hogy bármilyen bizonyíték alátámasztaná ezt, akkor eláruljuk a fizika minket körülvevő valóság leírására törekvő alapvető működési módját.

Végül is, nagy izgalomba jöhetünk, ha elképzeljük az összes lehetséges pénzösszeget, ami bankszámlánkon elméletileg rendelkezésünkre állhatna. Különösen csábító a lehetőség, hogy milliárdosok vagyunk. De ha elme gyünk egy pénzautomatához és megtudjuk, mennyi pénzünk is van valójában, az kijózanítólag hathat a kiadási szokásainkra. A mért adatok összehasonlítása elméleti ötleteinkkel bizonyítékot ad arról, hogy nem hallucinálunk vagy vágyvezérelt gondolkodásban veszünk el. Bár soha nem szereztem ilyen tapasztalatot, el tudom képzelni, hogy a kísérleti adatok visszajelzéseinek elkerülése hasonló lehet ahhoz, mint kábítószer hatása alá kerülni. A tapasztalatokkal rendelkezők beszámolóí szerint „az ember a saját képzeletének konstrukcióiban lebeg, és boldognak érzi magát”. Az álmodozók csoportjának tagjai közösen még boldogabbnak érezhetik magukat, ha megosztják tapasztalataikat és támogatják egymást.

Ez a működési mód azonban célt téveszt. A fizika nem válhat szórakozássá, aminek az a célja, hogy jól érezzük magunkat. A történelem arra tanít, hogy embercsoportok boldogok lehetnek egymás társaságában, miközben téves nézeteket képviselnek. A természettudomány egy olyan tanulási tapasztalat a természetről, amely képes rámutatni tévedéseinkre, függetlenül a Twitteren elért népszerűségi mutatóinktól. A fizika párbeszéd a természettel, nem monológ. Az a feladatunk, hogy vállalva az ezzel járó kockázatokat, ellenőrizhető előrejelzéseket tegyünk.

Ennek ellenére vannak olyan fizikusok, akik még azt a hipotézist is támogatják, amely szerint egy számítógépes szimulációban élünk. A megfelelő választ ebben az esetben is bizonyítékoknak kellene alátámasztaniuk. Ezt az elképzelést csak akkor kellene komolyan venni, ha például a számítógép képernyő pixeléhez hasonló mutatókat ki a tér időben, vagy észlelnénk olyan hibát, amely azt jelzi, hogy a szimu-



Justin Wagner: *Multiverzum*, fametszet, 2013.

láció összeomlott. Eddig a valóság számomra nagyon valóságosnak tűnik. Ennek valószínűleg az az oka, hogy e gondolat néhány támogatójával ellentétben, ellenőriznem kell a bankszámlám egyenlegét, hogy elkerüljem a felelőtlen költségek következményeit.

A társadalom elvárása nemcsak előmozdítja a népszerű spekulációkat az elmélet területén, hanem korlátozza a sokkal kevésbé spekulatív fogalmak empirikus feltárását, akár könnyen hozzáférhető eszközökkel is. Például a civilizációk technológiai nyomainak – ipari szennyezés, mesterséges világítás vagy hő, nap- elemek, szerkezeti tárgyak vagy műholdak formájában – keresését az exobolygókon sokkal pontosabban lehetne végezni, ha a mainstream nem utasítaná el ezt az utat. Az ilyenféle előítéletek és a szakmai nyomás visszatartanak egyes tudósokat attól, hogy átnézzenek Galilei távcsővén.

Hogyan térhetne vissza a fizika a bizonyítékokra alapozó hagyományos alázatosságához a közösségi média korában? Az előrelépés egyszerű: elsőbbséget kell adni a kísérleti adatok gyűjtésének és az elméleti ötletek kizárásának. Nincs nagyobb alázat, mint elfogadni az adatok által jelzett utat. Ahelyett, hogy valaki a teljes életpályáját olyan matematikai út követésére tenné fel, amelyet a fizikusok következő nemzedékei jelentéktelennek nyilvánítanak majd, a fiatal tudósoknak olyan kutatási területekre kellene összpontosítaniuk, amelyekben az ötletek értéke még életük során kipróbálható és kiaknázható. Ha nem kísérletezünk egy közeli pénzautomatán, azt kockáztatjuk, hogy egy nap rá kell ébredünk: tönkrementünk. Az a spekuláció, hogy a multiverzum egy másik részében létezhet egy gazdagabb változat belőlünk, nem ment meg minket abban a valóságban, amelyben elszámoltathatók vagyunk.

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

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

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

Kéziratokat nem örzünk 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 Társulathoz vagy postautalványon a 10200830-32310274-00000000 számú egyszerűsített.

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

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

POUILLET NYOMÁBAN

A barometrikus magasságformula, valamint a napneutrínó-fluxus mérése

Fraller Csaba

Hévízi Bibó István Gimnázium és Kollégium

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat és a National Instruments Hungary Kft. a 2018/2019-es tanévben is írt ki pályázatot fizikatanároknak. A munkába immár negyedik éve diákokat is be kellett vonni. A pályázat a LabVIEW programozási felülettel támogatott, kifejezetten oktatási célokra kifejlesztett myDAQ adatgyűjtő eszközre szabott mérési eljárások kidolgozását követte meg.

A Hévízi Bibó István Gimnázium és Kollégium fizikatanáraként harmadszor vettem részt ezen a megmérettetésen. Legutóbb 2015/2016-ban neveztem. Az akkor kialakított munkamódszert alkalmaztam idén is, azaz tartottam magam a jól bevált *bármás* szabályhoz. Egy mérést kimondottan önálló tanári, egyet tanári irányítás mellett, de már együttműködésen alapuló mérési eljárásként, egyet pedig már nagyfokú önállóságot felmutatva, diákok által kidolgozott munkaként kívántunk bemutatni. Sajnos ez utóbbi célt nem sikerült maradéktalanul megvalósítani; ennek okairól a tapasztalatok ismertetésekor bővebben is beszámolok.

Jelen cikk nyelvezete igazodik az elvégzett munka mögött álló közreműködők számához: egyes szám első személyben akkor fogalmaztam, amikor önálló tanári munkáról vagy tanári megjegyzésről volt szó. A közös munkákat bemutató fejezetek többes szám első személyben íródtak.

A csapat diáktagjai

A részt vevő diákokat az előttünk álló várható nehézségek és a korábbi tanórai tapasztalataim alapján választottam ki. Felkérésemre azonnal igent mondtak, örömmel és nagy igyekezettel láttak neki a szabadide-

A cikk a 2018–2019. évi ELFT–NI myDAQ pályázaton I. díjjal jutalmazott munka alapján készült.



Fraller Csaba a Hévízi Bibó István Gimnázium és Kollégium matematika-fizika szakos tanára. Öt éve foglalkozik behatóbban a digitális méréseszközök tanórai alkalmazásának lehetőségével. A myDAQ-LabVIEW rendszerre alkalmazott ötleteivel többször vett részt pályázatokon, fesztiválokon. Különösen fontosnak tartja a modern természettudományos eredmények modellező mérésekkel történő bemutatását. Kiemelt érdeklődési területe a csillagászat.



A háromfős csapatunk két oszlopos tagja, a mindenes Vörös Balázs és programozásban kiváló Lutár Krisztián.

jüket alaposan igénybe vevő feladatoknak. A pályázat írásakor mindketten tizenegyedik évfolyamosok voltak, a fizikát attól az évtől kezdve emelt óraszámban tanulták. *Lutár Krisztiánt* inkább az informatika világa érdekli. Programozói tapasztalatai voltak korábban a C++ és C# nyelvekkel, valamint az Unreal Engine fejlesztői környezettel. *Vörös Balázs* inkább „mindenevő”. Nagyon érdekli az elektronika, szívesen bütyköl, forraszt, ugyanakkor a programozásba is belevetett: a C nyelvet, valamint az Arduino IDE fejlesztői környezetet is használta már. A közös munka során bebizonyosodott, hogy Krisztián kiváló kódoló, hamar átlátja az összetettebb programstruktúrákat is, és jó problémamegoldó. Balászról hamar kiderült, hogy nálam jártasabb az elektronika gyakorlati részében. A mérés elvéül szolgáló formulákat magabiztosan, jól ültette át a LabVIEW grafikus felületére. Mindketten nagy segítségemre voltak a mérésekről készített, később videómosztó oldalakon is elérhető felvételek készítésében is.

Már szeptember elejétől előre egyeztetett munkarend szerint heti egy alkalommal találkoztunk, jellemzően a „nulladik” órákban. Decembertől az egyre sűrűsödő feladatok miatt ezek az alkalmak heti kettőre emelkedtek.

Az alábbiakban a pályázatunkban is szereplő mérés rövid leírását ismertetem [1]. A második és harmadik mérés szoros egységet képez; részben didaktikai, részben kényelmi okokból döntöttem szétválasztásuk mellett.

A barometrikus magasságformula vizsgálata

Önálló tanári munka. Ezzel a méréssel kísérletet tettem arra, hogy a myDAQ-LabVIEW rendszerben rejlő lehetőségek közül minél többet megmutassak egyetlen *virtuális mérőműszerbe* (Virtual Instrument – VI) zsúfolva. Céloom egy teljes mértékig automatizált eljárás kidolgozása volt, ami egy, a szertárunkban már régóta megtalálható demonstrációs eszközt változtatott át mérőeszközzé.

A kinetikus gázelmélet szemléltetésére használt kétdimenziós „rázógép” függőleges síkban rezget kicsiny csapágygolyókat (1. ábra). Ha a rezgés amplitúdója nem túl nagy, szemmel is látható, hogy a részecskék a tartály alján sűrűbben helyezkednek el, mint feljebb. Kíváncsi voltam, hogy az eloszlás mennyire felel meg a barometrikus magasságformulának.



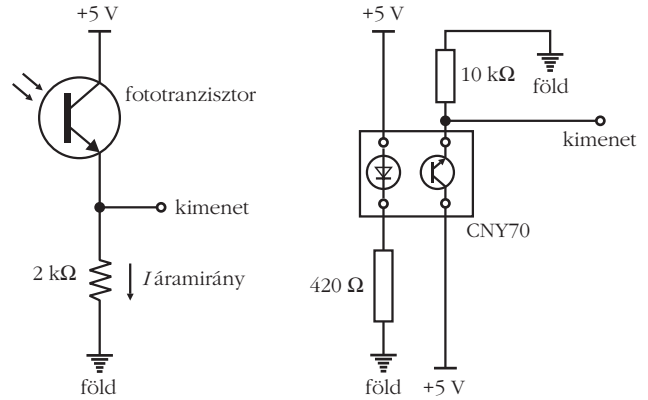
1. ábra. A 2-dimenziós gáztartály.

Elsősorban egy régi asztali számítógép alkatrészeknek, két saját készítésű szenzor, valamint egy kereskedelmi forgalomban kapható léptetőmotor-vezérlő egység és relék felhasználásával épített hardver segít megszámlálni az optikai szenzor látóterébe időegység alatt érkező részecskéket. Az eljárás teljesen automatizált: a szenzor alaphelyzetbe állítását, a háttérvilágítás kompenzálását, a szenzor mozgatását, a részecskék számlálását, a mért adatok kiértékelését, majd a megfelelő görbe illesztését – egyfajta mérőrobotként – ugyanaz a VI végzi. A VI egyszerre használja az analóg és digitális csatornákat, mint ahogy vezérlési és szabályozási folyamatok is találhatóak benne. Ez a mérés inkább a hatékonyságra helyezi a hangsúlyt, kevésbé a didaktikára, ugyanakkor talán közelebb áll az ipari alkalmazásokhoz, azaz alkalmasabb arra, hogy a mérnöki hivatás szépségeit és esetleges buktatóit bemutassa.

Amennyiben a léghőmérséklet T állandó hőmérsékletű, M moláris tömegű ideális gázként közelítjük, úgy p nyomása a felszín feletti méterben mért h magasság függvényében az alábbi jól ismert exponenciális formula szerint változik (p_0 a felszíni nyomás, R az univerzális gázállandó, g pedig az állandónak tekintett nehézségi gyorsulás):

$$p(h) = p_0 \exp\left(-\frac{Mg}{RT} h\right). \quad (1)$$

Léteznek ugyan ennél összetettebb, például a hőmérsékleti gradienst is figyelembe vevő leírások, de a középiskolában is vizsgálható (1)-es összefüggés munkahipotézisnek továbbra is elfogadható. Ennek egyszerű következménye, hogy az egységnyi térfogat-



2. ábra. Az alkalmazott szenzorok kapcsolási rajzai.

ban található részecskeszám hasonló exponenciálisan csökkenő függvény szerint változik:

$$N(h) = N_0 \exp\left(-\frac{Mg}{RT} h\right). \quad (2)$$

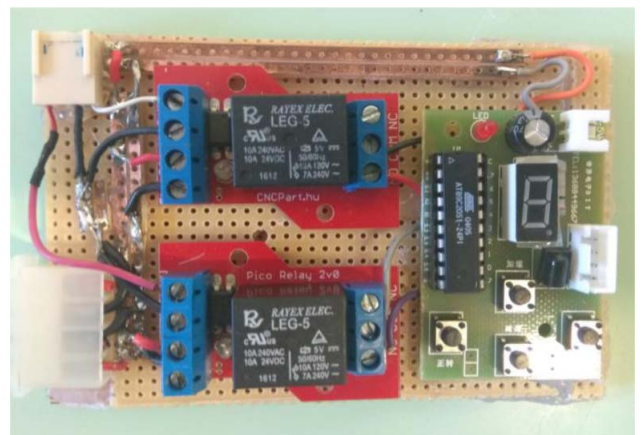
Kérdés, hogy illeszthető-e a (2)-höz hasonló függvény az eszköz tartályában található csapágygolyó-gáz részecskeszám-magasság tapasztalati görbéjére?

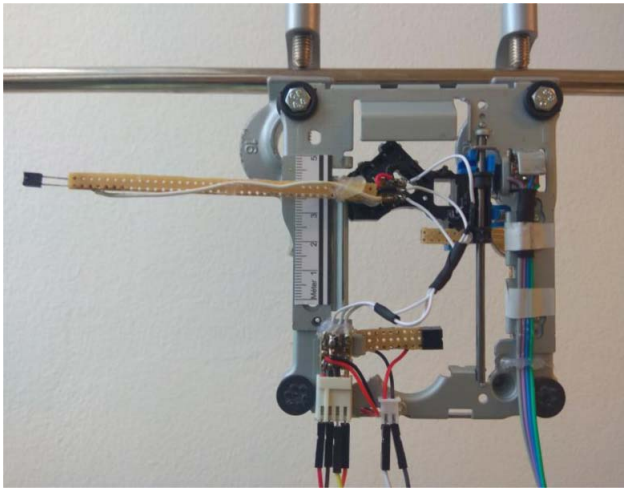
A számlálóberendezésnek elsősorban megfelelő szenzorokra volt szüksége. A mérőrobot „szeme” egy fényérzékelő szenzor (QSE113 fototranzisztor), ami az előtte elhaladó részecskéket érzékeli. Még egy közelség-szenzort is alkalmaztam (CNY70), ami a fény-szenzor alaphelyzetbe állításának szabályozási folyamatát tette lehetővé – ez biztosította, hogy minden egyes mérés azonos magasságban értelmezte a nulla szintet (2. ábra).

A megfelelő érzékelők kiválasztását követően a szenzorok mozgatását és az alkalmazott léptetőmotor vezérlését kellett megoldanom. A léptetőmotor vezérlését reléken keresztül a myDAQ, közvetlenül azonban egy módosított léptetőmotor-vezérlő kártya oldja meg (3. ábra). A fény-szenzor mozgatását egy kiöregedett DVD-meghajtó stabil, pontos mozgatót lehetővé tevő mechanikájára bízam (4. ábra).

A mérés menete így foglalható össze: a megfelelő frekvenciával és amplitúdóval rezgésbe hozott, és külső fényforrással megvilágított gázmodell csapágy-

3. ábra. A módosított vezérlőkártya.





4. ábra. DVD-mechanika a szenzorokkal.

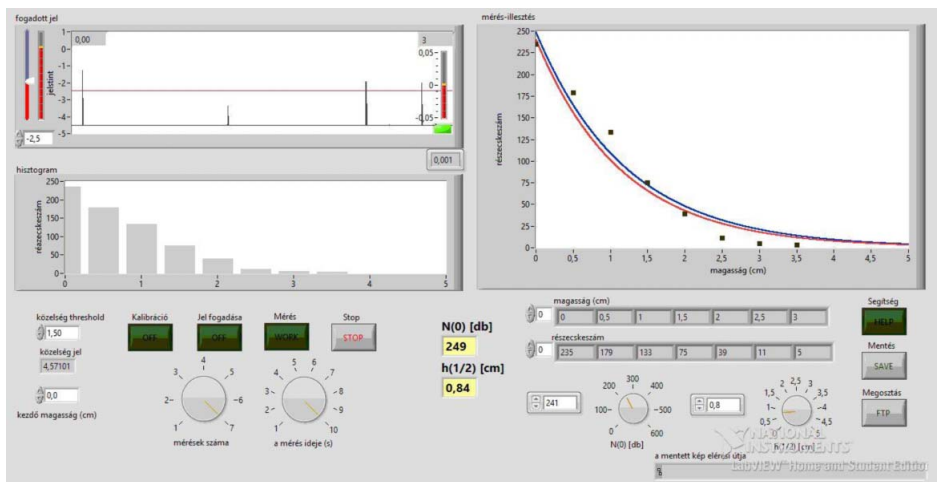
golyói a fény szenzor előtt elhaladva kicsiny fogyatkozási jelenséget, mérhető jelcsökkenést okoznak. A mérés kezdetekor a fototranzisztor elfoglalja a közelség szenzor által kijelölt helyét. A VI ebben a helyzetben néhány másodpercig számolja az elhaladásokat, majd adott értékkel (x cm) feljebb mozgatja a szenzort, ott újra végrehajt egy számlálóciklust és így tovább. A VI összegyűjti, ábrázolja és önállóan elemzi a beérkező adatokat, amelyekre a gimnazistáknak (2)-nél érthetőbb, a bomlási törvényhez hasonló

$$N(x) = N_0 2^{-\frac{x}{h(1/2)}} \quad (2.b)$$

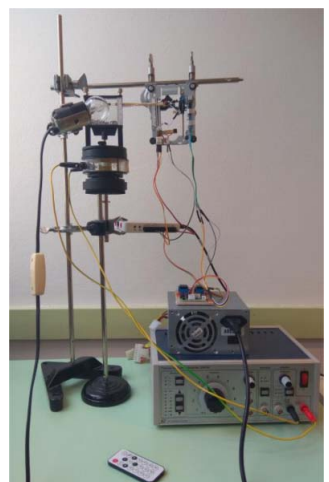
alakban görbét is illeszt. Ez esetben $h(1/2)$ paraméter a cm-ben mért „felezési magasság”. Az 5. ábrán a VI kezelőfelülete, valamint a mérési adatokra illesztett görbe tanulmányozható.

A mérőrendszer kialakítása (6. ábra) nagy kihívást jelentett, de a VI megírása is tartogatott nehézségeket. Elsősorban a léptetőmotorok vezérlése, illetve a nagyon éles, rövid csúcsok szisztematikus hibától mentes számlálása okozott gondot, mivel a tartály alsóbb régióiban másodpercenként akár 20-25 elhaladást is kellett regisztrálni.

5. ábra. A mérés kezelőfelülete és a mérési adatokra illesztett exponenciális görbe.



6. ábra. Az összeszerelt mérés.



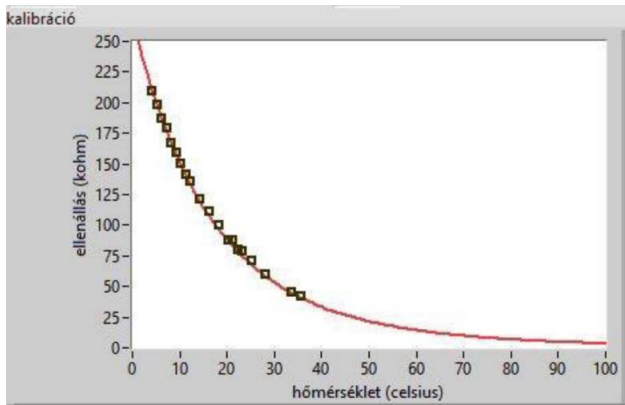
A tapasztalat azt mutatja, hogy a gázmodell részecskeeloszlása tűrhetően megfelel a barometrikus magasságformulának. Akkor sem lettem volna nagyon csalódott, ha a mért értékekre sokkal gyengébben illeszkednének a (2.b)-nek megfelelő exponenciálisan csökkenő görbék. Azt, hogy az illesztés általában elfogadható eredményt ad, ajándéknak tekintem. A mérés legfeljebb 3-4 percet vesz igénybe. Tökéletesen alkalmas arra, hogy tanórán vagy szakköri keretekben bemutassuk.

Termisztorhőmérő kalibrálása

Tanári irányítással végzett, de már együttműködésen alapuló munka. A hőmérséklet mérése a legtöbb elérhető, myDAQ-kal kapcsolatos segédanyag részét képezi. Valóban: ha elfogadjuk a termisztor gyártója által közölt paramétereket és a LabVIEW-ba beépített segédprogramokat, akkor nem nagy kihívás a hőmérséklet megjeleníteni, csak éppen az eredmény nem lesz elég pontos. Szerencsére nem kellett messzire nyúlnunk megfelelő támpontért.

Az emelt szintű szóbeli érettségi mérések között több éve szerepel a termisztorhőmérő vizsgálata [2]. Felismertük, hogy ennek digitalizálása közelebb visz távolabbi céljainkhoz. A programkód kidolgozásakor törekedtünk arra, hogy az teljes egészében megfelelően a vizsga mérési utasításának. Ezzel a lépéssel középiskolában szokatlanul hosszadalmas és kényelmetlen procedúrára vállalkoztunk: megpróbáltunk „saját kézzel” kalibrált termisztor hőmérőket készíteni. Részben a pontosságot tartottuk szem előtt, részben pedig szerettük volna mélyebben is megismerni azt a rendszerint automatizált műveletsort, ami egy egyszerű feszültségmérésből számtalan lépésben a hőmérséklet kijelzéséig vezet.

Ismert, hogy egy NTC termisztor R_T ellenállása a hőmérséklet növekedésével szigorúan monoton csökken. A pontos összefüggést a Steinhart–Hart-egyenlet írja le [3]. Ennek gyakorlatban elterjedt alakja a következő:



7. ábra. Egy végrehajtott kalibráció; $B = 4463 \text{ K}$.

$$R_T = r_\infty \exp\left(\frac{B}{T}\right), \text{ ahol } r_\infty = R_0 \exp\left(\frac{-B}{T_0}\right). \quad (3)$$

A kifejezésben R_0 a termisztor ismert hőmérsékleti ponthoz, jellemzően $T_0 = 298,15 \text{ K}$ -hez tartozó ellenállása, r_∞ határátmenetben a termisztor végtelen nagy hőmérsékletre tartozó (elméleti) ellenállása, ami jellemzően nagyon kicsi. A gyártók általában az R_0 és a B paramétereket tüntetik fel termékeiken. Az általunk használt termisztorokra például $B = 4450 \text{ K}$ és $R_0 = 68 \text{ k}\Omega$.

A termisztorral való hőmérsékletméréshez (3) inverzéből kell kiindulni:

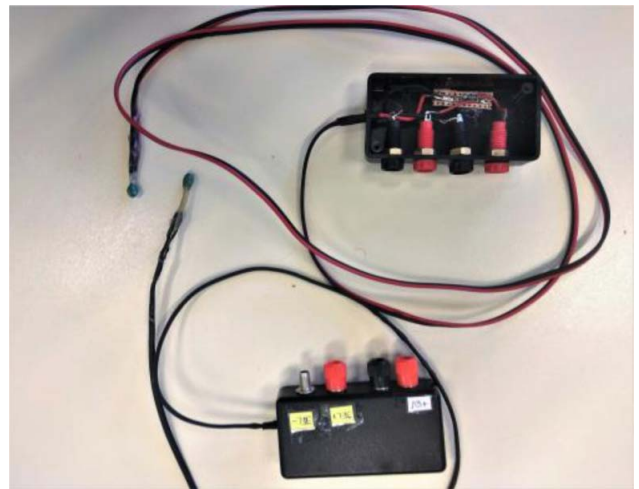
$$T = \frac{B}{\ln R_T - \ln r_\infty}. \quad (4)$$

A hőmérséklet meghatározásához tehát három mennyiséget, R_T , R_0 és a B értékeket kell ismerni. Az ellenállások kellően precíz mérése nem okoz gondot, a pontosságot a B paraméter bizonytalansága korlátozza. A gyári adat csak közelítő jellegű, és a termisztor öregedésével változhat is. Következésképpen mérésel, amit kalibrációnak nevezünk, kell meghatározni.

Ennek során egy referenciaként kezelt folyadék hőmérőt felhasználva minél több összetartozó $R_T - T_{ref}$ értékpárt mértünk ki, majd ehhez a karakterisztikához a lehető legjobban illeszkedő és a (3)-nak megfelelő görbét rendeltük hozzá (7. ábra).

Ettől kezdve az illesztett görbe B paraméterét fogadtuk el a termisztor tényleges paraméterének. Az eljárást többször megismételtük, és az így kapott értékeket átlagolva tettük pontosabbá mérésünket. A görbe illesztését a LabVIEW-ra bíztuk, statisztikai eszköztára kiválóan megoldotta a feladatot.

Az eljárás kulcsa, hogy a karakterisztika felvételéhez mérnünk kell a termisztor



8. ábra. Az elkészült hőmérők.

pillanatnyi ellenállását. A termisztor és egy vele sorba kötött $R = 4,73 \text{ k}\Omega$ ellenállásra $U_0 = 5 \text{ V}$ feszültséget kapcsolunk. Ez utóbbin mért U feszültség függvényében a termisztor ellenállása az alábbi kifejezéssel egyenlő:

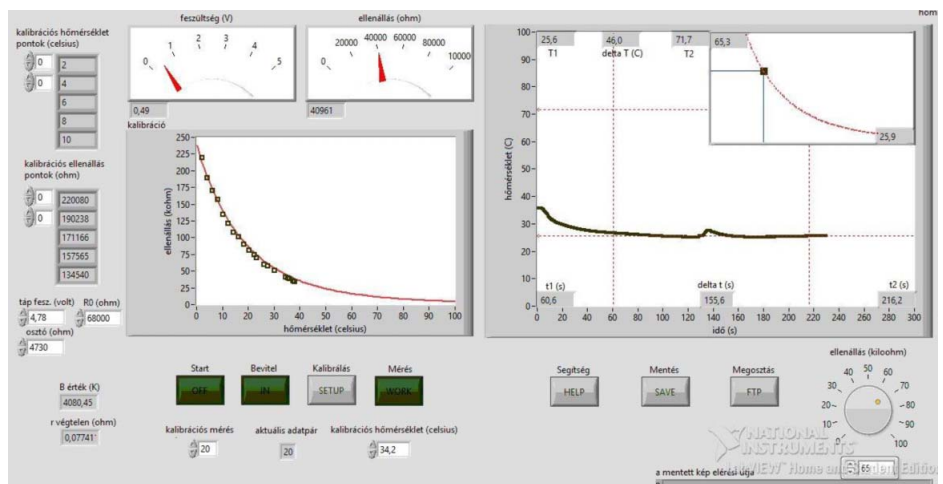
$$R_T = \frac{U_0 - U}{U} R. \quad (5)$$

Ezzel feszültségmérésre sikerült visszavezetni R_T , végző soron pedig a hőmérséklet mérést. Megjegyzendő, hogy a feszültségjel a myDAQ egyik analóg bemenete; míg a referencia-hőmérsékletet manuálisan kell a programba beírni.

Két teljesen egyforma szerkezetű hőmérőt készítettünk. A termisztorokat nagyjából 1-1,5 m hosszú két-eres vezeték végére forrasztottuk, majd zsugorcső, illetve szigetelő epoxigyanta alkalmazásával védőbevonatot, egyfajta tokot kaptak. A védőellenállást a banándugóaljzatokkal együtt dobozba építettük (8. ábra).

Igyekezünk nagy gondossággal eljárni. Hőmérőnként 4-4 illesztést végeztünk, alkalmanként 12-20 adatpárral vettük fel a karakterisztikákat. Az alábbi

9. ábra. A kalibrációt végző VI kezelőfelülete.



eredményre jutottunk. Az 1. (később csak „pirosként” emlegetett) hőmérőre: $B_1 \approx 4489 \pm 24$ K, a 2. („kék”) hőmérőre: $B_2 \approx 4471 \pm 36$ K. Csak emlékeztetőül: a gyári érték mindkettőre 4450 K.

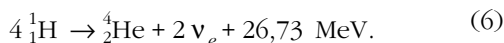
Ekkor már látszott, hogy a két hőmérő azonos körülmények között sem fog hajszálra megegyező értéket mutatni. A termisztorok szobahőmérséklet környékén egymáshoz képest például $\approx 0,2$ °C eltéréssel működtek. A tökéletes egyezésre nem számíthattunk, de arra igen, hogy ugyanakkora referenciahőmérséklet-változásra nagy pontossággal a termisztor hőmérők is ugyanakkora változással reagáljanak. Későbbi céljaink szempontjából másra nem is volt szükségünk.

A kidolgozott VI. elsődleges feladata tehát a kalibráció, azaz B meghatározása volt (9. ábra). Ugyanakkor a programot azzal a képességgel is felruháztuk, hogy a kalibrált értékkel a környezet hőmérsékletét azonnal meg tudja mérni. Ezt a programrészletet később a neutrínóprojektünk kódjába is beépítettük és alkalmaztuk.

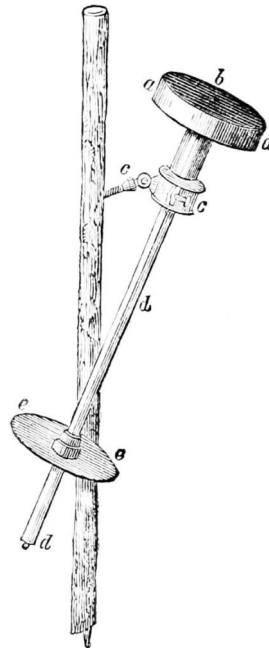
Napneutrínó-fluxus becslése a napállandó mérése alapján

Az elején célszerű tisztázni, hogy mi a kapcsolat a napállandó és a napneutrínók fluxusa között. A Nap fizikáját a standard napmodell írja le. A napmodellből következik a napneutrínók fluxusának várható értéke is. E szerint a földpálya távolságában a fluxus nagyjából $7 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

A Nap magjában szóba jöhető fúziós folyamatok 98,3%-át a pp-ciklus, a maradék mintegy 1,7%-át a CNO-ciklus teszi ki. A hidrogénfúzió összesített reakcióegyenlete (a γ -fotonokat nem feltüntetve) mindkét ciklus valamennyi csatornájára együttesen az alábbi:



Szerencsés tény, hogy minden csatornán ciklusonként 2-2 elektronneutrínó keletkezik, más leptoncsaládba tartozó nem. Már csak az a kérdés, hogy a keletkező energia mekkora hányada alakul át sugárzási energiává. Bármilyen furcsa, nem az összes. Éppen a hagyományos anyaggal nem szívesen kölcsönható neutrínók azok, amelyek a felszabaduló energia egy részét elvezetik a Nap energia-háztartásából. Mivel számottevően csak a gyenge kölcsönhatásban vesznek részt, gyakorlatilag energiavesztés nélkül tudják elhagyni a Napot. Kiderül, hogy mindkét ciklus összes csatornájára vetítve a neutrínók átlagosan mintegy 0,63 MeV energiával rendelkeznek, azaz ciklusonként a (6)-ban feltüntetett-hez képest ennyivel kevesebb, körülbelül $\varepsilon \approx 26,1$ MeV energia vesz részt a termikus egyensúly kialakításában, és alakul át végül hőmérsékleti sugárzássá [4, 5]. Ha elfogadjuk, hogy a Nap állandó luminozitású, akkor kezünkben van a recept: a légkörön túl minden egyes 26,1 MeV elnyelt sugárzási energiára 2-2 neutrínó jut. (A részecskefizika történetének egyik érdekfeszítő fejezete, a *napneutrínó-probléma* éppen abból eredt, hogy



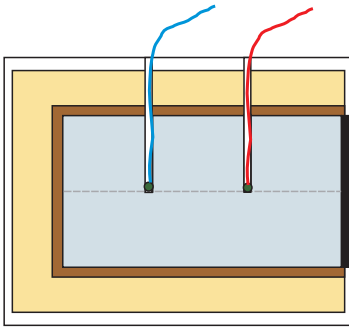
10. ábra. Pouillet pirheliométere (forrás: https://en.wikipedia.org/wiki/Claude_Pouillet).

1837–38-ban saját tervezésű eszközével, az úgynevezett pirheliométerrel [6]. Ebben egy korong alakú fémtartály kormozott felületén elnyelt hő melegíti a benne lévő folyadékot (10. ábra). Az eszköz lényegében kaloriméterként működik. Gondosan kivitelezett mérése meglepő pontossággal adta vissza a ma elfogadott középértéket. Pouillet szerint a napállandó nagyjából 1228 W/m^2 , ami alig 10%-os relatív hibát jelent. Kitűzött célunk az volt, hogy saját pirheliométer készítésével ismételjük meg ezt az úttörő mérést, és ha lehetséges, megközelítsük mérésének pontosságát.

Csapatunk folyadék helyett szilárd anyagot, tömör alumíniumhengert alkalmazott. A henger egyik alapját matt fekete hőálló zománccal befestettük, és ezt tettük ki a Nap sugárzásának. Az A felületen t idő alatt felvett hőből számítható a mért direkt, azaz a felületre merőlegesen érkező sugárzási teljesítmény:

$$P_{d, \text{mért}} = \frac{c m \Delta T}{A t}. \quad (7)$$

Ez egy alapvetően hőtani mérés, kulcsa a hőmérséklet-változás meghatározása. A pontosság kedvéért két termisztorhőmérőt alkalmaztunk, azokat a henger hossz tengelyének harmadolópontjaiba helyeztük (11. ábra). Feltételeztük, hogy állandó besugárzás esetén a hossz tengely mentén lineáris lesz a hőmérséklet-eloszlás. A furatok bejáratát a hőszigetelés miatt parafa- és szivacsdarabokkal betöltöttük. Az alumínium-tömböt több rétegben (parafa, purhab, PVC-cső) vastagon szigeteltük, rögzítettük, és a szigetelt felületekre kívülről tükörfóliát ragasztottunk (12. ábra). A „somagolásból” csak a fekete felület látszik ki, amit mérés közben állandóan a napkorong felé fordítva tartottunk.



11. ábra. A kaloriméter tengelymet-szete.

Mivel a két hőmérő még azonos körülmények között sem mutatott egyenlő értékeket, a mérés elején külön-külön kellett definiálnunk a kezdeti hőmérsékleteket (T_{10} és T_{20}). A teljes alumíniumtömbre vonatkozó pillanatnyi hőmérséklet-változást az alábbi módon vettük figyelembe.

$$\Delta T = \frac{T_1 - T_{10} + T_2 - T_{20}}{2}. \quad (8)$$

A hőmérsékletek és az eltelt idő mérésével a felszínen mérhető, a felületre merőlegesen érkező sugárzás (7) alapján már számíthatóvá vált.

Sajnos ez még nem a napállandó, így értelemszerűen nem elegendő a neutrínófluxus becsléséhez sem. Szükség volt a légkör hatásának kiküszöbölésére. Nyilvánvaló, hogy a legfontosabb tényező a nap-sugarak légkörben megtett útja. A Nap ϑ zenittávolságtól függ, hogy a sugárzásnak a légkör y vastagságának hány-szorosát kellene megtennie (s). A szakirodalom ezt a viszonyszámot „air mass”-nek nevezi (AM). Könnyű beegondolni, hogy ez miért fontos: vastagabb légkörben a sugárzásnak több ideje van szóródni, elnyelődni. Meghatározása alapvető fontosságú. Ha a Föld görbületétől eltekintünk, akkor egyszerű a helyzet:

$$AM = \frac{s}{y} = \frac{1}{\cos \vartheta}. \quad (9)$$

Megjegyzem, hogy a görbületet is figyelembe vevő képlet sem túlságosan bonyolult. Mi megelégedtünk az egyszerűbbel, mert még alacsony napállás, például 60° -os zenittávolság esetén is csak 1,5%-kal lett volna pontosabb a fenti definíciónál. Ezen kívül a légkör por- és páratartalma, a felhőzettség azok a tényezők, amelyek befolyásolják a sugárzást. Elméleti megalapozottsággal mindezeket figyelembe venni képzetelenség. Tapasztalati törvények szerencsére léteznek. A Meinel-modell szerint a légkör direkt sugárzásra vonatkozó áteresztőképessége felhőtlen égbolt esetén [7]:



12. ábra. Az alumínium kaloriméter készítésének lépései.

$$t_d = 0,7^{(AM^{0,678})}. \quad (10)$$

A fentiekkel összhangban már meghatározhatóvá válik a mért napállandó és a neutrínófluxus értéke:

$$P_{0, \text{mért}} = \frac{P_{d, \text{mért}}}{t_d} \quad (11)$$

és

$$\Phi_{v, \text{mért}} = 2 \frac{P_{0, \text{mért}}}{\varepsilon}. \quad (12)$$

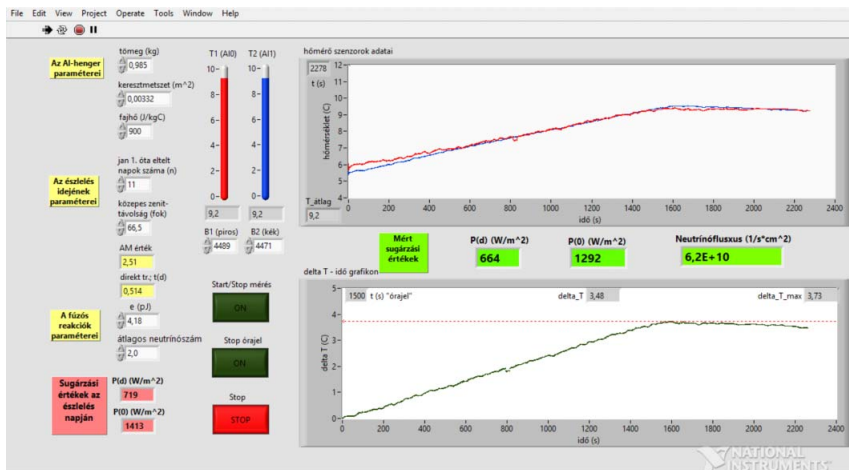
Érdeemes leltárt készíteni. A kaloriméter geometriai adatain, valamint fizikai állandókon kívül a következő mennyiségek mérendők: T_1 , T_{10} , T_2 , T_{20} hőmérsékletek, a hőfelvétel t ideje. Ezeket a VIa myDAQ segítségével megoldja. Manuálisan beírandó változó az észlelés pontos időpontjától függő ϑ zenittávolság. Ezt egy ingyenes planetáriumalkalmazásból, a *Stellarium-ból* nyertük.

A mérés végrehajtásának lényeges eleme, hogy a kormozott felületet mindig merőlegesen érje a sugárzás. Pírheliométerünket ezért egy óraművel rendelkező távcsőállványra illesztettük, ami sikerrel kompenzálta a Föld forgását (13. ábra).

A VI rengeteg adatot jelenít meg, ezek közül a legfontosabb a hőmérsékletváltozás-grafikon és annak maximuma. A függvény menetének vannak érdekességei, például, hogy a kaloriméter anyaga egy rövid ideig még a közvetlen sugárzás megszűnése után is

13. ábra. A pírheliométer mérés közben.





14. ábra. A napállandó méréséhez készült VI kezelőfelülete a január 11-i méréskor. Olyan volt nekünk, mint egy megkészt, de azért megkapott karácsonyi ajándék.

tovább melegszik. A maximumérték keresésénél ezt a ténytet is figyelembe kellett vennünk. Kiegészítésként megjegyzem, hogy a VI kezelt még egy további bemenő adatot is, a dátumot, pontosabban a január 1. óta eltelt napok számát. A napállandó ugyanis a földpálya ellipszis alakja miatt szezonális változást is mutat. Az ingadozás nem elhanyagolható, az $1367 \pm 45 \text{ W/m}^2$ a két szélsőérték között csaknem 7%-os eltérést jelent. Számunkra csak annyiban volt jelentősége, hogy figyelembevételével reálisabban tudtuk megbecsülni mérésünk pontosságát.

Legzavartalanabb mérésünk január 11-én, a helyi delelést követő percekben történt. A környezet hőmérséklete $5 \text{ }^\circ\text{C}$ körüli volt. A kalorimétert 25 percig tettük ki sugárzásnak, további körülbelül 2 percig tartott a melegedési szakasz, ami összesen $3,7$ fokos hőmérséklet-változást jelentett (14. ábra). Az általunk mért mennyiségek a következőképpen alakultak.

$$P_{0, \text{mért}} \approx 1292 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \text{ és } \Phi_{\nu, \text{mért}} \approx 6,2 \cdot 10^{10} \frac{1}{\text{s cm}^2}.$$

Aznapra a napállandó értéke a szezonális változásokot is figyelembe véve

$$P_0 \approx 1413 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

volt. Alacsony napállás, 2,5-et meghaladó AM érték mellett is sikerült elérnünk Pouillet mérésének pontosságát.

Tisztában vagyunk azzal, hogy számtalan tényezőt nem vettünk figyelembe, másokat csak feltételeztünk. Ezek olyan eltérő irányú szisztematikus hibákat is okozhattak, hogy azok összességében nullához közeli eltérést eredményezzenek. Lehetett szerencsénk is. Ettől függetlenül felemelő érzés volt saját bőrünkön tapasztalni, hogy a fizika és a matematika ennyire összetett problémában is működik. A Home-stake, Sudbury és a Super-Kamiokande obszervatóriumok fizikusai erről biztosan bővebben is tudnának mesélni.

Záró gondolatok

Több mint tucatnyi lépésben így alakítottuk át a feszültségjelet neutrínófluxussá.

Alapvetően működött a bevezetőben megfogalmazott elképzelésem, a kezdetben önállóan tervezett utolsó mérés kivitelezése azonban érthető okokból akadózott. Rá kellett jönnöm, hogy a neutrínóprojekt elméleti háttere még a 11. évfolyamos emelt óraszámában fizikát tanuló diákoknak is megterhelő volt, és ezen nem sokat segített a VI blokkdiagramjának viszonylagos egyszerűsége sem. Kénytelen voltam stratégiát

váltani: egy idő után nem törődtem azzal, hogy késznek tekinthető programrészeket kérjek tőlük, kizárólag arra figyeltem, hogy a megfelelő struktúrákkal megismerkedjenek, azokat felismerjék és produktívan tudják használni.

Így már működött, észrevehetően felgyorsultak az események. A mérés kidolgozását tanári irányítással, tanár-diák együttműködésben végeztük el. Ezúton is köszönöm tanítványaimnak kitartó, áldozatos munkájukat.

Végül álljon itt néhány idézet diákmunkatársaimtól: „... elsőnek nagy harapás volt a napneutrínók mérése”, „... a projektfeladat elkészítését abszolút pozitívan éltem meg”, „... talán elindított egy olyan pályán, amin végighaladva ott találhatom magam egy jó egyetem mérnöki karán”. Megérte a fáradságot.

Irodalom

1. Fraller Cs., Lutár K., Vörös B.: *Pouillet nyomában*. Pályázati dolgozat, 2019. <http://sukjaro.eu/ELFT-NI-palyazat/2018-19/PMunkak/index.html>
2. http://dload.oktatas.educatio.hu/erettsegi/nyilvános_anyagok_2019tavasz/fizika_emelt_szobeli_meresek_2019maj.pdf
3. https://en.wikipedia.org/wiki/Thermistor#Steinhart%E2%80%93Hart_equation
4. https://en.wikipedia.org/wiki/Proton%E2%80%93proton_chain_reaction
5. https://en.wikipedia.org/wiki/CNO_cycle
6. Richard T.: *Scientific Memoirs, Selected from the Transactions of Foreign Academies of Science and Learned Societies, and from Foreign Journals*. London (1846) 44–90., https://books.google.hu/books?id=Qcc-AAAAYAAJ&pg=PA44&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
7. https://www.researchgate.net/publication/254994320_Global_horizontal_irradiance_clear_sky_models_implementation_and_analysis

A méréseink kezelőfelületeiről készített videók elérhetősége:

Barometrikus magasságformula vizsgálata: <https://youtu.be/QpZzqQuVwDE>

Neutrínófluxus mérése: <https://youtu.be/IB4G-QtEHhA>

Az NI Hungary Kft. és az ELFT megbízásából készített videó elérhetősége:

https://drive.google.com/file/d/1taeNmM_Ct07F29VgY4omn59-zhTCmn8/view

A HOLD TÁVOLSÁGÁNAK ÉS MÉRETÉNEK KÖZELÍTŐ MEGHATÁROZÁSA HOLDFOGYATKOZÁSKOR KÉSZÜLT FELVÉTELEK SEGÍTSÉGÉVEL

Hudoba György
Óbudai Egyetem, Alba Regia Műszaki Kar

Az idei év folyamán két alkalommal is megfigyelhetünk holdfogyatkozást. Január 21-én egy teljes, július 16-án egy részlegest. Ez inspirált arra, hogy a Holdra vetülő földárnyék segítségével bemutassam, miként lehet egyszerűen következtetni a Hold relatív nagyságára és távolságára. Az abszolút méretekre is következtethetünk, amennyiben ismerjük a gömb alakú Föld kerületét – amit például *Eratoszthenész* (i.e. 276 – i.e. 194) méréséhez hasonló módszerrel magunk is meghatározhatunk.¹

A hold- és napfogyatkozások árnyékjelenségek, amelyek dinamikáját ma már jól ismerjük. Ha a Hold pontosan a Föld pályasíkjában (ekliptika) keringene, akkor minden újholdkor napfogyatkozás, holdtöltekor pedig holdfogyatkozás történne. De a Hold pályasíkja körülbelül 5 fokot zár be az ekliptikával, ezért a Hold – a fent említett két esetben általában – hol fölötte, hol alatta halad el. Fogyatkozás csak akkor történik, amikor a Hold a megfelelő időpontban a két sík metszéspontja által meghatározott helyen, a csomópontok közelében tartózkodik. Ez évente legalább kétszer, de legfeljebb hétszer következik be. Az első esetben mindkettő napfogyatkozás, az utóbbiban négy vagy öt nap-, a többi holdfogyatkozás.

Jelen írás célja, hogy lássuk, a jelenség gondos megfigyelésével milyen egyszerűen milyen sok meg tudható a világról, még akár a cikkben felhasznált szögfüggvények és algebrai ismeretek nélkül, ókori módszerekkel, mondjuk homokba rajzolt ábrák segítségével is.

Cél továbbá az is, hogy ötletként szolgáljon például szakköri foglalkozásokhoz. Az alábbiakban ismertetett eljárás elvégzéséhez természetesen nem kell várni a következő holdfogyatkozásig,² hiszen például az Internet tele van fénykép- és filmfelvételekkel, bár saját megfigyelés és felvétel elemzése kétségkívül gazdagabb élményt nyújt. Továbbá régi, például



Hudoba György fizikus, egyetemi magántanár, Fejér-megyei Prima-díjas, a Terkán Lajos Bemutató Csillagvizsgáló vezetője. Diplomáját a József Attila Tudományegyetem szerezte. Utána a VIDEOTON-ban fejlesztőként dolgozott, közben fizikát tanított a Kandó Kálmán Műszaki Főiskolán (ma OE), 1990-től itt főállású oktató. További tárgyai: digitális technika, elektronika, híradástechnika, műszaki optika, optoelektronikai kommunikáció. Csillagászattal középiskolás kora óta foglalkozik.

könyvekben talált rajzokat is előkereshetünk. A bemutatott módszer így arra is alkalmas, hogy a rajzról megállapítsuk, az észlelő milyen pontosan készítette azt, mekkorának adódik róla a Hold mérete és távolsága.

A hétköznapi tapasztalat szerint napsütésben:

- a testek árnyékának széle nem éles,
- az árnyék két részből áll, úgymint
 - teljes árnyékból (umbra),
 - és félárnyékból (penumbra),
- az árnyékvető testtől távolodva az umbra mérete csökken, a félárnyéké növekszik.

Mindez abból következik, hogy a Nap véges távolságban levő kiterjedt fényforrás.

Néha – még hozzá a holdfogyatkozások alkalmával – a Föld árnyéka is láthatóvá válik, ugyanis ekkor a Hold keresztülhalad a Föld árnyékkúpján.³ A félárnyék még alig látszik, míg a teljes árnyék viszonylag jól megfigyelhető. Amennyiben a fent említett árnyékviszonyok nagyobb méretskálán is jó közelítéssel alkalmazhatók,⁴ a Nap és a Hold látószögének ismeretében a Hold és a földárnyék alakjának összehasonlításából, a Föld nagyságát alapul véve becslés végezhető a Hold méretére és a Földtől való távolságának meghatározására.

A földi megfigyelésekből tudjuk, hogy a Nap látószöge körülbelül fél fok, következésképpen – a korábban említett feltétel teljesülése esetén – a Föld árnyékkúpjának 2α -val jelölt kúpszöge is ennyi, továbbá a Hold látószöge is fél fok körül van. A teljes árnyék geometriai viszonyait az *1. ábra* mutatja. Itt R_F a Föld, R_H a Hold sugara, a Föld árnyékkúpjának hossza L , és az árnyékkúpba a Hold az l távolságban hatol be.⁵ Ebben a távolságban az umbra látószöge legyen 2β !

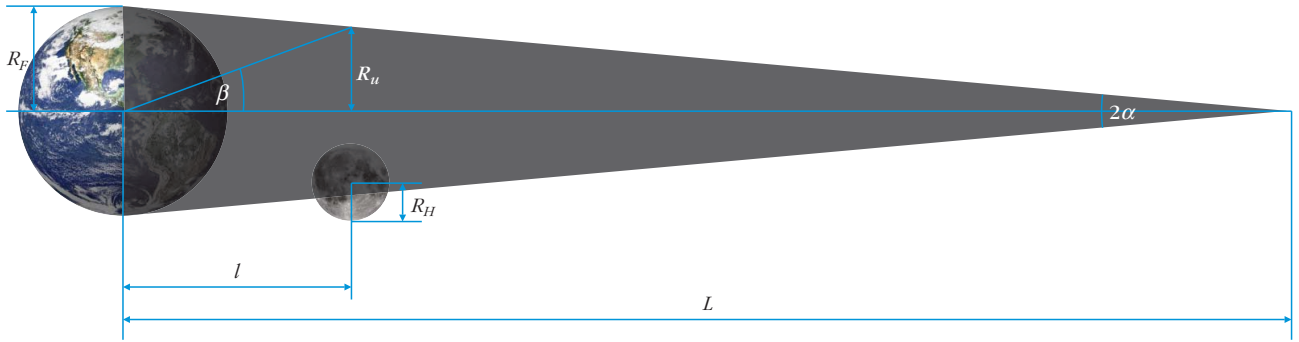
¹ <https://www.csillagaszat.hu/hirek/merjuk-meg-a-fold-kerulet-iskolak-jelentkezeset-varjak-eratoszthenesz-hires-meresenek-megismetlesere>.

² A következő, Magyarországról is látható teljes holdfogyatkozás majd csak 2023-ban fog bekövetkezni. Az érdeklődő olvasó az alábbi linken tájékozódhat: <https://www.timeanddate.com/eclipse/list.html>. (A félárnyékos fogyatkozás – penumbral lunar eclipse – a céljainkra nem alkalmas.)

³ Az umbra kúp alakja, következésképpen a Föld gömb alakja sok holdfogyatkozás megfigyelése alapján állítható.

⁴ A fényforrás jóval nagyobb az árnyékot vető testnél, és elegendően messze van tőle. Esetünkben ez teljesül, hiszen a Nap mintegy 110-szer nagyobb a Földnél, és a Föld átmérőjének majdnem 12 000-szeres távolságából világít.

⁵ A valóságban a földi légkör megrövidíti az árnyékkúpot, és a széle is elmosódik.



1. ábra. A Föld árnyékkúpja (a szemléletesség érdekében erősen torzítva).

A tapasztalat szerint a Hold távolságában az árnyékkúp metszetének átmérője nagyobb a Holdénál, viszont méretére az árnyék szélének Holdra vetülő ívéből következtetni tudunk. Ily módon lehetőség nyílik meghatározni, hogy a Hold távolságában mekkora a Föld árnyékkúpjának 2β látószöge, l távolsága és az R_u , azaz az umbra sugara, amely adatokból végső soron a Hold Földhöz viszonyított méretére is következtetni tudunk.

$$L = \frac{R_F}{\operatorname{tg}\alpha},$$

valamint

$$R_u = l \operatorname{tg}\beta = (L - l) \operatorname{tg}\alpha.$$

Ez utóbbiból l -t kifejezve, valamint L -t behelyettesítve megkapjuk a Hold távolságát, a Föld sugarával kifejezve:

$$l = \frac{R_F}{\operatorname{tg}\alpha + \operatorname{tg}\beta}.$$

A Hold mérete pedig:

$$R_H = \frac{R_u}{R_u/R_H} = \frac{l \operatorname{tg}\beta}{R_u/R_H}.$$

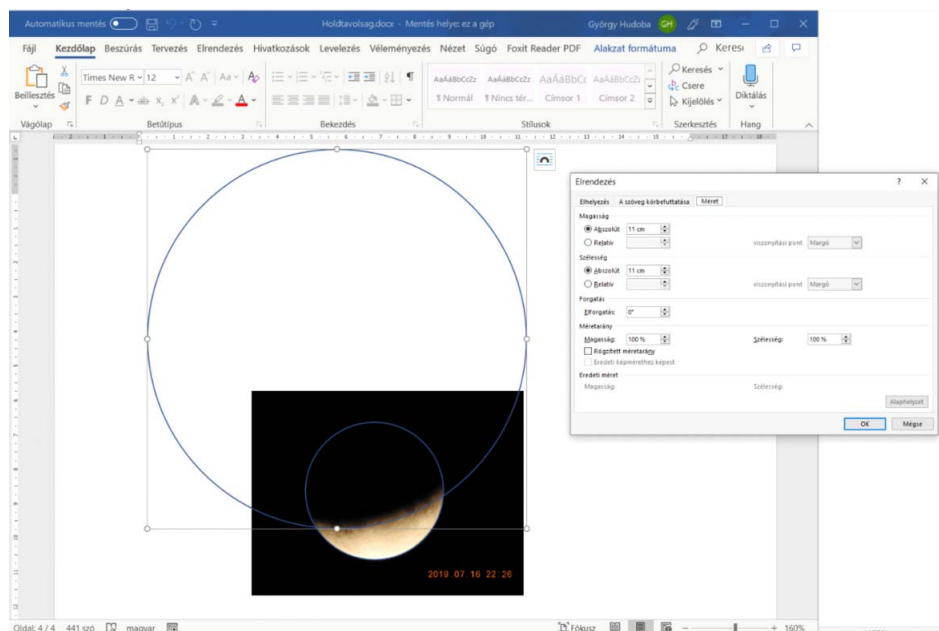
A β szöveget az R_u/R_H , vagyis az umbra és a Hold méretének összehasonlításából állapíthatjuk meg a fogyatkozáskor készült felvétel(ek) felhasználásával, ismerve, hogy a Hold látószöge körülbelül fél fok:

$$\beta = \frac{R_u}{R_H} \frac{0,5}{2}.$$

Mivel $\alpha = 0,25^\circ$, valamint a 2. ábra alapján $R_u/R_H = 2,75$, azt kapjuk, hogy $\beta = 0,6875^\circ$, amiből a Hold távolságára 61,1-szeres, méretére pedig 0,266-szeres földsugár adódik. Ha ezen értékeket összehasonlítjuk az adott napra érvényes adatokkal⁶ (62,19, illetve 0,27 földsugár), meglepően jó egyezést találunk.

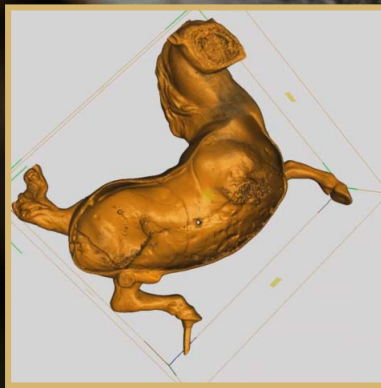
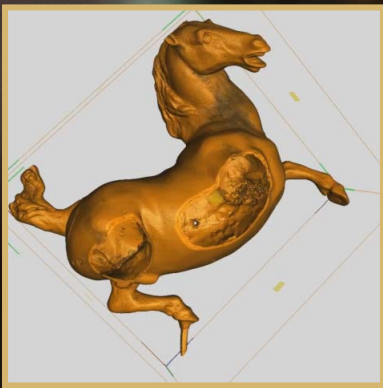
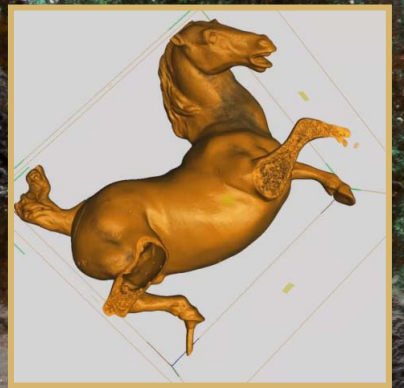
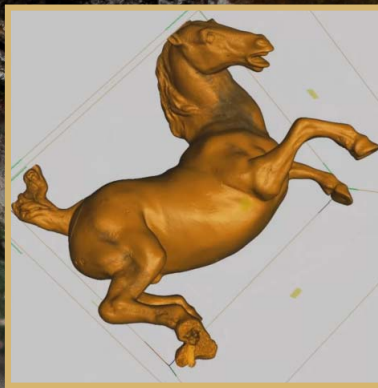
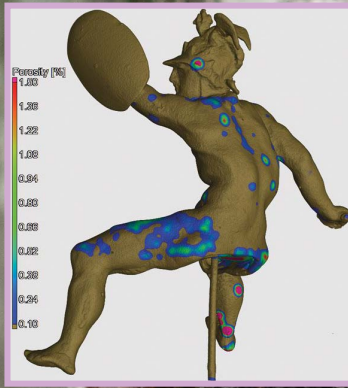
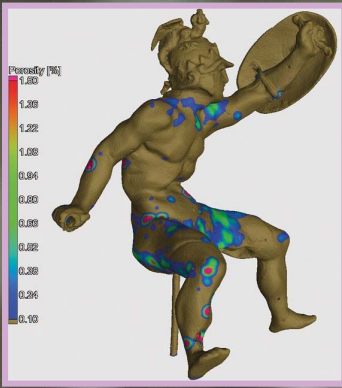
Bemutattam, hogy teljes holdfogyatkozáskor a Holdra vetülő földárnyék segítségével miként lehet egyszerűen meghatározni a Hold méretét és aktuális távolságát. A módszer hasznos lehet fizika, földrajz vagy csillagász szakörök munkájának gazdagítására, elmélyítésére. Több holdfogyatkozás vizsgálatával megpróbálhatjuk a holdtávolság változását is tetten érni.

2. ábra. Az umbra méretének meghatározása. A felvétel a 2019. július 16-i holdfogyatkozáskor készült.



Gyakorlati tanácsok: A megfelelő körök illesztése, méretük finom változtatása a 2. ábrán látható módon szövegszerkesztőben is elvégezhető. A vizsgálatot több, még illeszkedőnek gondolt esetre elvégezve a mérési hiba tartományára következtethetünk. Az árnyék határának jobb láthatósága érdekében a felvétel kontrasztját célszerű kissé növelni.

⁶ A Föld átmérője 12742 km, a Holdé 3474 km, 2019. július 16-án a Hold a Földtől 396266 km-re volt.



Videó a vizsgálatról:



ISSN 0015326-7
9 770015 523309

