

fizikai szemle



2016/2

Webszavazás a Fizikai Szemléről

A *Fizikai Szemle* egyetlen magyar nyelvű fizikai szakfolyóiratként Társulatunk legnagyobb kincse. Tartalmán túl képi és tipográfiai megjelenésének magas színvonala miatt is mindnyájan várjuk, hogy kézbe vehessük évi 11 számát.

Az ELFT elnökségének és a *Szemle* szerkesztőbizottságának határozott szándéka, hogy a lap kövesse az info-kommunikációs technikák fejlődésével bővülő lehetőségeket. Érdemes sorra venni a közelmúlt fejleményeit és a közeljövő terveit:

- A www.fizikaiszemle.hu honlapon hat hónapos késleltetéssel folyamatosan elérhető az egyes lapszámok pdf-formátumban.

- Az elektronikusan elérhető lapszámok a nyomtatottnál jóval több színes illusztrációt közölnek.

- A társulati honlapról letölthető éves falinaptár készül a megelőző év lapszámai címdoldalainak és legjobb illusztrációinak felhasználásával.

- Egyes cikkeket kiegészítő részletes ismertetéseket, kísérleti leírásokat (különösen a *Fizika tanítása* rovatban) a honlapon önálló mellékletként tesszük közzé.

- Az MTA Könyvtárával együttműködve a közeljövőben cikkenként kereshető formában elérhetővé kívánjuk tenni a *Fizikai Szemle* korábbi évfolyamait.

Mindeme fejlemények, továbbá a fiatalabb korosztályok olvasási szokásaiban feltételezhető változások alapján időről-időre meg kell vizsgálnunk a *Fizikai Szemle*hez való teljes mértékben elektronikus előfizetői hozzáférés iránti érdeklődés mértékét. Hangsúlyoznunk kell, hogy a *Szemle* tartalmi és műszaki szerkesztésének színvonalából semmiképpen sem kívánunk

visszalépni, az esetleges változás csak a papíralapú előállítás és a terjesztés módját érintheti.

Az (időkésés nélküli, előfizetői) elektronikus hozzáférésnek is több formája lehetséges. A jelenlegi teljes lapszám pdf-fájlját görgető megoldás mellett a képernyőn lapozható verzió is készíthető (lásd <https://digitalstand.hu/olvaso/44377/#1>). A havonkénti e-mail-es megküldés legegyszerűbb eljárása mellett a jelszavas regisztrációval történő, cikkenkénti letöltés is megvalósítható.

A tagtársak véleményének megismerésére „web-szavazást” indítunk. Módjuk van a hagyományos és az elektronikus hozzáférés közötti preferenciájuk megjelölésére, továbbá az elektronikus változaton belül a legegyszerűbb és a legszofisztikáltabb változat választásának jelzésére.

Az elektronikus hozzáférés iránti jelentős érdeklődés esetén a 2017-től kezdődő (részleges) átállásra műszaki és pénzügyi tervet készítünk. A fejlesztési költségek és a megtakarítások figyelembe vételével kidolgozzuk a kapcsolódó esetleges (5-10%-os) tagdíjmérséklés mértékét, amelyről előzetesen tájékoztatjuk tagtársainkat.

Kérjük tehát, hogy **2016. február 29-ig** minél nagyobb számban keressék fel a **webszavazás** felületét, ahol kizárólag nevük és munkahelyük megadásával nyilváníthatnak véleményt.

A szavazás helyét annak megindulásakor a Társulat honlapján (www.elft.hu) tesszük közzé, az ott elhelyezett linkekre lépve tudnak a szavazási felületre eljutni.

Közreműködésüket előre is köszönjük:

Patkós András

Szatmáry Zoltán

A 2016. évi

59. Fizikatanári Ankét és Eszközbemutató

A 2016. évi ankétot március 11-től 14-ig

Nyíregyházán, a Szent Imre Katolikus Gimnázium, Általános Iskola és Kollégiumban rendezzük meg.

Témák: Fenntarthatóság a fizikában. Fenntartható oktatás.

Állandóan frissülő részletek a Társulat www.elft.hu honlapján.

A 30 órás továbbképzésként elismert 2 m rendezvény akkreditációja folyamatban van.

A műhelyfoglalkozásokat március 13-ra tervezzük.

A műhelyfoglalkozások mellett a korábbi, sikeres 10 perces kísérletek című programot (előreláthatóan szintén március 13-án) is meg kívánjuk szervezni.

ELFT Tanári Szakcsoportjainak 4 m vezetősegei



Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat havonta megjelenő folyóirata.

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

Főszerkesztő:
Szatmáry Zoltán

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

Szerkesztő:
Lendvai János

Műszaki szerkesztő:
Kármán Tamás

A folyóirat e-mail címe:
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:
Víz a Naprendszerben.

Frei Zsolt: Vadászat a gravitációs hullámokra – 1. rész 38
Mindenki várja a felfedezésüket

Pázsit Imre: Atomerőművek az alapkutatók szolgálatában 42
Atomreaktorokból származó neutrínókat is használnak a neutrínóoszillációk kutatásában

Takácsné Farkas Anikó, Kiss Csaba: Felszín alatti vizek 46
naprendszerbeli égitestekben
Elegendően nagy kőzetmag esetén felszín alatti óceánok jöhetnek létre, melyekben a víz becsült mennyisége jelentősen meghaladja a Földön található összes vizét is

A FIZIKA TANÍTÁSA

Nyirati László: Földrajzi helymeghatározás a Nap segítségével 50
Koordináták meghatározása egy pálca, pontos óra, függőn, vízszintező és táblázatok segítségével, valamint hasznos csillagászati és földrajzi alapismeretek

Jávor Márta, Geszti Tamás: Kollektív döntéseket hozni 59
– hogyan látja ezt a szociofizika
A kollektív döntéshozatal emberi-közösségi játszmájának statisztikus fizikai leírásában segít a mágneses anyagok rendeződésére kidolgozott Ising-modell

Gündischné Gajzágó Mária: Lichtenberg-ábrák keltése Bolyai Farkas 65
idején és ma – 1. rész
Gyönyörű elektrosztatikai mintázatok kialakítása egykori és mai eszközökkel

HÍREK – ESEMÉNYEK

Plósz Katalin, 1939–2015 (*Vantsó Erzsébet*) 69

Major János, 1945–2015 (*Tichy Géza*) 70

KÖNYVESPOLC

Benkő József, Mizser Attila (szerk.): Meteor csillagászati évkönyv 72
2016 (*Füstöss László*)

Zs. Frei: Gravitational waves – Part 1

I. Pázsit: Nuclear power plants helping basic research

A. Takács-Farkas, Cs. Kiss: Underground waters on the planets of the Solar System

TEACHING PHYSICS

L. Nyirati: Geographical positioning with the help of the Sun

M. Jávor, T. Geszti: Collective decision-making: a sociophysical treatment

M. Gündischné-Gajzágó: Producing Lichtenberg patterns today and in the time of Farkas Bolyai – Part 1

EVENTS

Katalin Plósz, 1939–2015 (*E. Vantsó*)

János Major, 1945–2015 (*G. Tichy*)

BOOKS

J. Benkő, A. Mizser (eds.): Meteor astronomical yearbook 2016 (*L. Füstöss*)

VADÁSZAT A GRAVITÁCIÓS HULLÁMOKRA – 1. RÉSZ

Az általános relativitáselmélet kísérleti bizonyítékai

Frei Zsolt
ELTE Atomfizikai Tanszék

2015. szeptember 18. és 2016. január 12. között zajlott az első adatgyűjtési időszak a világ jelenleg legérzékenyebb gravitációs hullám-detektorainál, az Egyesült Államokban működő Advanced Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory (LIGO) nevű rendszer két detektoránál. A LIGO érzékenységét az ezt megelőző két évben jelentősen megnöveltük, és a sajtóban terjedő hírek szerint a szakmai közvélemény azt várja, hogy a gravitációs hullámokat ez az új berendezés előbb-utóbb közvetlenül is észlelni fogja. E hír kapcsán most kezdődő cikksorozatunkban áttekintjük az általános relativitáselmélet eddig talált kísérleti bizonyítékait, majd a LIGO detektorainak működését és végül a harmadik részben a gravitációs hullámok lehetséges asztrofizikai forrásait. A cikk szerzője által vezetett magyar csoport 2007 óta vesz részt a LIGO munkájában, így igyekszünk arra is rávilágítani, hogy mi a magyar hozzájárulás ehhez a nemzetközi nagyprojekthez.

Egyszerűen fogalmazva, *Isaac Newton* fizikai képe szerint a testek egymás közötti vonzása és a testek mozgása egy olyan matematikai absztrakcióval írható le, amely bevezeti a testek között ható gravitációs erőt. Ezt az erőt pontról pontra kiszámolva, a mozgásegyenletekbe beírva, a tömegpontok pályája elég pontosan meghatározható. *Albert Einstein* ezzel szemben egy újfajta matematikai absztrakciót javasolt: a térben elhelyezett tömegek meghatározzák a tér görbületét, és ha ezt a görbületet kiszámítjuk, azután a pályaszámítás már egyszerű: a metri-

kus tenzor által leírt térben a tömegpontok a geodetikus egyenletnek megfelelően, inerciálisan, ha úgy tetszik, szabadon mozognak. Newton leírásában az igazi fizikát a Laplace–Poisson-egyenlet tartalmazza. Ez mondja meg, hogy az adott sűrűségeloszlás milyen gravitációs potenciált hoz létre a térben. Az általános relativitáselméletben egy nagyon hasonló formájú egyenlet, az Einstein-egyenlet játszik központi szerepet. Ez mondja meg, hogy az adott anyageloszlás milyen geometriát indukál, pontosabban fogalmazva összeköti az energia-impulzus tenzort az Einstein-tenzorral.

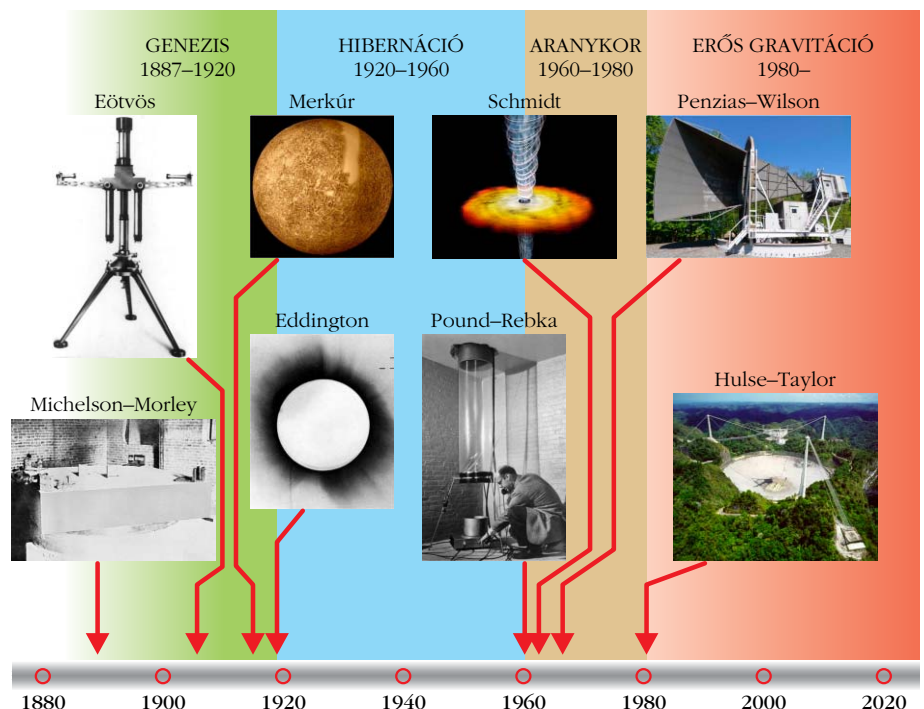
A 20. század elejére, a fejlett csillagászati megfigyelési és laboratóriumi kísérleti technika következtében egyre több evidencia mutatott arra, hogy a newtoni fizikát meg kell haladni. Az általános relativitáselmélet nemcsak magyarázatot adott néhány meglepő kísérleti tényre, de merőben új, az asztrofizika szempontjából meghatározó jelenségeket jósolt meg: fekete lyukakat, gravitációs lencsehatást (a newtonitól eltérő mértékűt), a gravitációs vöröseltolódást, a kvazárok gravitációs sugárzását vagy a gravitációs hullámokat.

1. ábra. A „genezis” időszakában a Michelson–Morley- és az Eötvös-kísérletek, a Merkúr bolygó perihélium-elfordulása és egy napfogyatkozás során a Nap melletti fényelhajlás Eddington nevéhez köthető pontos megfigyelése voltak a legfontosabb kísérleti bizonyítékok. Ezt az időszakot 40 éves „hibernáció” követte, mivel a kísérleti technika csak lassan zárkózott fel az elmélet igen fejlett szintjéhez. Amikor ez megtörtént, az úgynevezett „aranykorban” sikerült többek között kimutatni a gravitációs vöröseltolódást (Pound és Rebka), felfedezni a kvazárokat (Schmidt), a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzást (Penzias és Wilson), illetve egy olyan rádiópulzárt, amely kettős rendszer részeként pontosan annyi energiát veszít időben, mint amennyit gravitációs hullámok formájában ki tud bocsátani (Hulse és Taylor).



Frei Zsolt fizikus, az MTA doktora, az ELTE Atomfizikai Tanszék tanszékvezető egyetemi tanára, az Akadémia Lenyület Asztrofizikai Kutatócsoport vezetője. Asztrofizikát, kozmológiát és képfeldolgozást tanít. Több mint száz nemzetközi publikáció és számos magyar nyelvű ismeretterjesztő cikk szerzője. *Inflációs kozmológia* címmel *Patkós András*sal közösen egyetemi tankönyvet írtak.

vezetője. Asztrofizikát, kozmológiát és képfeldolgozást tanít. Több mint száz nemzetközi publikáció és számos magyar nyelvű ismeretterjesztő cikk szerzője. *Inflációs kozmológia* címmel *Patkós András*sal közösen egyetemi tankönyvet írtak.

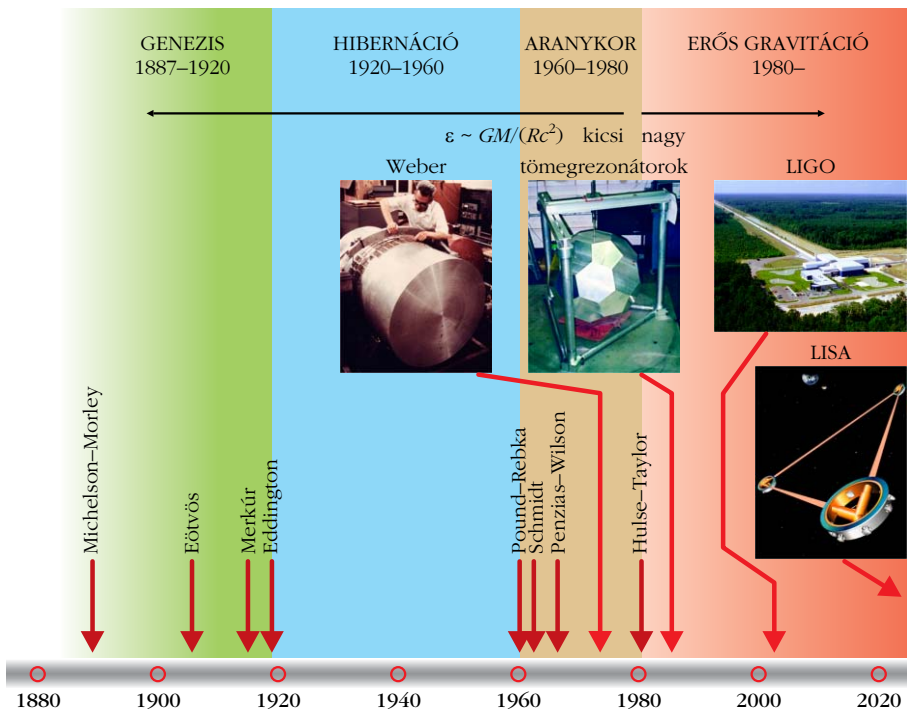


Az elmélet képezi a kozmológia standard elmélete, az ősrobbanás-elmélet alapját is.

A fent említett jelenségek közül számosat már elfogadottnak tekintünk, de például a gravitációs hullámok felfedezése még várat magára. Tekintsük itt át a kísérletileg már igazolt bizonyítékokat, állítsuk azokat időrendi sorrendbe és fizikai rendszerbe, hogy megértsük, milyen valószínűséggel és mikor várható a jövőben egyéb kísérleti bizonyíték. A szakirodalom az elmúlt majdnem egy évszázadot a kísérleti bizonyítékok szempontjából négy elkülöníthető szakaszra osztja: a „genezis” korszakára (1887–1920), a „hibernáció” korára (1920–1960), az „aranykorra” (1960–1980) és az „erős gravitáció” korára, amely 1980 óta napjainkban is tart. Ezt illusztrálандó két tablót is készítettünk (1. és 2. ábra). Az 1. ábrán a genezis és az aranykor néhány kiválasztott fontos mérése van feltüntetve, a 2. ábrán pedig az erős gravitáció korának mérföldkövei láthatók.

Albert Michelson és Edward Morley híres kísérlete 1887-ben arra a megállapításra vezetett, hogy a fény sebessége, függetlenül a mérőeszköz esetleges sebességétől, állandó. A korábbi hiedelemnek megfelelően kellett léteznie valamiféle „éternek”, amelyben a fény terjed. Ha létezett volna ilyen közeg, akkor a közegben állandó lett volna a fény terjedési sebessége. Ehhez az éterhez képest a Föld mozog, és ezért a Földön elhelyezett laboratóriumban ki kellett volna mutatni a fény sebességének irányfüggőségét. Mi-

2. ábra. Az erős gravitáció korában olyan, az általános relativitáselmélet által megjósolt jelenségek nyomát keressük, amelyek esetén a gravitáció erősségére jellemző dimenziótlan $\epsilon = GM/(Rc^2)$ paraméter nagyságrendekkel nagyobb, mint az 1. ábrán felsorolt jelenségek esetén. Bár Joseph Weber gondolata korszakalkotó volt, kísérleti berendezése és mérései nem jártak sikerrel. Korábban tömegrezonátorokkal, ma már inkább lézer-interferométerekkel (például LIGO) keressük a gravitációs hullámok nyomát. Bízva abban, hogy a berendezés zöld utat kap, a LISA (Laser Interferometer Space Antenna) valamilyen formában (eLISA?) egy évtized múlva már az űrből végez majd (ugyan-csak lézer-interferometrikus alapon) megfigyeléseket.



chelson és Morley a rólu elnevezett interferométert használta a kísérlet eszközüül. Minden próbálkozásuk ellenére a jelenség kimutathatatlan maradt. Bár még az 1920-as években is folyt a vita arról, hogy pontosítható-e a kísérlet és valóban kimutathatatlan-e a jelenség, addigra általánosan elfogadottá vált, hogy a speciális relativitáselmélet ad magyarázatot a kísérlet sikertelenségére.

A speciális relativitáselmélet szerint ugyanis a fény sebessége minden inerciarendszerből megfigyelve azonos, függetlenül attól, hogy fény forrása mozog-e valamilyen sebességgel. Michelson és Morley kísérlete, illetve annak negatív eredménye alapvetően hozzájárult a speciális relativitáselmélet megszületéséhez. Bár a speciális elmélet csak inerciarendszerekre igaz, és a gravitációt sem tartalmazza, ennek ellenére szükséges lépcső volt az általános relativitáselmélet 10 évvel később történő megalkotásához. Sőt, mint azt később látni fogjuk, Michelson és Morley eszköze a mai napig meghatározó kísérleti eszköz, és a lézer-interferométeres gravitációs hullám-detektorok ma is az általuk kitalált elvre épülnek.

A speciális relativitáselmélettől az általános relativitáselméletig vezető út egy másik fontos állomása volt az ekvivalenciaelv megértése. Ha valamely test gravitációs erőterében egy megfigyelő egyenletesen gyorsuló mozgást végez, akkor ugyanazt a fizikát fogja tapasztalni, mint egy másik megfigyelő, távol a rá gravitációs erőt kifejtő tömegektől. Ezek az inerciarendszerben lévő (szabadon

eső vagy mozdulatlan) megfigyelők *ekvivalensek*. Mindebből következik egy másik interpretáció. Ha a gravitáció hatása „eltüntethető” azáltal, hogy a koordináta-rendszer szabadesést végez, azaz gyorsul, akkor ezt megfordítva, gyorsulással előidézhető az a fajta hatás, amit a gravitációs vonzóerő hozna létre, még akkor is, ha nincs a közelben tömeggel rendelkező test.

Azt, hogy a fenti hipotézis igaz, Eötvös Loránd segítette megmutatni a róla elnevezett torziós ingával. Eötvös megmutatta, hogy a gravitációs és a tehetetlen (inerciális) tömeg azonos: az a fajta tömeg, amelyet a newtoni egyenletekben a gravitációs erőhatás kiszámításakor használnunk kell, precízen azonos azzal a tömeggel, amit a dinamikát leíró egyenletekben használnunk a gyorsulással megszorozva az erőt kiszámolandó. Eötvös egy olyan ingát szerkesztett, amelyen egy torziós szálon egy

mérleg függött. A mérleg két karján tömegeket helyezt el, különböző magasságokban. A torziós szál elfordulásából, az az által kifejtett erő meghatározásából kiindulva kiszámítható a Föld által „mozgatott” rendszerben a tehetetlen és a gravitációs tömeg.

Megjegyzendő, hogy az 1. ábrán a Michelson–Morley- és az Eötvös-kísérletek (ezek sokáig folytak, de 1905-ben már kellően pontosak voltak, ezért az időskálán ennél az évszámnál tüntettük fel őket) időben megelőzik magát az általános relativitáselméletet. Nem feltétlenül kísérleti bizonyítékok ezek, inkább elengedhetetlen kísérleti előzmények.

A genesis korszakához tartozó, az ábrán szereplő másik két kísérlet sem sokkal tehető 1915 utánra. Sőt, az első, a Merkúr perihélium-elfordulása már az általános relativitáselmélet megszületése előtt ismert volt mint kísérleti tény, csak magyarázat nem volt rá. Az általános relativitáselmélet ismeretében azonnal megérthető a jelenség, ezért az időskálán az általános relativitáselmélet megjelenésének időpontjánál tüntettük fel. A newtoni fizika szerint a Merkúr pályájának olyan ellipszisnek kell lennie, amelynek egyik fókuszpontjában a Nap van, és a pálya mozdulatlan irányú. Ez utóbbi kijelentés úgy fogalmazható, hogy a pálya Naphoz legközelebbi pontja (a perihélium) mozdulatlan helyzetű. Természetesen nagyobb bolygók a pályát precesszióra készítetik, tehát a perihélium elmozdul, de ez ismert, számolható jelenség. A nagyobb bolygók hatását figyelembe véve is azt mutatták a csillagászati mérések, hogy a Merkúr perihéliumának még ismeretlen okból is van elmozdulása.

Einstein megmutatta, hogy ez az addig ismeretlen perihélium-elmozdulás az általános relativitáselmélet segítségével számolható és érthető. Az általános relativitáselmélet és a newtoni fizika predikciói ott különböznek leginkább, ahol a gravitációs erőter, azaz a tér görbülete nagy. A Nap körüli görbült tér mérhetően a legbelső bolygó, a Merkúr pályáját befolyásolja.

Ma, a 21. század elején a gravitációs lencsehatás jól ismert, sokszor és precízen megfigyelt jelenség. Egy évszázada azonban kimutatása technikailag nehéz volt. A legerősebb elhajlást azon csillag fénye szenved el, amelyik közvetlenül a Nap felszíné mentén ér a szemünkbe. Ez csak teljes napfogyatkozás alkalmával figyelhető meg. Eltérülést a newtoni elmélet is jósol, de pontosan feleakkorát, mint amekkora az általános relativitáselmélet szerint adódik. Az elmélet közzétételét nem sokkal követte egy teljes napfogyatkozás, 1919 májusában, amely Dél-Amerikából és Afrikából is megfigyelhető volt. Az angol királyi csillagász, *Arthur Stanley Eddington* is elvégezte a méréseket, és az általános relativitáselmélet által jósolt értéket kapta. A mérés akkoriban a legfontosabb kísérleti bizonyíték volt, és ezt 40 évig nem is követte más hasonló eredmény.

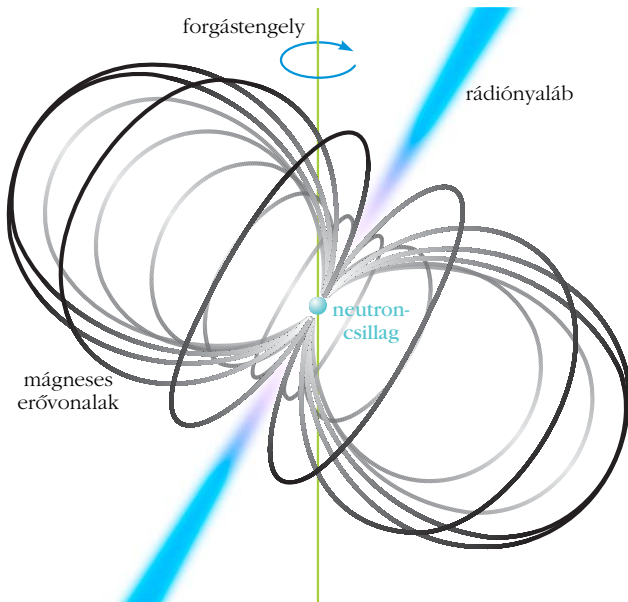
A hibernáció kora 1960-ban ért véget. A *Robert Pound* és *Glen Rebka* által végzett kísérlet, a gravitációs vöröseltolódás kimutatása az utolsó klasszikus ellenőrzésnek tekinthető (a következő mérések már nem laboratóriumban folytak, hanem asztrofizikai

megfigyelések eredményei). A gravitációs vöröseltolódás jelensége annak köszönhető, hogy a foton összes (természetesen megmaradó) energiája a $h\nu$ energiából és az E_{pot} potenciális energiából tevődik össze. Ha a foton elhagy egy mély potenciálgödrt, akkor attól nagy távolságra frekvenciája, ν' , csökken ($h\nu' = h\nu - |E_{\text{pot}}|$), hullámhossza nő, azaz a vörös felé tolódik. Ez igen kis mértékű jelenség, a Nap felszínét elhagyó foton esetén 10^{-6} nagyságrendű. Sokkal nehezebb laboratóriumi körülmények között a Föld felszínén kimutatni.

Pound és Rebka azért járt sikerrel, mert az 1957-ben felfedezett Mössbauer-effektus segítségével a korábbiaknál pontosabb mérést tudott tervezni. A Mössbauer-effektus lényege a következő: ha egy gerjesztett állapotú atom fotont bocsát ki, akkor az atomi átmenethez tartozó energiát veszít. Ezt az energiát azonban nemcsak a foton viszi el, hanem a visszalökődő atom is kap belőle. Ezért a távozó foton energiája nem pontosan akkora lesz, amely az adott atomi átmenethez tartozik, és emiatt azonos atomok ugyanezt a fotont nem tudják újra elnyelni. Ha azonban a foton kibocsátása szilárdtestben történik, akkor a visszalökődésben a teljes szilárd atomi rács vesz részt, amely nagy tömeget képvisel, és ezért a visszalökődéshez tartozó energiahányad zérus (az esetek azon nem elhanyagolható százalékában, amikor fononok sem keletkeznek). Ekkor a kibocsátott foton energiája pontosan az atomi átmenetnek megfelelő, ismert, és azonos atomok el is tudják nyelni (ez a rezonancia a Mössbauer-spektroszkópia alapja).

Pound és Rebka egy mindössze körülbelül 20 méteres távolságon (a Harvard Egyetem egyik épületének alagsora és padlása között) sikerrel mutatta ki azt, hogy az alagsorban kibocsátott foton a Föld gravitációs terében a 20 méter emelkedés után pontosan a gravitációs vöröseltolódásból számolt mennyiségű energiát veszít (a kísérlet végrehajtása során a detektor atomjait egy hangszóró tekercsével rezgették, és ez az extra kinetikus energia akkor, amikor a rezonancia bekövetkezett, akkora volt, mint a 20 méter magasság megtétele miatt előállt helyzetienergia-különbség).

A kvazárok felfedezése *Maarten Schmidt* nevéhez fűződik. 1963-ban rádióforrások tanulmányozása közben ismerte fel, hogy ezek a kvázi-csillagszerű, az égen pontszerű források nagyon nagy távolságban vannak, vöröseltolódásuk jelentős. Ha egy pontszerű forrás fényesnek látszik és távoli is egyszerre, akkor az objektum nemcsak kompakt, de luminozitása hatalmas. Mivel ismerünk változó fényességű kvazárokat is, amelyek fénye egy hónap, de néha egy hét alatt változik, ezért a kauzalitást feltételezve a méretére nagyságrendi felső becslés tehető: $R < t_{\text{per}}c$, ahol t_{per} a fényességváltozás periódusideje. Ha az objektum magreakciók során a belsejében termeli az energiát, akkor Eddington szerint ezen energiatermelésnek – adott tömegű objektum esetén – van egy, a tömegtől függő felső határa. Ha a luminozitás ezt az úgynevezett Eddington-határt meghaladná, akkor az objektumban a tömegtől származó



3. ábra. Pulzár. A mágneses erővonalak mentén kibocsátott rádiónyaláb nem feltétlenül esik egybe a forgástengellyel. A pulzár gyors pörgése következtében a nyaláb az égen egy keskeny tartományon végigsöpör.

gravitáció nem tudna ellentartani a fotonok nyomásának, az objektum megsemmisülne. A kvazárok számolt maximális mérete és az abból származó lehetséges maximális tömeg, az Eddington-határt figyelembe véve, nem teszi lehetővé, hogy akkora luminozitása legyen, mint amekkorát mérünk.

Nyilvánvaló tehát, hogy a kvazárok *nem* magreakciók során termelik energiájukat. A legelfogadottabb elmélet szerint egy központi fekete lyukba befelé áramló, energiát veszítő gázból származhat a kvazár luminozitása. Ebben a folyamatban elképzelhető, hogy a beáramló gáz Mc^2 energiájának akár 10 százalékat is fotonok formájában sugározza ki (a proton-neutron átalakulás során az M tömeg mindössze 7 ezreléke bocsátható ki fény formájában). Így a kvazárok pusztá léte az általános relativitáselmélet (kísérleti) bizonyítékának tekinthető.

Az ősröbbanás elméletének három kísérleti alappilléret szoktuk emlegetni. Ezek a 20. században végrehajtott kísérletek tették elfogadottá az elméletet. Időrendi sorrendben ezek a Hubble-féle tágulás, azaz a Hubble-törvény felfedezése (1930 tájékán); a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás felfedezése (Arno Penzias és Robert Wilson, 1965); illetve a könnyű elemek előfordulási gyakoriságának precíz megmérése (pontos évszám nélkül). Az, hogy az Univerzum

tágul, *Edwin Hubble* óta ismert dolog. Arra azonban, hogy ez valóban nagy forróságú, sűrűségű és nyomású állapotban volt 13,7 milliárd éve, a kozmikus háttérsugárzás léte enged következtetni. Az ősröbbanás dinamikáját, illetve az Univerzum metrikáját az általános relativitáselmélettel le lehet írni, és az így megjósolt, a korai Univerzumból származó háttérsugárzás felfedezése egyúttal az elmélet helyességét is alátámasztja.

Végül a Hulse–Taylor-pulzár az a jelentős kísérleti bizonyíték, amely nem csak az általános relativitáselmélet egyik kísérleti bizonyítéka, de pontosan az a bizonyíték, amely indirekt módon utal arra, hogy gravitációs hullámoknak létezniük kell. Jelen cikksorozat szempontjából ez a bizonyíték nyilvánvalóan fontosabb a többinél.

A pulzár gyorsan forgó neutroncsillagok, amelyek egy nyaláb mentén erős rádióhullámokat bocsátanak ki. A nyaláb irányát a neutroncsillag mágneses tere határozza meg, és ez nem feltétlenül esik egybe a forgástengellyel. Így a keskeny rádiónyaláb a forgás sebességével végigsöpör az égbolt egy meghatározott részén (3. ábra). Ha földi rádióantennáink egy ilyen, a pulzár által végigsöpört tartományra néznek, akkor a pulzár nagy frekvenciával kattogó, „pulzáló” jelet ad a detektorban. Ennek frekvenciája, azaz a pulzár rotációs periódusa a 10^{-3} – 10 s nagyságrendbe esik.

Russell Hulse és *Joseph Taylor* egy kettős rendszerben lévő pulzárt fedezett fel 1974-ben az Arecibo (Puerto Rico) rádiótávcsővel. A pulzár periódusideje 0,59 ms volt. A pulzáló jel érkezési ideje oszcillált, 7,75 óra periódusidővel. Ez arra engedett következtetni, hogy a pulzár távolsága periodikusan változik, azaz a pulzár egy kettős rendszer része. A pályamozgás rövid periódusideje arra utal, hogy a kettős másik tagja is kompakt objektum, feltehetően neutroncsillag. 10 évnyi pontos megfigyelés után Hulse és Taylor megállapította, hogy a pályamozgás periódusideje csökken. Ez a csökkenés évente mindössze 76 mikromásodperc, de kimutatható. Csakis annak köszönhető, hogy a két neutroncsillag pályája szűkül, egymás felé közelednek. Az így felszabaduló energiát minden bizonnyal gravitációs hullámok formájában bocsátják ki. Einstein elmélete alapján kiszámolható, hogy mi a pályabomlás időfüggése. A Hulse–Taylor-kettőspulzár megfigyelése az elmúlt évtizedek során ezt a jóslatot alátámasztotta. Ezzel nemcsak az elmélet kísérleti bizonyítékát szolgáltatta, de mindmáig a legkézzelfoghatóbb evidencia arra nézve, hogy **gravitációs hullámoknak lenniük kell...**



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

**Támogasd adód 1%-ával az Eötvös Társulatot!
Adószámunk: 19815644-2-41**



ATOMERŐMŰVEK AZ ALAPKUTATÁS SZOLGÁLATÁBAN

Pázsit Imre
Chalmers Műszaki Egyetem
Göteborg, Svédország

Az atomerőművek mérnöki-technológiai berendezések, amelyek elsődleges célja az energiatermelés, tehát úgy tűnne, hogy nincs közük az alaptudományokhoz. Azonban, ahogy erre a 2015-ös Nobel-díj is emlékeztetett, legalábbis egy területen nélkülözhetetlen szolgálatot tettek a természet titkainak feltárásában. Ez a terület a neutrínofizika, és speciálisan a neutrínók nullától eltérő nyugalmi tömegének bizonyítása.

Ahogy a *Fizikai Szemle* 2015. decemberi számában közzétett cikkében [1] Király Péter leírta, már a neutrínók kísérleti kimutatása is a Savannah River atomreaktorokból származó neutrínófluxus detektálásával történt, amelyet Frederick Reines és Clyde E. Cowan végzett el 1956-ban. Fent említett cikk szemléletesen és élvezetesen leírja a neutrínók nem-nulla nyugalmi tömegével kapcsolatos elméleti fejtegetéseket és a kísérleti bizonyítékokat, amelyekben így nekünk itt nem kell elmélyednünk. A cikk azt is leírja, hogy a Szuper-Kamiokande és a Sudbury Neutrino Observatory (SNO) mérések, irányérzékeny neutrínódetektorok segítségével, egyrészt a kozmikus sugárzás által keltett müon-neutrínók¹ eltűnését (tau-neutrínóvá való oszcillációját) mutatta ki (Szuper-Kamiokande), másrészt a Naphól jövő elektron-neutrínók müon- és tau-neutrínókká történő átalakulását bizonyította (SNO mérések).

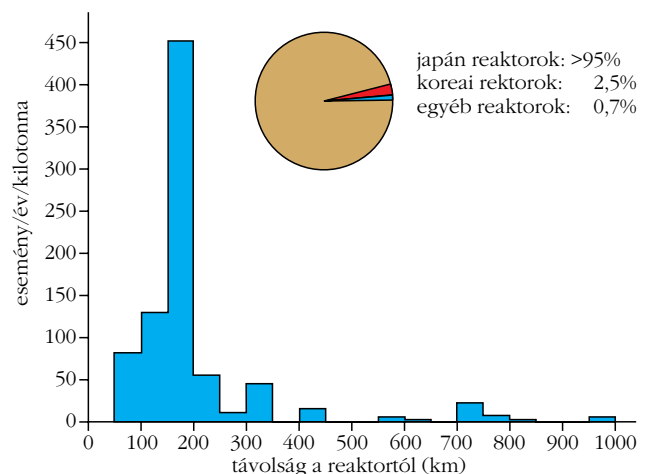
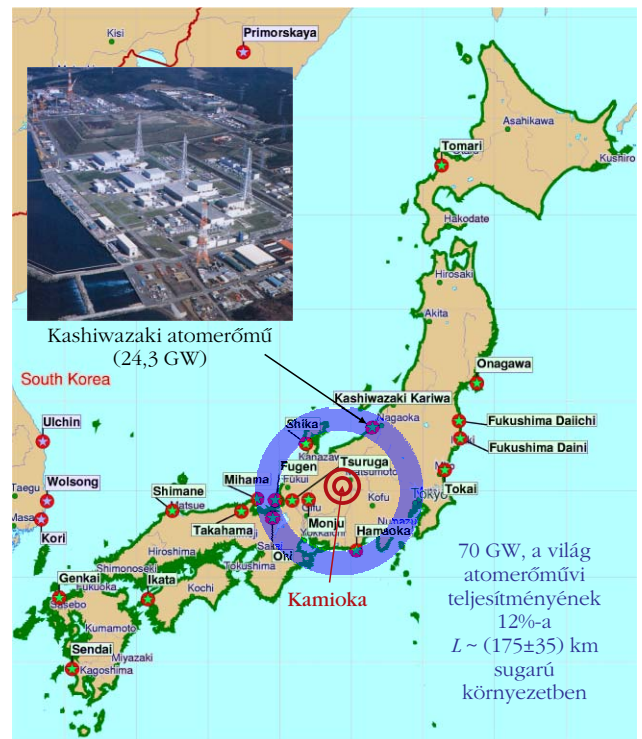
Ezzel a történetnek, jobban mondva a különböző lehetséges neutrínóoszcillációk kimutatását célzó kutatásnak azonban még nincs vége, amiről jelen cikk írójának is vannak – legalábbis közvetett – élményei a benne résztvevő kutatókkal való kapcsolatain keresztül. A kapcsolat oka pedig az, hogy ezen mérésekben atomreaktorokból származó neutrínókat használtak.

A fent említett Szuper-Kamiokande mérésben, amely a müon-neutrínók eltűnését mutatta ki (hiszen a detektor nem volt érzékeny a tau-neutrínókra, amelyekbe a müon-neutrínók „átoszcilláltak”), a detektor felett a légkörben keltett müon- és elektron-neutrínók arányát hasonlították össze a Föld áttelens oldalán keltett, és onnan a detektorba a földgömbön keresztül átjutott neutrínók ugyanazon arányával. Ahhoz, hogy a két adat közötti eltérést kísérletileg ki

lehesen mutatni, a földátmérőnyi távolság megfelelőnek bizonyult.

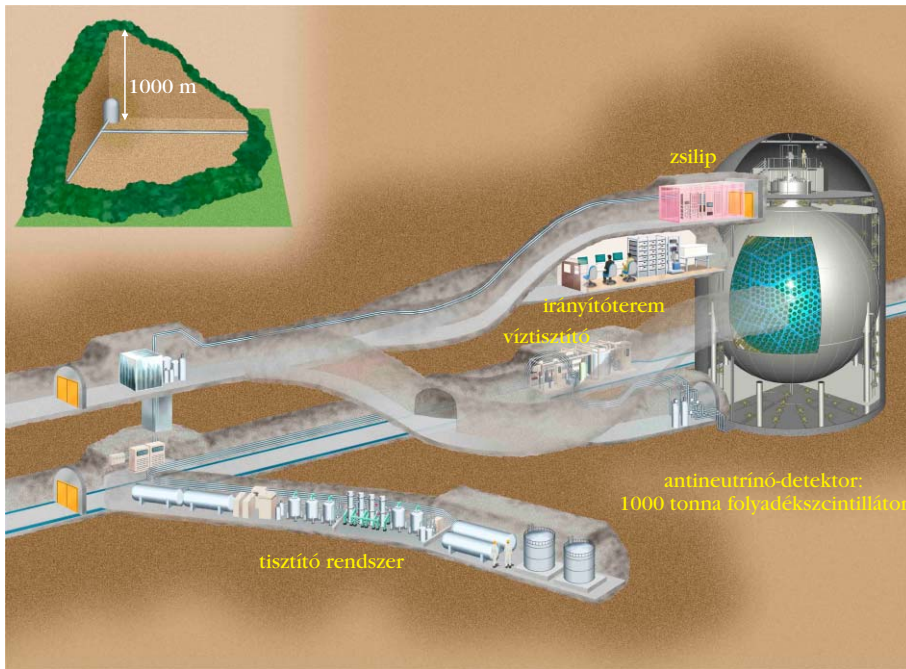
Azonban ahhoz, hogy egy hasonló méréssel az elektron-neutrínók „eltűnését” lehesen kimutatni egyrészt egy „tisza” elektron-neutrínó-forrásra (a kozmikus sugárzás által keltett müon- / elektron-neutrínó

1. ábra. Fölül a Szuper-Kamiokande kísérlet helyszíne Japán fő szigetén (Honsun). Az áttetsző gyűrűn belüli sávban 26, nagy teljesítményű atomerőmű található. Az alsó ábra a KamLAND-ban a reaktorokból jövő átlagosan várható neutrínóesemény-gyakoriságot mutatja, egy évre 1000 tonna detektortömegre normalizálva, a detektortól való távolság függvényében. A kördiagramban a szóba jöhető atomerőművi neutrínóforrások eloszlása látható.



Pázsit Imre az ELTE-n szerzett fizikus oklevelet 1971-ben, majd ugyanitt doktorált 1975-ben. 1985-ben szerezte meg a Fizikai Tudomány Doktora fokozatot. 1991-től a göteborgi (Svédország) Chalmers Műszaki Egyetem Nukleáris Technikai (korábbi nevén Reaktorfizikai) Tanszékének professzora. Kutatási területe a reaktordinamika, a neutronzaj- és a reaktorzaj-diagnosztika, valamint a részecsketranszport-folyamatok. Több mint 200 tudományos publikáció szerzője.

¹ Pontosabban antineutrínók, de az egyszerűség kedvéért a továbbiakban csak neutrínóként hivatkozunk az antineutrínókra is.



2. ábra. A KamLAND detektor elhelyezkedésének vázlata.

tén olyan országokban, amelyek nem ratifikálták a nemzetközi atomsorompó-egyezményeket). Az 50 000 tonnányi vizet tartalmazó, Cserenkov-sugárzást detektáló Super-Kamiokande detektor, amely ugyanúgy, mint kisebb elődje, a Kamiokande detektor, egy Kamioka nevű falu melletti cinkbányában épült ezer méter mélyen. Kamioka a négy fő japán szigetből a központi Honsu sziget közepén fekszik. Ahogy az 1. ábra mutatja, a detektor körülbelül 140–180 kilométeres távolságot lefedő gyűrűben 26 atomreaktor található (az összes japán reaktor fele), közöttük a legnagyobb japán atomerőmű-telephely, a – kis betétábrán is mutatott – hét reaktorblokkal működő –

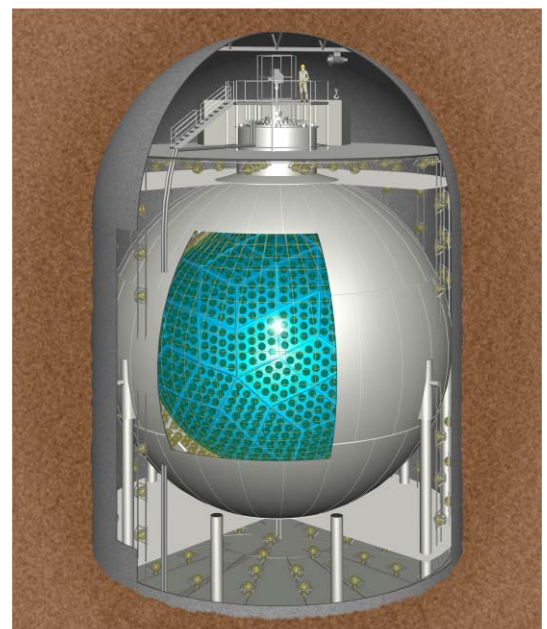
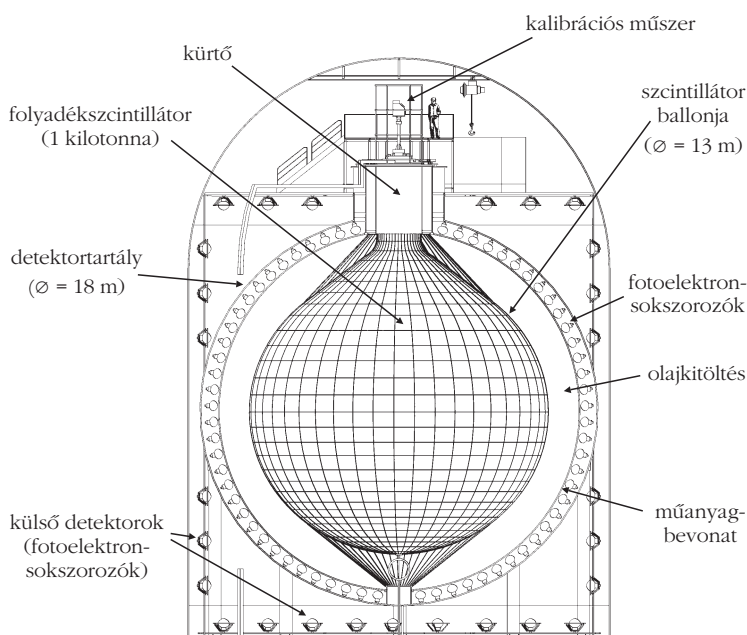
arány 2:1), másrészt a forrás és a detektor között jóval rövidebb távolságra van szükség.

Ez az a pont, ahol az atomreaktorok, mint erős elektron-neutrínó-források, valamint a Super-Kamiokande szerencsés elhelyezése szerepet kapott. Az atomerőművekben keletkező intenzív neutrínófluxus alkalmas mind az elektron-müon-neutrínó-, mind az elektron-ta-neutrínó-oszcillációk vizsgálatára. (Itt közvetlenül megjegyezzük, hogy safeguard-alkalmazások állnak kifejlesztés alatt arra, hogy az atomreaktorokból származó neutrínófluxust a reaktorok üzemeltetésének távolból való monitorozására lehessen használni, főleg „nem deklarált” üzemeltetés ese-

Kasiwazaki erőmű. (A mérések még jóval a fukusimai baleset előtt készültek, amikor a reaktorok még működtek).

Ezekhez az újabb, reaktorneutrínók detektálását célzó mérésekhez a korábbi Kamioka detektor helyére új detektort telepítettek, amit KamLAND-nak neveztek el (Kamioka Liquid Scintillator AntiNeutrino Detector, 2. ábra). A KamLAND detektor 1000 tonna folyékony szcintillációs detektort tartalmaz (3. ábra). Ezzel a detektorral sikerült először kimutatni az elektron- és a müon-neutrínók közötti oszcillációt. Az ezen mérések eredményét közlő cikk, amelyet a kísérleteket vezető *Atsuto Suzuki*, a szendai-i Tohoku Egye-

3. ábra. A KamLAND detektor.



tem professzora és csoportja publikált a *Physical Review Letters*-ben [2], 2004 folyamán a legtöbbet hivatkozott cikk lett (4. ábra). Az a tény, hogy ezen mérésekben az atomreaktoroknak is szerep jutott, már a cikk címében szerepel: *First results from KamLAND: Evidence for reactor antineutrino disappearance* (A KamLAND első eredményei: bizonyíték a reaktor-antineutrínók eltűnésére).

Itt érdemes megjegyezni, hogy a kísérletek értelmezéséhez természetesen megfelelő pontossággal kellett ismerni a várható neutrínóhozamot. Ez nem triviális feladat. Elsősorban folyamatosan, naprakészen ismereni kell, hogy a reaktorok mekkora teljesítményen üzemelnek, amely adat nyilvánosan hozzáférhető. De ez egymagában messze nem elégséges. A neutrínóhozam a reaktorban az üzemelés alatt felhalmozódott hasadási termékek és transzurán elemek mennyiségétől is függ. Ezek már nemcsak hogy nem nyilvánosak, hanem csak speciális, úgynevezett kiegészítő kódokkal való számításokkal határozhatók meg: a reaktor eredeti üzemanyag-tartalmából, az üzemelési paraméterek (elsősorban a neutronfluxus, vagyis a reaktorteljesítmény) állandó követésével iteratív módon követik a reaktorban levő összes izotóp mennyiségének időbeli alakulását. Ráadásul a rendelkezésre álló kereskedelmi kódok, érthető módon, nem dokumentálják az összes, a neutrínómérésekhez szükséges izotóp mennyiségét. Ezért a szendai-i neutrínófizikus-csoport a TEPCO-val (Tokyo Electric Power Company) együttműködésben, a reaktorfizikusok által jól ismert (történetesen éppen svéd kollégáim által kifejlesztett) CASMO és Simulate-3 kódokra alapozva, kidolgozott egy számítási apparátust, amellyel a Kamiokát érő neutrínófluxust valós időben tudták követni [3]. A KamLAND és TEPCO közötti megállapodás szerint a KamLAND kooperáció minden méréshez megkaphatta a szükséges neutrínófluxus-adatot azzal a megköttéssel, hogy azokat kizárólag a neutrínó kutatáshoz használhatják. Ez szép példája az ipar és a kutatók közötti együttműködésnek.

A teljesség kedvéért azonban még hátra volt a harmadik típusú oszcilláció, az elektron–tauneutrínó-oszcilláció kísérleti igazolása (vagy ahogy talán a neutrínófizikusok mondanák, a „harmadik keverési fázisszög” megtalálása). Természetesen ezen oszcilláció kimutatásához is reaktor-neutrínókra volt szükség, azonban ehhez a KamLAND körül található reaktorok túlságosan messzire voltak. A kutatók számára világos volt, hogy ehhez a méréshez a forrásnak jóval közelebb kell lennie a detektorhoz. Ezen a ponton a neutrínófizikusok újra a reaktorfizikusokhoz fordultak, jómagam így kerültem a képbe.

A számos (gyakorlatilag évenkénti) japán látogatásom egyikén, 2005-ben történt, hogy a szendai-i Tohoku Egyetem KamLAND-nál dolgozó neutrínófizikusai, illetve maga a vezetőjük, Atsuto Suzuki professzor megkeresett. A megkeresés egy közös ismerősön, a hozzám hasonlóan reaktorfizikus Kojiro Nishinán keresztül történt. K. Nishina (a híres, Klein–Nishina-formulából jól ismert *Yoshio Nishina* fia), akivel azóta

The World's Highest Citation Rate



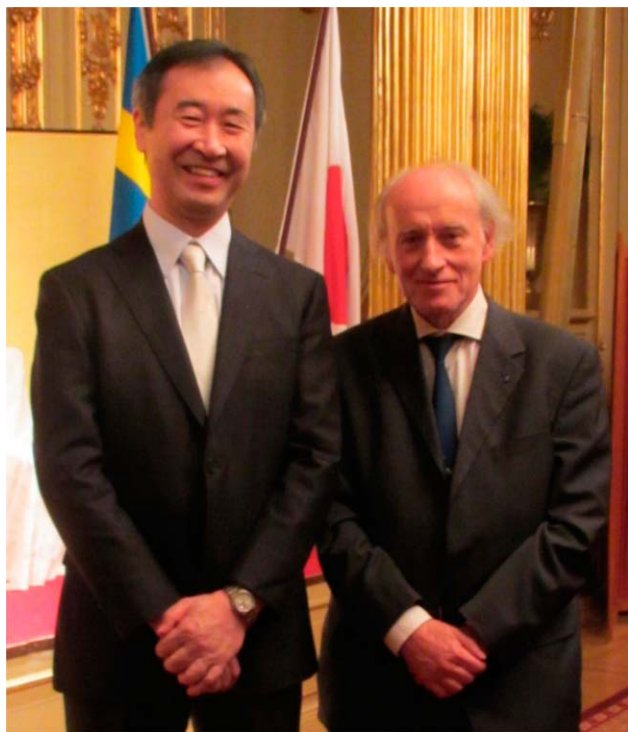
The international research group headed by Prof. Atsuto Suzuki discovered the possibility that a still mysterious particle 'Neutrino' has mass and published a paper entitled "First results from KamLAND: Evidence for reactor antineutrino disappearance" in *the Physical Review Letters*, 17 January 2003. The paper was ranked as the world's best of citations in physics in *the Science Watch*, March/April 2004.

4. ábra. A 2004-ben legtöbbet idézett cikk a fizika területén.

is szoros szakmai és baráti kapcsolatot tartok, volt az első japán utamon a meghívóm és házigazdám a Nagoyai Egyetemen. Atsuto Suzuki professzor, akinek csoportja a második típusú oszcillációkat megtalálta, akkor a Tohoku Egyetem rektorhelyettese volt. Őt akkor az a kérdés foglalkoztatta, hogy miként lehetne egy erős, mozgatható neutrínóforrást találni. A beszélgetés alatt azt kérdezte, hogy speciálisan a neutrínómérésekhez lehet-e mozgatható atomreaktor építeni, amellyel a harmadik típusú oszcillációkat tudnák vizsgálni, illetve kimutatni.

Ötlete az volt, hogy a reaktort a föld alatt kialakított alagútban kellene mozgatni, esetleg függőlegesen, mert a sűrű népességű területeken, mint Japán, a felszíni mozgatás problematikus. Természetesen ez nem volt egy könnyen megválaszolható kérdés. Abban az időben a mostanában egyre növekvő népszerűségnek örvendő és most már legalább a tervezőasztalon létező kis és közepes méretű kompakt reaktorok (angolul SMR, Small and Medium size Reactors) gondolata még a láthatáron sem volt [4]. Azt javasoltam, hogy az akkor koncepcionálisan nagyon felkapott gyorsítóval hajtott szubkritikus rendszerekkel (ADS, Accelerator Driven System) lenne érdemes megoldani a feladatot, mert ezeknek jó biztonsági tartalékaik vannak, és a mozgatás idejére könnyen leállíthatók. Nukleáris meghajtású hajók, mint például tengeralattjárók, jégtörők vagy repülőgép-anyahajók nem kerülhettek szóba, hiszen a távolság még a legközelebbi parthoz is túl nagy volt.

Ilyen formában a KamLAND detektornál közeli nukleáris reaktorokból származó neutrínókkal való mérések nem valósultak meg. A technikai, biztonsági és költségvetési akadályok túl nagynak bizonyultak egy mozgatható reaktor megépítéséhez. A harmadik típusú oszcillációk megtalálásához nem is a neutrínóforrást vitték közel egy már meglévő detektorhoz, hanem detektorokat telepítettek a már működő, nagyteljesítményű reaktortelepek közelébe. Az első sikeres méréseket Kínában végezték 2012-ben, utána pedig Franciaországban, majd Dél-Koreában. Mindhárom esetben reaktorokban keletkező neutrínókon végezték a méréseket. Az első, döntő méréseket a kínai Daya Bay nevű, 6 reaktoregységet tartalmazó erőműnél végezték, ahol hat különböző antineutrínó-detek-



5. ábra. A szerző Takaaki Kajitával, az egyik 2015-ös fizikai Nobel-díjossal (fotó: Pázsit Mária).

tort telepítettek. Azóta még további két detektort telepítettek, és a kibővített műszerezés és hosszabb adatgyűjtési idő kombinációja eredményeként a mérési eredményeket tovább pontosították [5].

A mérésekben a távolság a detektorok és a reaktorok között 500 és 1500 méter között változott. A mozgatható reaktort, amit A. Suzuki akart használni, nem is kellett volna nagy távolságra mozgatni. Mivel az oszcillációs hossz fordítva arányos a két flavorállapotot meghatározóan alkotó tömeg-sajátállapotok tömegkülönbségével, így ez a mérés azt is bizonyította, hogy az elektron–tau–neutrínók oszcillációjában egymásba alakuló domináns tömegállapotok tömegkülönbsége jóval nagyobb, mint a müon–tau- vagy az elektron–müon-neutrínó-oszcillációkban egymásba alakuló állapotoké.

Talán közbevetőleg érdemes azt is megemlíteni, hogy a neutrínók segítenek feltérképezni a földkéregben az urán és a tórium eloszlását és arányát, valamint azt megállapítani, hogy a Föld hőháztartásában milyen szerepet játszanak a Föld belsejében lezajló radioaktív bomlási folyamatok, ahogy ezt *Patkós András* a *Fizikai Szemle* egy korábbi számában leírta [6]. Mivel a „föld-” vagy „geoneutrínók” és a reaktor-neutrínók energiaspektruma különböző, ilyen méréseket korábban is, több helyen végeztek, például az olaszországi Borexino projektben és nem kevésbé a KamLAND-nál is [7]. A fukusimai baleset utáni teljes japán reaktorleállítás lehetőséget ad a KamLAND kísérletben a korábbinál pontosabb geoneutrínó-mérések végzésére [8]. Ezt a helyzetet úgy is jellemezhetjük, hogy az atomreaktorok mind aktívan, mind passzívan, hozzájárulnak a neutrínó kutatásokhoz ☺.

Atsuto Suzukival 2005 óta nem találkoztam, csak egy pár levelet váltottam vele ezen kis írás készítése közben. Viszont 2015. december 8-án meghívást kaptam a stockholmi Japán Követségre, egy fogadásra, amit a két új japán Nobel-díjas tiszteletére adtak. Itt alkalmam volt néhány szót váltani *Takaaki Kajita* professzorral, az egyik 2015-ös fizikai díjazottal (5. ábra), és természetesen a korábbi találkozásom is szóba jött Atsuto Suzukival. Kajita sensei nagy tisztelettel beszélt Suzukiról, mint tanáráról és mentoráról.

Én személy szerint két ok miatt is örültem a japán KamLAND és a kínai Daya Bay mérések sikerének. Egyrészt mivel jómagam is reaktorfizikus lettem; másrészt mivel van némi elméleti/részecskefizikai múltam. Szakdolgozatomat ugyanis az ELTE Elméleti Fizikai Tanszékén, *Montvay Istvánnál* készítettem erős kölcsönhatások területén (a dolgozat címe *SU(6)-szimmetrikus duális rezonanciamodell mezoszórásra* volt). A neutrínók persze gyengén hatnak kölcsön, tehát dolgozatom egy más területen volt. Ennek ellenére, bár ezt a területet rég elhagytam, természetesen örömmel gondolok arra, hogy a mostani működési területem hozzájárulhatott az alaptudományokhoz, és nem utolsósorban annak, hogy a neutrínóoszcillációk kérdése véglegesen eldőlt.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném megköszönni *Patkós Andrásnak*, hogy felkért a kézirat megírására, valamint hasznos szakmai tanácsait és megjegyzéseit. Köszönöm a szakmai lektor hasznos javaslatait. Köszönet illeti Atsuto Suzuki professzort is a KamLAND-os mérésekről adott információkért, valamint a képanyagért és annak a *Fizikai Szemle*ben történő közléséhez való hozzájárulásáért.

Irodalom

1. Király Péter: Kvantumjelenségek kozmikus méretekben: a 2015. évi fizikai Nobel-díj és háttere. *Fizikai Szemle* 65/12 (2015) 420–424.
2. K. Eguchi és munkatársai, közöttük A. Suzuki (the KamLAND Collaboration): First results from KamLAND: Evidence for reactor antineutrino disappearance. *Phys. Rev. Lett.* 90/2 (2003) 021802.
3. Nakajima, K., Inoue, K., Owada, K., Suekane, F., Suzuki, A., Hirano, G., Kosaka, S., Ohta, T., Tanaka, H.: A simple model of reactor cores for reactor neutrino flux calculations for the KamLAND experiment. *Nucl. Instr. Meth. A* 569/3 (2006) 837–844.
4. Pázsit Imre: Új megoldásokkal a fenntartható atomenergetika felé: harmadik és negyedik generációs, valamint kis és közepes méretű reaktorok. *Magyar Tudomány* 2016/2 212–225.
5. F. P. An és munkatársai (Daya Bay együttműködés): New Measurement of Antineutrino Oscillation with the Full Detector Configuration at Daya Bay. *Phys. Rev. Lett.* 115 (2015) 111802.
6. Patkós András: Földneutrínók. *Fizikai Szemle* 62/5 (2012) 157–159. <http://fizikaiszemle.hu/archivum/fsz1205/PatkosA.pdf> és <http://fizikaiszemle.hu/archivum/fsz1205/FizSzem-201205.pdf>
7. T. Araki és munkatársai: Experimental investigation of geologically produced antineutrinos with KamLAND. *Nature* 436 (2005) 499–503.
8. Alexandra Witze: Detectors zero in on Earth's heat. *Nature* 496 (2013) 17.

FELSZÍN ALATTI VIZEK NAPRENDSZERBELI ÉGITESTEK BEN

Takácsné Farkas Anikó – MTA CSFK Csillagászati Intézet és Eötvös Egyetem, TTK
Kiss Csaba – MTA CSFK Csillagászati Intézet

Az űrből nézve Földünk legfeltűnőbb jellegzetességei a csodálatosan kék tengerek és óceánok. A folyékony víz, ami ezeket a tengereket és óceánokat alkotja, az élet alapja a Földön. Szorosabb vagy tágabb kozmikus környezetünkben a Földön kívüli életet kutatva általában a földihez hasonló körülményeket, elsősorban folyékony vizet keresünk. Jelenlegi eszközeinkkel közvetlenül csak a Naprendszer égitestjeit tudjuk vizsgálni. Vannak arra utaló jelek, hogy folyékony víz létezhetett a Marson, azonban biztosak lehetünk benne, hogy jelen pillanatban a Föld az egyetlen égitest a Naprendszerben, aminek felszínén folyékony vizet találunk.

Valóban le kell mondanunk arról, hogy a Naprendszerben az élet számára alkalmas helyszíneket találjunk, ha az élet kialakulásának feltételül mindenképpen a folyékony víz létezését szabjuk? Az égitestek felszíne az egyetlen hely, ahol folyékony vízre számíthatunk?

A belső Naprendszer – a Jupiter pályáján belül – alapvetően „száraz” hely, csak néhány olyan kivételes égitestet találunk, amelyen jelentős mennyiségű víz fordulna elő (szerencsénkre Földünk ilyen). Kifelé haladva azonban – a Jupiter körül és azon túl – a szilárd felszínű égitestek többségének jelentős összetevői a különféle illó anyagok jegei, köztük a vízjég. Ezek az anyagok nemcsak megjelennek a felszínen, hanem nagy valószínűséggel jelentős részben ezek alkotják magukat az égitesteket is. Erre legegyszerűbben az ismert átlagsűrűségekből lehet következtetni, amelyek a külső Naprendszerben jóval alacsonyabbak, mint a belső vidékeken. Ez így van még olyan nagyméretű

égitestek esetén is, amelyeket a gravitáció közel gömb alakúvá tudott formálni, s ezért kizárható, hogy csak a belső Naprendszert felépítőkhöz hasonló kőzetekből álljanak, belsejükben hatalmas üregekkel.

A külső Naprendszer égitestjeinek felszínén nem lehet folyékony víz, részben a légkör hiánya (közel vákuumban a víznek nincsen cseppfolyós halmazállapota), részben pedig az alacsony hőmérséklet miatt. Már a Jupiter távolságában is körülbelül 130 K (–140 °C) lenne egy légkör nélküli égitest felszíni hőmérséklete, ennél távolabb, a Neptunuszon túli vidéken pedig a felszíni hőmérséklet már a 30–50 K tartományában van. A nagyobb égitestek belsejében azonban a hőmérséklet természetesen nem ilyen alacsony. A Föld belsejéhez hasonlóan a Naprendszer égitestjei is minden bizonytalansággal tartalmaznak lassan bomló radioaktív elemeket, ahogyan arra a meteoritok elemzéséből is következtethetünk. Amennyiben egy égitest kialakulásakor a belső hőmérséklet elég magas volt, akkor az égitest differenciálódott, azaz a nehezebb (kőzet)komponensek az égitest középpontja felé süllyedtek, a könnyebb (jég)komponensek pedig az égitest külsőbb rétegeit hozták létre. Az így kialakult kőzetmagban a radioaktív elemek (elsősorban az urán 235-ös és 238-as, a tórium 232-es, illetve a kálium 40-es izotópja) jelentős mennyiségű hőt tudnak termelni. Elegendően nagy kőzetmag esetén ez a hő akkora lehet, hogy a kőzetmag határán a hőmérséklet meghaladhatja a felső jégréteg olvadáspontját, ami egy cseppfolyós halmazállapotú réteg, egy felszín alatti óceán létrejöttéhez vezethet. Ilyen óceánt sejtünk például a Jupiter Europa és Ganymedes holdjainak felszíne alatt. A becslések szerint az itt található víz mennyisége jelentősen meghaladhatja akár a Földön található összes vizét is. A radioaktív bomlás mellett az óriásbolygók holdrendszereiben nagy jelentősége van az árapályfűtésnek is, annak a belső súrlódásból származó hőnek, amelyet az óriásbolygók gravitációs tere okoz a holdak belsejében. Valószínűleg az árapályfűtés a fő hajtó mechanizmusa például a Szaturnusz Enceladus holdján megfigyelhető kriovulkanikus aktivitásnak, ahol a felszín alól folyamatosan anyag, legnagyobb valószínűséggel vízgőz áramlik ki és távozik a Szaturnusz körüli térségbe. (Az Enceladus túl kicsi ahhoz, hogy a radioaktív bomlás egyedül képes legyen elegendő hőt termelni egy felszín alatti folyékony óceán fenntartásához.) A Cassini szonda 2015 októberének végén átrepült a déli sark feletti kifújásokon, így hamarosan azt is megtudhatjuk, hogy valójában milyen az összetétele az innen származó anyagnak.

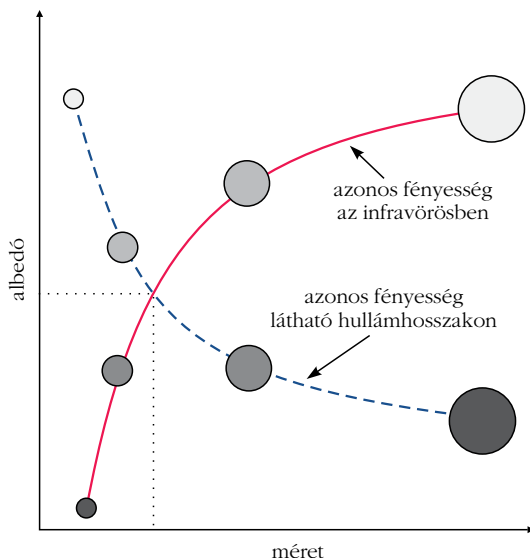
Az óriásbolygók (Jupiter, Szaturnusz, Uránusz, Neptunusz) rendszereiben található holdakat viszonylag jól ismerjük, ezekben a rendszerekben több űrszonda is végzett olyan gravitációs méréseket, amelyekből következtetni tudunk ezen égitestek belső



Takácsné Farkas Anikó ötödéves csillagász MSc hallgató az ELTE TTK-n, 2013-ban szerzett földtudományi szakirányú BSc fokozatot, jelenleg diplomamunkáját írja Kiss Csaba támogatásával a Neptunuszon túli égitestek belső szerkezetének modellezéséből.



Kiss Csaba az MTA CSFK Csillagászati Intézetének tudományos főmunkatársa, a Naprendszerkutató csoport vezetője. Érdeklődési területe elsősorban a Naprendszer kis égitestjeinek – a porszemektől a törpebolygóig – termális infravörös hullámhosszakon történő megfigyelése. 2004 óta vezeti az intézetben a Herschel űrtávcső csoportot.



1. ábra. A radiometriai módszerek működési elve. A látható tartományban észlelt fényességhez különböző méret és albedó tartozhat, ezeket a lehetséges értékeket az ábrán a szaggatott görbe köti össze. Ugyanezen égitesthez az infravörösbeli mérések alapján más méret- és albedókombinációk rendelhetők, ezeket a folytonos görbe pontjai jelölik. A két görbe metszéspontja megadja az égitest valódi méretét és albedóját.

szerkezetére. Legutóbb például a Cassini űrszonda repült el a Szaturnusz Dione, Enceladus és Titan holdjainak közvetlen közelében.

Nemcsak az óriásbolygók holdjai adhatnak otthont ilyen felszín alatti óceánoknak. A Neptunuszon túli térségben található a Naprendszer külső kisbolygó-öve, amelyre általában Kuiper-övként szoktak hivatkozni. Részben erről a vidékről, részben pedig a még távolabbi Oort-felhőből származnak az időnként a Naprendszer belső vidékein, a Föld közelében is megfigyelhető üstökösök, amelyekről tudjuk, hogy nagyrészt fagyott illő anyagokból, ezek között is jelentős részben vízből épülnek fel. Az üstökösöket – leginkább viszonylag kis méretük miatt – csak akkor tudjuk megfigyelni, ha a Nap közelébe kerülnek, de a nagy távolság ellenére ma már majdnem kétezer nagyobb égitestet ismerünk itt, a Naprendszer külső vidékein. Ezek között a jeges égitestek között vannak olyanok is, amelyek elég nagyok ahhoz, hogy belsejükben felszín alatti óceán alakulhasson ki. A legjobb jelöltek erre természetesen a Kuiper-öv legnagyobb képviselői, a külső Naprendszer törpebolygói, a Pluto, az Eris, a Makemake és a Haumea. Ezek közül, hála a New Horizons űrszondának ma már elég jól ismerjük a Pluto rendszerét. A New Horizons mérései alapján nagyon valószínű, hogy a Pluto felszínét ma is aktívan alakítja a kriovulkanikus tevékenység, azaz a felszín alól folyamatosan vagy epizódyszerűen kiáramló anyag. Az itt megfigyelt rendkívül fiatal (5 millió évnél fiatalabb), nagy kiterjedésű, friss „hóval” borított területek valószínűleg ilyen kriovulkanikus események eredményei lehetnek.

Annak megbecsléséhez, hogy a Naprendszer külső vidékein potenciálisan hány égitesten lehet felszín alatti óceán, először is ismernünk kellene ezen égitestek

tek legfontosabb fizikai paramétereit, elsősorban méretüket és tömegüket. Ez általában nem egyszerű feladat, mert a nagy távolság miatt földi távcsövekkel ezeket az égitesteket nem tudjuk felbontani, azok a legtöbb esetben pontszerűnek látszanak – így viszont nem tudjuk eldönteni, hogy ugyanaz a fényesség egy kicsi, de fényes, vagy egy nagy és sötét égitest felszínéről érkezik-e hozzánk (1. ábra).

Egy kisbolygó méretét meg tudjuk határozni csillagfedésekből, azaz amikor az égitest elvonul egy háttércsillag előtt. A fedés időtartamából meg tudjuk mondani, hogy mekkora volt a fedő égitest az átvonulás irányában, hiszen az égitest pályáját és így az átvonulás sebességét ismerjük. Több ilyen „húr” mentén észlelve a fedést, képet kaphatunk az égitest alakjáról is. A csillagfedés nagyon hatékony és izgalmas módszer, de sajnos az ilyen fedések nem igazán gyakoriak, és nehéz is azokat pontosan előre jelezni. Ezért csak kevés, nagyjából egy tucatnyi Kuiper-övbéli égitest méretére vannak csillagfedéseken alapuló információink. A módszerek másik csoportja, amelyeket összefoglalóan radiometriai módszereknek szoktunk nevezni, az égitestek hősugárzását hívják segítségül. Az égitestekre a Naphól érkező fény egy részét az égitest felszíne visszaveri (ezt tudjuk megfigyelni a látható fény hullámhosszain), egy másik részét viszont elnyeli, és hősugárzásként infravörös hullámhosszokon fogja visszasugározni. Míg látható tartományban ugyanazt a fényességet tudja produkálni egy kicsi, de fényes felszínű, és egy nagy, de sötét felszínű égitest, ez az infravörösben éppen fordítva van: egy kicsi és sötét égitest tud ugyanynyi hőt kisugározni, mint egy nagy és fényes, mivel egy fényes felszínű égitest adott nagyságú felületen kevesebb hőt tud elnyelni, mint egy sötét (lásd az 1. ábrát). Tehát, ha az égitest látható fénye mellett hősugárzását is megmérjük, akkor meg tudjuk mondani, hogy mekkora a test átmérője.

A ma rendelkezésre álló legnagyobb adatbázis, amely megbízható méreteket tartalmaz Kuiper-övbéli égitestekre és nagyrészt a Jupiter és a Neptunusz pályája között keringő kentaurokra, a Herschel-űrtávcső mérésein alapul. A „TNOs are Cool” nevű program a Herschel-űrtávcső egyik legnagyobb kulcsprogramja, amelynek keretein belül mintegy 140 égitest méretét és albedóját sikerült meghatározni, ami az ismert Neptunuszon túli égitesteknek mintegy 10%-a. Ezen adatbázis jelentősége nemcsak az, hogy ismerjük az egyedi égitestek méretét, hanem ezek alapján bizonyos populációkban meg tudjuk határozni a méreteloszlást is. A méreteloszlás – ahogyan azt neve is mutatja – arról tájékoztat minket, hogy ha ismerjük valahol például az 1000 km-es égitestek számát, akkor abból meg tudjuk mondani, hogy hány 100, vagy 10 km-es égitestet várhatunk ugyanebben a populációban. A méreteloszlás nagyon fontos jellemzője az egyes kisbolygó-populációk ütközési történetének, azaz hogy mi történt ezekkel a kisbolygókkal a Naprendszer keletkezése óta eltelt 4,6 milliárd év alatt.

Ha az égitestnek kísérője is van, akkor annak pályájából és a keringési időből a rendszer teljes tömege, a méret ismeretében pedig az átlagsűrűsége is meghatározható. Az ilyen ismert kettős rendszerek méret-sűrűség összefüggése alapján az is becsülhető, hogy mennyi egy ismert méretű égitest várható sűrűsége, ha egyébként annak tömegét nem ismerjük. Ezzel a becsléssel az összes ismert méretű égitestre alkalmazhatók a belső szerkezetre vonatkozó modellek.

Az egyedi égitestek belső szerkezetének közelítő meghatározásánál két-, illetve háromkomponensű modellel számolhatunk, attól függően, hogy a legbelső komponens, a kőzetmag határán elegendően nagy-e a hőmérséklet ahhoz, hogy ott folyékony víz létezhesen. Abban az esetben, ha ez a hőmérséklet túl alacsony, akkor a magot szilárd jégkéreg veszi körül, ellenkező esetben a mag és a jégkéreg között az utóbbi anyagából egy felszín alatti óceán alakul ki. Ennek vastagsága adott méretű kőzetmag és jégkéreg esetén is több tényezőtől függhet, egyebek között a jég összetételétől (a vízben oldott egyéb vegyületek csökkentik a jég olvadáspontját), a külső kéregből származó nyomástól, illetve a folyékony rétegen belüli hőátadás módjától, azaz, hogy például milyen áramlások alakulnak ki a felszín alatti óceánban, amelyek meg tudják növelni az óceán felső rétegének hőmérsékletét, ezáltal újabb jégrétegeket olvasztva meg a kéreg anyagából. Ebben a közelítésben egyetlen égitest esetében sem vesszük figyelembe azt, hogy egy esetleges kísérőtől valamekkora árapályfűtés származhat, ennek hatása ugyanis általában jóval kisebb kell legyen, mint az óriásbolygók rendszereiben fellépő árapályerőké.

Bár a felszín alatti óceán becsült tömege bizonyos mértékben függ az óceán összetételétől vagy a hőátadás hatékonyságától, abban minden modell egyetért, hogy a Kuiper-övben jelenleg csak a legnagyobb égitestek belsejében létezhet felszín alatti óceán: a két legnagyobb törpebolygón, a Plutón és az Erisen kívül már a többi, kisebb törpebolygó belseje is túl hideg ehhez. A felszín alatti óceán árapályfűtés nélküli fenntartásához ma a külső Naprendszerben 2000 km-nél nagyobb átmérőjű égitestek esetében van esély. Ezért, ha az összes ismert égitestet tekintjük, akkor ma a legtöbb folyékony vizet az óriásbolygók jégholdjain találhatjuk, legtöbbit valószínűleg a Jupiter Ganymedes holdjának felszíne alatt, ami egymaga több folyékony vizet hordozhat, mint a Föld felszínének teljes vízkészlete (2. ábra). De vajon minden 1000 kilométeres, vagy annál nagyobb égitestet ismerünk a Neptunuszon túli vidéken?

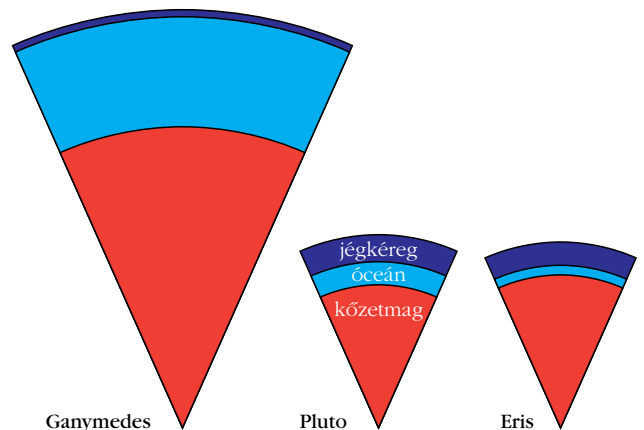
A klasszikus Kuiper-öv a Neptunuszon túli vidék azon része, ahol az égitestek közel gömb alakúak, kis hajlásszögű pályákon keringenek, nagyjából 40-50 csillagászati egység távolságban a Naptól. Ehhez a populációhoz tartozik a Makemake törpebolygó, illetve a Quaoar és Varuna nevű nagyméretű objektumok, amelyek felfedezésükkor a legnagyobb ismert Kuiper-övbéli égitestek voltak. Ezt a populációt vi-

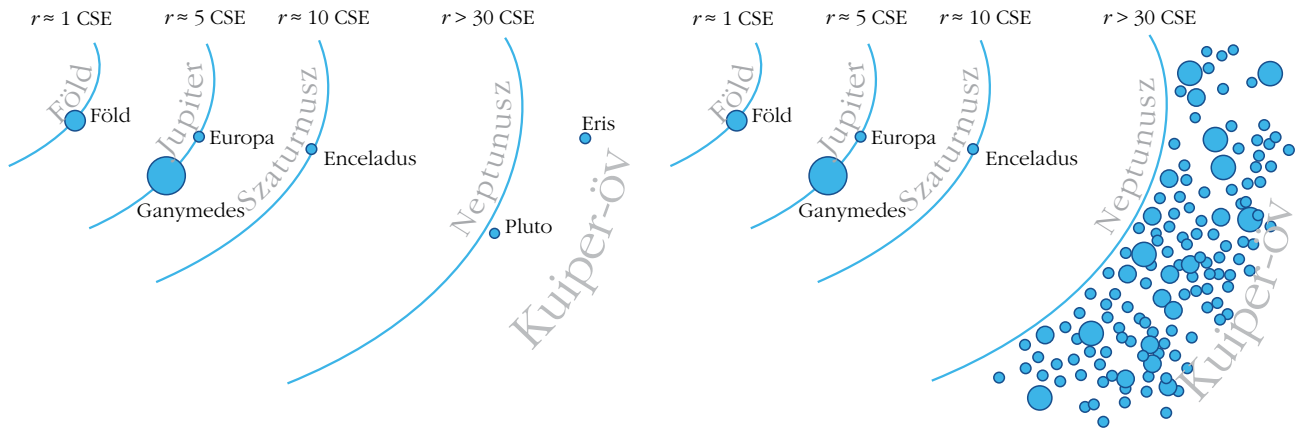
szonylag jól ismerjük, itt viszonylag kicsi az esélye, hogy újabb törpebolygót, vagy akár csak 1000 km átmérőjű, illetve annál nagyobb égitestet fedezzünk fel. Ugyanakkor a Neptunuszon túli vidéken számtalan égitest kering elnyúltabb és nagy hajlásszögű pályákon, a klasszikus Kuiper-övnél távolabb a Naptól – ezek az úgynevezett szórt korong és lecsatolódott populációba tartozó égitestek. Ezek közé tartozik a jelenleg ismert legnagyobb tömegű törpebolygó, az Eris is. A nagy távolság és egyéb kiválasztási effektusok miatt az utóbbi csoportokban még jelentős számban lehetnek felfedezetlen, nagyméretű égitestek. Ezen a külső vidéken a becslések az 1000 km-nél nagyobb égitestek számát több mint százra teszik, a teljes számnak ma nagyjából a tíz százalékát ismerhetjük, így nem elképzelhetetlen több, akár Pluto méretű égitest felfedezése is ezen a vidéken. Azonban, ha figyelembe vesszük ezeket a hiányzó, nagy égitesteket is, a folyékony víz naprendszerbeli súlypontja az óriásbolygók holdjaitól a Kuiper-öv felé tolódik el.

Naprendszerünk körülbelül 4,6 milliárd éves, a Földön is nagyjából 3,5 milliárd évvel ezelőtről vannak bizonyítékaink az élet jelenlétére. Vajon a folyékony vizet abban az időben is hasonló helyeken találhattunk volna, mint manapság?

A korai Kuiper-öv (körülbelül 4-4,5 milliárd évvel ezelőtt) sokkal nagyobb volt, mint ma, tömege körülbelül 100-1000-szerese lehetett a mainak. Ebből következően sokkal több olyan nagy, körülbelül 1000 km-es sugarúnál nagyobb égitest lehetett ebben a korai Kuiper-övben, amiben még ma is valószínű, hogy felszín alatti óceánt találnánk. Ugyanakkor a korai Naprendszer kőzeteiben nagyobb volt a radioaktív hő produkáló elemek gyakorisága is. Egyrészt azokból a hosszú felezési idejű elemekből is több volt, amelyek ma is nagyrészt a Föld és egyéb égitestek belsejének hőjét adják. Másrészt jelen voltak még olyan, rövid felezési idejű elemek is, amelyek mennyisége ma már gyakorlatilag elhanyagolható, de abban az időben jelentős radioaktív bomlási hő szolgáltatott. Ezek figyelembevételével abban az időben

2. ábra. A Jupiter Ganymedes holdja, valamint a Pluto és Eris törpebolygók belső szerkezete egy egyszerű háromkomponensű modell (kőzetmag, felszín alatti óceán, jégkéreg) alapján.





3. ábra. A folyékony víz mennyisége a Naprendszerben a keletkezés után körülbelül 500 millió évvel, a késői nagy bombázás időszaka előtt (bal oldalon), illetve napjainkban (jobb oldal). Ma a folyékony víz legnagyobb része az óriásbolygók jégholdjainak felszín alatti óceánjaiban található, míg 500 millió évvel ezelőtt a Kuiper-öv körülbelül 1000 km-nél nagyobb égitestjeinek belsejében a mai teljes mennyiségének több ezerszerese is lehetett.

nemcsak a körülbelül 1000 km sugarú, hanem a jóval kisebb, körülbelül 500 km sugarú égitestek belsejében is megfelelőek lehetnek a körülmények arra, hogy ott folyékony víz létezhesen a felszín alatt. Ezek az égitestek már elegendően nagyok ahhoz, hogy bennük a differenciálódás végbemehessen. Ebben az időben biztosan nem az óriásbolygók holdjain, hanem a Kuiper-öv égitestjeinek felszíne alatt volt a legtöbb folyékony víz a Naprendszerben, nagyságrendekkel több, mint amennyit ma a Naprendszerben összesen találunk (3. ábra).

A korai Naprendszer dinamikai átrendeződései miatt azonban ezen égitestek többsége már nem található meg a mai klasszikus értelemben vett Naprendszerben. Az egyik legfontosabb folyamat, amely eltávolította ezen égitestek nagy részét, a Neptunusz kifelé migrálása lehetett. A korai Naprendszer modelljei szerint a Naprendszer kialakulásakor a Neptunusz beljebb keletkezett, mint az Uránusz, s csak valamivel később, 3,8-4 milliárd évvel ezelőtt vándorolt mai helyére annak a folyamatnak az eredményeként, amelynek során a Jupiter és a Saturnusz elfoglalta mai helyét (NICE modell). Kifelé migrálása során a Neptunusz szétszórta az akkori, körülbelül 30 CSE távolságban lévő Kuiper-öv égitestjeinek jelentős részét. Ezen égitestek egy kisebb része a Naprendszer belseje felé szóródott, és jelentős számban ütköztek a belső Naprendszer égitestjeivel – ezek az ütközések gyakorlatilag felülírták az addigra már megszilárdult felszíneket. A Föld esetében az erózió és a tektonikus mozgások ennek a közvetlen nyomait már eltüntették, de a Holdon látható kráterek túlnyomó része ebből az időszakból, az úgynevezett késői nagy bombázás időszakából származik. Azok a Kuiper-övbéli objektumok, amelyek nem érték el valamilyen más égitest felszínét, nagyon távolra kerültek eredeti pályájuktól. Egy részüket valószínűleg ma is megtalálhatjuk nagyon távol a Naptól, a Naprendszert több ezer csillagászati egység távolságban körülvevő Oort-felhőben, míg mások örökre kilöködtek a Naprendszerből a csillagközi térbe.

A fiatal Napot körülvevő korongból, amelynek anyagából annak idején a bolygókezdemények és később a bolygók keletkeztek, mára már nagyon kevés maradt – a Naprendszer kisbolygóövei, a Mars és a Jupiter pályája között található fő kisbolygóöv és a Kuiper-öv is e korong maradványai. Tulajdonképpen e törmelékkorong része minden, a nem a nagybolygók rendszereiben keringő kis égitest, így például a Pluto és az Eris is. Az utóbbi két évtizedben, elsősorban az infravörös-űrtávcsöveknek (ISO, Spitzer, Herschel) köszönhetően nagyon sok, elsősorban fiatal csillag körül fedeztünk fel törmelékkorongokat – ezek hasonlóak lehetnek ahhoz, mint amilyen a Naprendszer törmelékkorongja lehetett évmilliárdokkal ezelőtt. Ezekben a törmelékkorongokban, hasonlóan a korai Naprendszerhez, nagy számban lehetnek olyan nagyméretű égitestek, amelyekben kialakulhattak felszín alatti óceánok is. Ma úgy gondoljuk, hogy a csillagok mindegyike körül voltak ilyen törmelékkorongok, bár öregebb csillagok esetében a Földről már nem tudjuk közvetlenül megfigyelni ezeket, mint ahogyan a mi Naprendszerünk törmelékkorongjának megpillantása is rendkívül nehéz lenne egy másik csillag távolságából. Összességében valószínűleg a fiatal törmelékkorongok körülbelül 1000 km-nél nagyobb égitestjeiben találhatnánk meg a legtöbb vizet ma a Tejútrendszerben, ha egyedi csillagokat nézünk.

Bár lakható bolygókat más csillagok körül is keresünk, ha Földön kívüli folyékony vízre vágyunk, akkor, mint ahogyan láttuk, ki sem kell mozdulnunk a Naprendszerből. Az exobolygók kutatása mellett az óriásbolygók holdjai és a Kuiper-övbéli legnagyobb objektumok a legjobb jelöltek arra, hogy folyékony vizet és talán az élet alkotóelemeit is megtaláljuk ezeken a helyeken. Jelenleg két olyan űreszköz is tervezés, illetve építés alatt van – a NASA Europa, illetve az ESA JUICE űrszondája –, amelyeknek a Jupiter holdrendszere és elsősorban annak Europa holdja áll a célkeresztjében. Ezek missziók célja többek között az, hogy a holdak belső szerkezetét megismerhessük, és képet kaphassunk például a felszín alatti víz mennyiségéről is, várhatóan valamikor a 2030-as évek elején.

Az Europa esetében biztosra vehetjük a felszín alatti óceán létezését, és ebben az esetben azt is tudjuk, hogy a felszín alatti óceán kapcsolatban van a felszínnel, onnan ugyanis jól látható anyagáramlás történik a felszínre. Így belátható időn belül közel kerülhetünk olyan világokhoz, ahol akár a miénkhez hasonló, víz alapú élet is kialakulhatott. A Kuiper-övbeli nagy égitestek (Pluto, Eris) esetében hasonló, kriovulkanikus

folyamatokat látunk, bár a nagyobb naptávolság (így alacsonyabb hőmérséklet) és az eltérő összetétel miatt minden bizonnyal más kémiával. Bár a nagy távolságok miatt a Kuiper-öv égitestjeinek vizsgálata jóval nehezebb, mint a Jupiter holdrendszeréé, a távolabbi jövőben ezek hasonlóan fontos szerepet játszanak majd a Földön kívüli élet kutatásában, mint ma a Jupiter holdjai.

A FIZIKA TANÍTÁSA

FÖLDRAJZI HELYMEGHATÁROZÁS A NAP SEGÍTSÉGÉVEL

Nyirati László

Széchenyi István Műsz. Szakközépiskola, Székesfehérvár

A földrajzi szélesség, hosszúság koordinátáit határozzuk meg egy pálcá, pontos óra és táblázatok segítségével. Szükséges kiegészítő eszköz még függőön és vízszintező (libella, vízmérték, okos telefon vízszintezője), valamint hosszúságmérő eszköz.

Az adott földrajzi helyen a vízszintes talajra merőlegesen leszúrunk egy egyenes pálcát. Dél környékén rövid időközönként megjelöljük a pálcá árnyékának végpontját. A legrövidebb árnyékhosszt, az ahhoz tartozó zónaidőt, dátumot és a pálcá hosszát tekintjük a mérés adatainak. Ezekből határozzuk meg a földrajzi szélességet és hosszúságot. A számításhoz korrekciókat kell alkalmazni, amelyek a csillagászati fogalmak alapján táblázatok segítségével tehetők meg.

Az alábbiakban először azokat a földrajzi és csillagászati fogalmakat tárgyaljuk, amelyek a végrehajtott méréseket megalapozzák. Feltételezem, hogy az olvasók többsége jól tájékozott bennük, de nem foglalkozik naponta a témával. Ha úgy érzi nem fontos végigolvasni a meghatározásokat, lapozzon a *Mérés végrehajtása* fejezetre!

Földrajzi és csillagászati fogalmak

Tekintsük át azokat a földrajzi, csillagászati fogalmakat, és természettörvényeket, amelyek alapján a számításokat végezzük.



Nyirati László matematika-fizika szakos tanár 1972-ben végzett az ELTE-n. Később a BME Villamosmérnöki karán is szerzett diplomát, majd a Kossuth Lajos Tudományegyetemen informatika tanári végzettséget. Székesfehérváron tanít, többnyire középiskolában, de 1995-től 2007-ig a Kodolányi János Főiskola Informatika tanszékén dolgozott. 2008 óta nyugdíjas, jelenleg óraadó tanár.

Földrajzi helytől független meghatározások

Kepler I. törvénye szerint a bolygók ellipszispályán keringenek a Nap körül, a pálya egyik fókuszában a Nap áll.

Kepler II. törvénye szerint a vezérsugar (a Napot a bolygóval összekötő egyenes) egyenlő idők alatt egyenlő területeket sűrol.

(A két törvény miatt a Föld nem állandó nagyságú sebességgel halad a pályáján.)

Ekliptika: a Föld ellipszispályájának síkja. A Nap mindig az ekliptika síkjában van.

A Föld forgástengelye nem merőleges az ekliptika síkjára, hanem azzal 66,5 fokos szöveget zár be.

Az adott földrajzi helyre vonatkozó meghatározások

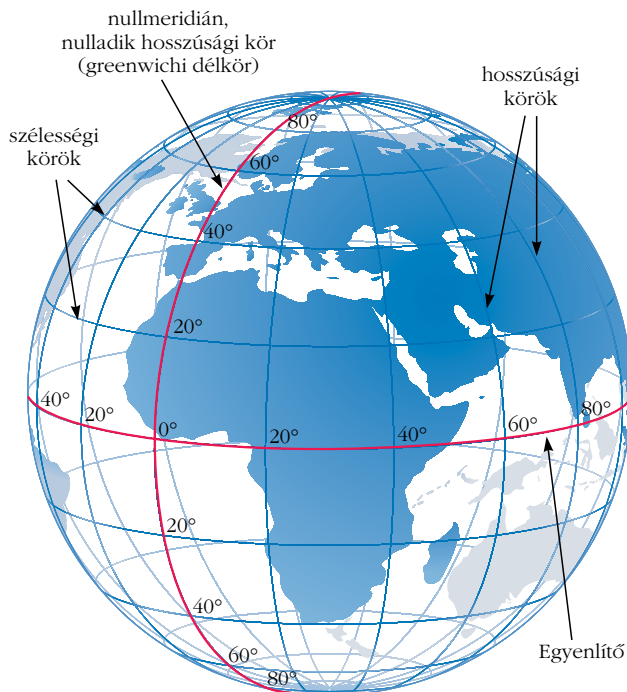
Horizont: a gömb alakú Föld egy adott pontján körbenézve a távolban az adott ponthoz tartozó horizontot látjuk vízszintesen. A horizont a Föld adott pontján a földgömbhöz illesztett érintősík.

A horizontra merőleges egyenes a fejünk felett kijelöli a *zenit*-t, talpunk alatt a *nadír* pontokat.

Gnomon: a zenit és nadír vonalában álló, földbe szúrt pálcát gnomonnak nevezzük.

A földrajzi koordináták, amelyeket meg szeretnénk határozni, a *földrajzi hosszúság* és *szélesség*. Mindkettőt fokban mérjük. A Földre egy hálót képzelünk el (*1. ábra*). A háló fonalai kétféle gömbi körből állnak. Észak–déli irányban gömbi főkörök, kelet–nyugati irányban egyre kisebb sugarú, a forgástengelyre merőleges síkú körök alkotják a hálót. Az észak–déli irányban haladó köröket *délkörnek*, ezek síkját *meridiánnak* nevezzük.

A földrajzi hosszúság: két délkör által meghatározott szög. Az egyik délkör a Greenwichi csillagvizsgálón (*2. ábra*) áthaladó délkör (prime meridian vagy nullmeridián), a másik pedig az adott földrajzi helyen áthaladó. A hosszúságot tehát Greenwich-hez képest mérjük, az

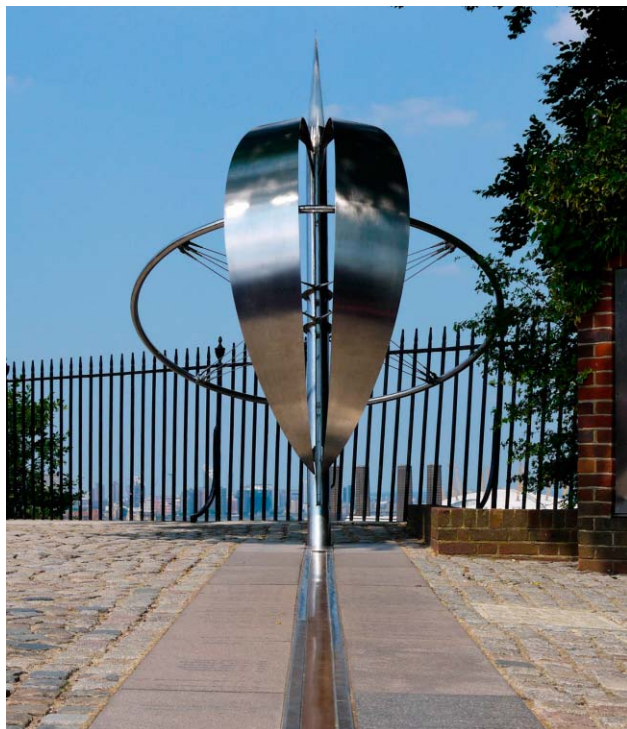


1. ábra. Földrajzi koordináta-rendszer [1].

Északi sarkról nézve az óramutató járásával ellentétes irányban, vagyis kelet felé tekintjük pozitívnak.

Földrajzi szélesség: a sarkcsillag, illetve az északi pólus magassága határozza meg fokokban. Az Északi pólus iránya és helye az égbolton az adott földrajzi helyen (egy adott szélességi körön) azonos a nap minden szakában. Az északi pólus összeköti a déli pólussal a Föld forgástengelye. Az északi pólus magasságát a horizonthoz viszonyítva mérjük.

2. ábra. Greenwichi nullmeridián szobra [2].



Egyenlítő: a 0 szélességi kör a szélességi körök közötti egyetlen főkör. Az egyenlítő síkja az equator (*ekvátor*). Ennek minden pontján a horizont síkja a Föld tengelyével párhuzamos.

Északi és déli sark: ha az Északi sarkon állunk a szélességi szög 90° , a Déli sarkon -90° .

Magyarországon a földrajzi szélesség $47-48^\circ$. Ennek megfelelően az egyenlítő síkját $42-43^\circ$ -ban képzelhetjük el a horizonthoz képest.

Az 1. ábra szerint szemléletesebb, ha a földrajzi szélességet úgy határozzuk meg, hogy a Föld középpontjából az adott földrajzi helyhez egy sugarat húzunk. E sugár egyenlítő síkjával bezárt szöge a földrajzi szélesség.

Az időre vonatkozó meghatározások

Helyi dél: az az időpont, amikor a Nap középpontja áthalad a helyi meridiánon. A helyi meridián – az eddigiek szerint – az a sík, amely átmegy az északi és déli póluson, valamint a helyi zeniten és nadíron. Vagyis az észak–dél pólusok, valamint a zenit–nadír egyenesei által kifeszített sík. (Az Északi és Déli sarkon nem értelmezhető a meridián.) A Nap ekkor az aznapi pályája legmagasabb pontján helyezkedik el. Ez az időpont a greenwichi helyi délhez képest annyi-vel tolódik el, mint amennyi idő eltelt addig, amíg a Föld annyi fokot fordul el, mint amennyi a földrajzi hosszúságunk Greenwich-hez képest.

A hosszúság meghatározásához azonban nem csak a helyi dél fogalmával, hanem a középnap hosszával, a csillagidő hosszával, valamint a zónaidővel is tisztában kell lennünk.

Zónaidő: a helyi dél pontról pontra változik. Greenwich jelenti a viszonyítási pontot. Tőle keletre a helyi dél előbb, tőle nyugatra a helyi dél később következik be. $360^\circ/24 = 15^\circ$ -kal keletre egy óra eltérés mutatkozik, újabb 15° további egy óra. Azért, hogy nagyobb területeken azonos órával lehessen mérni az időt, bevezették a zónaidő fogalmát. UTC-nek nevezik az egyezményes koordinált világidőt, UTC+1 az ettől keletre levő első zónához rendelt idő. Az azonos zónaidőkben tehát az órák együtt járnak, zóna átlépésekor órákat kell igazítani egy órával előre vagy hátra. Az óráknak tehát a zónaidőt mutatja. A Greenwich-hez tartozó zónaidő azonos a világidővel.

Csillagnap: az az időtartam, amíg a Föld egyszer megfordul a csillagokhoz képest. A Föld körülbelül 365 nap alatt kerüli meg egyszer a Napot. Amíg a Föld egyszer megfordul a tengelye körül a csillagokhoz képest, addig a pályáján körülbelül 1 foknyival előrébb halad. A Naphoz képest tehát még 1 fok fordulás szükséges, ami körülbelül 4 percnyi időtartam.

Szoláris nap: amíg a Föld a Naphoz képest egyszer megfordul a tengelye körül. Mint láttuk a csillagnaphoz képest körülbelül 4 perccel hosszabb. (Azt, hogy a 4 perccel milyen időszámításhoz tartozónak vesszük, fedje homály.)

Kepler törvényei szerint a bolygók a Nap körül ellipszis pályán keringenek, valamint a területi sebes-



5. ábra. Budapesti analemma – a második magyar analemmafotó – Soponyai György 34 napkorongból álló fényképén. A szerző minden alkalommal két felvételt készített – pontban reggel 8 órakor (nyári időszámítás idején 9-kor) –, egyet teljesen alulexponálva, amin csak a Nap korongját lehet látni és egy normál expozíciós idejűt, amin az épületek is kivehetők. A bal oldalról beúszó felhőkkel készült felvétel teszi teljessé a képet [5].

gőn a nyolcas mentén elcsúsznak. A Föld ellipszispályája miatt egyéb eltérések is adódnak, amelyek másod- vagy harmadrendűen kicsinyek. Csak elhanyagolható hibát vétünk, ha a földrajzi (0,0) ponthoz tartozó déli analemmát használjuk.

Ennek megfelelően egy rúd, amely vízszintes felületbe merőlegesen van betűzve, (zenit–nadír irány) a legrövidebb árnyékot veti a helyi délben. A legrövidebb árnyékhoz tartozó időpont a földrajzi hosszúságot, az árnyék és a rúd hosszának aránya pedig a földrajzi szélességet határozza meg. Az analemma alapján a dátumnak megfelelő értékekkel korrigálnunk kell.

A mérés végrehajtása

Delelés előtt, körülbelül 30 perccel kezdjük megfigyelni a gnomon végpontjának árnyékát. Néhányszor megjelöljük az árnyék helyét, feljegyezve az aktuális időpontot. Körülbelül 5 percenként érdemes a pontokat felvenni. Az egyes pontok egy enyhén görbülő íven vagy egy egyenesen helyezkednek el. Az árnyékok hossza egy darabig rövidül, majd hosszabbodik. Próbáljunk a legrövidebb árnyék előtt és után minél több pontot felvenni. Amikor elegendően sok pontunk van, kössük össze a gnomon talppontját a bejelölt pontokkal, és mérjük meg az így kapott vonalak hosszát. Ábrázoljuk grafikonon az egyes hosszakat a bejelölés időpontjának függvényében. Egy parabolaszerű görbét kapunk, amelynek van egy minimumpontja. Az ehhez tartozó időpont a helyi dél, az árnyék hossz és a gnomon hosszának aránya pedig a Nap deklinációját határozza meg. Tehát a legrövidebb árnyék hossza, ennek időpontja és a gnomon hossza

a mérési adat. E három adat kell a hely meghatározásához, a többi az analemmáról leolvasható.

Ha Magyarországon, illetve a CERN területén végezzük el a mérést, akkor az 1. táblázatban szereplő adatok várhatóak. Az értékeket a Google térképről vettük.

A táblázatból látható, hogy például Debrecen és Szombathely közötti hosszúsági adatok között körülbelül 5° a különbség, ami a delelési időpontokban 20 percnyi különbséget jelent. Várható, hogy mérési módszerünkkel ekkora különbség kimutatható.

Számítások a méréshez

Legyen h a gnomon hossza, l annak legrövidebb árnyéka, t a legrövidebb árnyékhoz tartozó zónaidő értéke UTC+1 esetén, továbbá Eot a hosszúsági és $Decl$ a szélességi korrekció, valamint φ a földrajzi szélesség és λ a földrajzi hosszúság.

A földrajzi szélesség meghatározása:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{l}{h}\right) + Decl.$$

A földrajzi hosszúság meghatározása:

$$\lambda = 30 - \frac{t - Eot}{4}.$$

Megjegyzés: a szakirodalomban helyenként néhány téves állítás található. Például a gnomon árnyékának végpontjait egyenes vonalnak tekintik, ez csak az őszi, és tavaszi napéjegyenlőség idejében igaz, napforduló idején attól lényegesen eltér.

| 1. táblázat | | |
|------------------------------------------------------|---------------|---------------|
| Egyes helységek középpontjának földrajzi koordinátái | | |
| helységnév | szélesség (°) | hosszúság (°) |
| CERN (Svájc) | 46,2350 | 6,0472 |
| Szombathely | 47,2143 | 16,6127 |
| Siófok | 46,9006 | 18,0251 |
| Budapest | 47,4985 | 19,0402 |
| Debrecen | 47,5515 | 21,6217 |
| Békéscsaba | 46,6794 | 21,0829 |
| Pécs | 46,0755 | 18,2266 |
| Gönc | 48,4743 | 21,2685 |
| Székesfehérvár | 47,1929 | 18,4116 |

A 2014. évi CERN-i tanulmányút előtt, alatt és után végzett mérések

| a mérés ideje és helye | | | a gnomon magassága és árnyékhossza | | a számolt földrajzi hosszúság és szélesség | | mérte |
|------------------------|-------------|------------------|------------------------------------|----------|--------------------------------------------|---------------|----------------------|
| dátum | t (h:m:s) | helyszín | b (mm) | l (mm) | λ (°) | φ (°) | |
| 06. 16. | 12:52:00 | Siófok | 906 | 420 | 17,25 | 48,37 | Nyirati László |
| 06. 21. | 12:33:00 | Székesfehérvár | 703 | 318 | 22,25 | 47,84 | Nyirati László |
| 06. 28. | 12:51:00 | Székesfehérvár | 672 | 300 | 18,08 | 47,06 | Nyirati László |
| 07. 01. | 12:50:00 | Székesfehérvár | 1272 | 569 | 18,48 | 47,10 | Nyirati László |
| 07. 07. | 12:59:45 | Siófok | 475 | 203,7 | 16,31 | 46,21 | Nyirati László |
| 07. 07. | 12:32:00 | Debrecen | 964 | 452 | 23,25 | 48,12 | Páles Hajnalka |
| 07. 17. | 12:43:00 | Budapest | 203 | 84 | 20,75 | 43,48 | Síkhegyi Gabriella |
| 07. 18. | 12:43:00 | Budapest | 199 | 106,5 | 20,75 | 49,15 | Síkhegyi Gabriella |
| 07. 18. | 12:43:00 | Budapest | 299 | 143 | 20,75 | 46,56 | Síkhegyi Gabriella |
| 07. 25. | 12:57:00 | Siófok | 412,5 | 198,6 | 17,41 | 45,15 | Nyirati László |
| 08. 09. | 12:42:00 | Fegyvernek | 1027 | 604 | 21 | 51,46 | Somogyi Tamás |
| 08. 14. | 12:36:00 | Hódmezővásárhely | 192 | 112 | 22,17 | 44,26 | Simon Tibor |
| 08. 18. | 13:27:00 | Rajna vízesés | 415 | 259,3 | 9,30 | 45,30 | csoport ¹ |
| 08. 23. | 13:35:00 | Aiguille du Midi | 362 | 228 | 6,72 | 43,51 | csoport ¹ |
| 08. 23. | 13:35:00 | Aiguille du Midi | 288 | 186 | 6,81 | 44,17 | csoport ¹ |
| 08. 23. | 13:35:00 | Aiguille du Midi | 415 | 273,5 | 9,41 | 44,70 | csoport ¹ |
| 08. 28. | 12:48:00 | Csongrád | 192 | 145 | 18,31 | 46,64 | Simon Tibor |
| 08. 30. | 12:41:00 | Kecskemét | 508 | 387 | 19,75 | 46,16 | Szijártó Sándor |

¹ A csoport tagjai: Nyirati László, Páles Hajnalka, Síkhegyi Gabriella, Simon Tibor, Somogyi Tamás, Szijártó Sándor és Zubonyainé Pelka Zsuzsanna.

Méréseinket a CERN tanulmányúttal kapcsolatban végeztük. Csoportunk sok mérést hajtott végre. Közmegegyezéssel döntöttünk, hogy aki csak tud, mér egyet indulás előtt, mérünk útközben és mérünk az Aiguille du Midi hegyen, valamint a megérkezés után. Többen családtagjaikat is bevonták. A kapott mérési eredményeket közös jegyzőkönyvbe foglaltuk, az eredményeket időrendben helyeztük el.

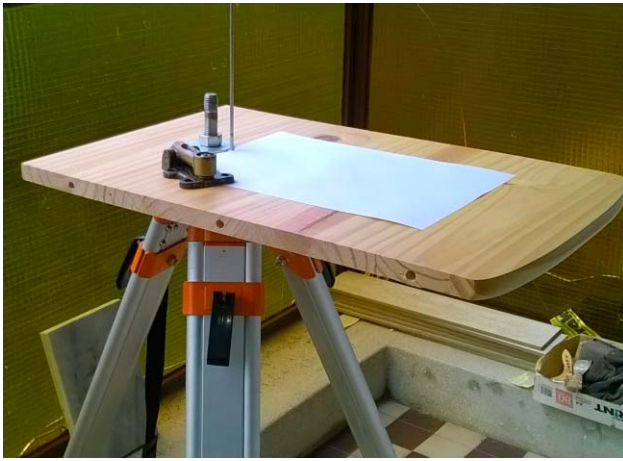
A 2. táblázat alapján a számítások ellenőrizhetők, ha a dátumhoz tartozó korrekciókat is figyelembe vesszük. A dátumokhoz tartozó analemmaértékek megtalálhatók a hivatkozási lista honlapjai között [6, 7].

A mérési eredményekhez hibaszámítást nem mellékelünk, mert csak egy esetben végeztünk egyszerre több mérést. Statisztikus hibaszámításnak csak abban az esetben van értelme, ha azonos műszerrel, hasonló körülmények között végzünk méréseket. Legtöbb esetben csak a mérés elve volt azonos, de a kiértékelésre (például a legrövidebb árnyék meghatározására) nem használtunk közös eljárást. A mérések pontosságát azonban elég jól szemlélteti egy olyan táblázat, amely az általunk kapott értékek eltérését mutatja a Google térképről leolvasható, pontos adatoktól (3. táblázat).

Síkhegyi Gabriella gnomonját a 6. ábra mutatja. Nyirati László CD-ből készült, hordozható mérőeszköze a korábbi, siófoki méréskor a 7., míg az Aiguille

A mérések pontosságának szemléltetése

| mérés dátuma | pontos földrajzi hosszúság és a mért érték eltérése | | pontos földrajzi szélesség és a mért érték eltérése | |
|--------------|-----------------------------------------------------|---------------------|-----------------------------------------------------|---------------------|
| | λ_{google} (°) | $\Delta\lambda$ (°) | φ_{google} (°) | $\Delta\varphi$ (°) |
| 2014. | | | | |
| 06. 16. | 18,025 | -0,78 | 46,9006 | 1,47 |
| 06. 21. | 18,4116 | 3,84 | 47,1929 | 0,65 |
| 06. 28. | 18,4116 | -0,33 | 47,1929 | -0,14 |
| 07. 01. | 18,4116 | 0,07 | 47,1929 | -0,09 |
| 07. 07. | 18,2 | -1,89 | 46 | 0,21 |
| 07. 07. | 21,6217 | 1,63 | 47,5515 | 0,57 |
| 07. 25. | 18,025 | -0,61 | 46,9006 | -1,75 |
| 08. 09. | 20,53 | 0,47 | 47,24 | 4,22 |
| 08. 14. | 20,38 | 1,79 | 46,41 | -2,15 |
| 08. 18. | 8,61 | 0,69 | 47,67 | -2,37 |
| 08. 23. | 6,92 | -0,2 | 45,92 | -2,41 |
| 08. 23. | 6,92 | -0,11 | 45,92 | -1,75 |
| 08. 23. | 6,92 | 2,49 | 45,92 | -1,22 |
| 08. 28. | 20,15 | -1,84 | 46,71 | -0,07 |
| 08. 30. | 19,67 | 0,08 | 46,9799 | -0,82 |



6. ábra. A Budapesten készült mérőeszköz, használva július 1-jén.

de Midi hegyen használva a 8. ábrán található. Látható, hogy a július 25-én végzett mérés árnyékpontsora görbül, az augusztus 23-i pedig kevésbé.

Külön említést érdemel, hogy a legrövidebb árnyék időpontját miképp határozzuk meg. Több eljárás is lehetséges. Például a várt időpont környékén sűrűn mérünk és vesszük a legrövidebbhez tartozó időpontot. Szokás az úgynevezett indiai körök módszerét alkalmazni: szimmetrikusnak feltételezve kiválasztunk két, elég távoli, a legrövidebb árnyékhoz képest jobb és bal oldalon levő, azonos hosszúságú árnyékot, ezek szögfelezője határozza meg az észak–déli irányt.

Számítástechnikai eszközöket használva jól működő módszer az alábbi.

Az excel táblázatkezelő solver eszközét használjuk. Felvesszük a táblázatba a mért adatokat. Például a 7. ábra mérési eredményeit. A jobban látható grafikon érdekében a független változót, az időt percben adjuk meg és a 12 óra 00 perc lesz a zéró pont. A függő változó az időhöz tartozó árnyék hossz (4. táblázat), a mérés grafikonja a 11. ábrán látható.

A grafikon pontjait az

$$y = ax^2 + bx + c$$

9. ábra. Mérés Síkhegyi Gabriella kétgnomonos készülékével az Aiguille du Midin.

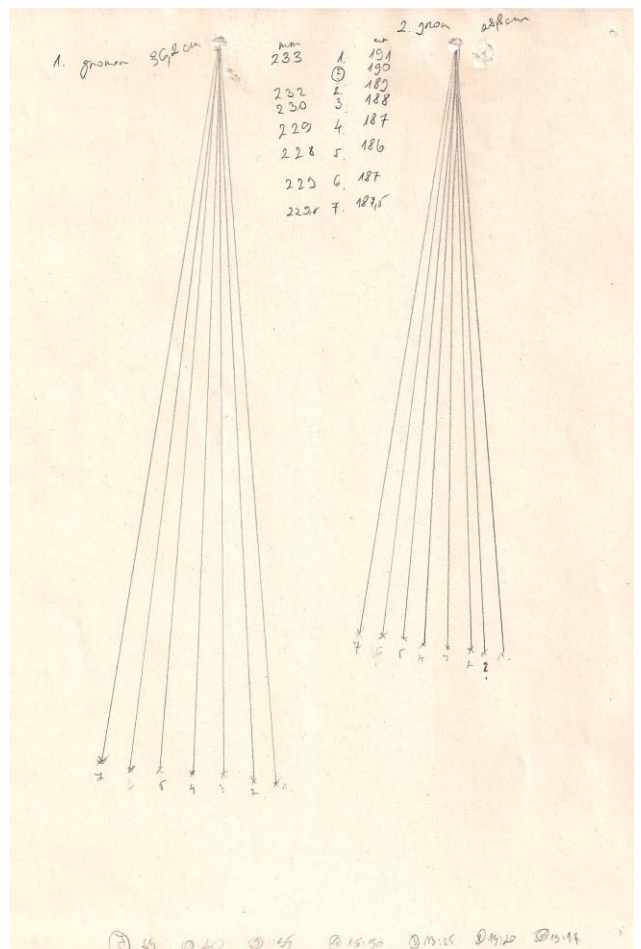


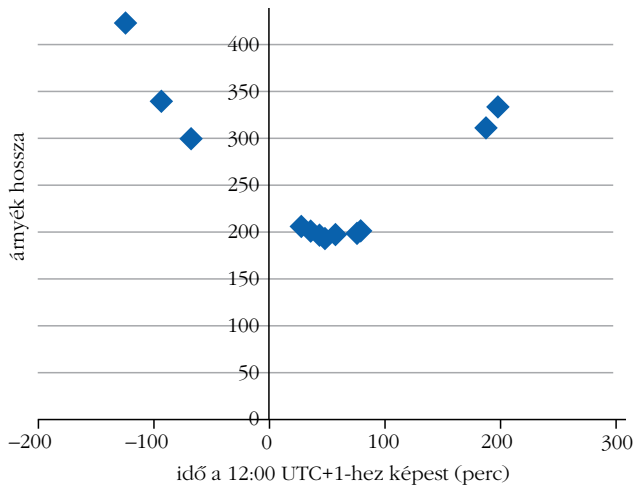
7. ábra. CD-ből készült gnomon a július 25-i méréskor.



8. ábra. Ugyanaz, mint a 7. ábrán az Aiguille du Midi hegyen.

10. ábra. A kétgnomonos készülék mérőlapja.





11. ábra. Az árnyékhosszak változása az időben.

másodfokú parabolához illesztjük, ahol a , b , c értékeit először 1-nek vesszük (5. táblázat).

Kiszámítjuk a közelítéshez használt függvény értékeit a mérésnél szereplő időadatokkal, majd vesszük a mért és a számított adatok különbségeinek négyzetösszegét (Gauss nyomán.) A különbségnégyzet- és a négyzetösszegértékek meglehetősen nagyok. A legjobban közelítő paramétereket a solver fogja kiszámítani annak alapján, hogy minimalizálja a mért adatok és a számítható adatok közötti különbségnégyzetek összegét, azaz a négyzetösszeg minimumát keresi, miközben az a , b , c értékeit módosítja (12. ábra).

A korábbi másodfokú parabolához képest az

$$y = A(x - B)^2 + C$$

alakban jobban leolvashatók a szükséges adatok, ugyanis B a minimális árnyékhossz 12 óra utáni időpontja percben, C pedig a minimális árnyékhossz. Ezért az a , b , c értékeiből kiszámítjuk A , B , C értékeit.

A grafikonon a mért és a számított értékek által rajzolt két görbe nagyon jól fedi egymást. Beírva az Eot , $Decl$ értékeket és a gnomon hosszát, kiszámíthatjuk a földrajzi szélesség- és hosszúságértéket is (13. ábra).

Megjegyzés

A fényképeken (14. ábra) megfigyelhető, hogy a gnomon árnyékpontjai miként helyezkednek el egymás után. Az első méréseket júniusban végeztük, későbbiek augusztus 15-e utániak. Feltűnő, hogy a júniusi képeken a gnomon árnyékpontjai görbült vonalon az augusztusiak pedig majdnem egyenesen helyezkednek el (7., 8., 10. és 14. ábrák).

Végiggondolhatjuk, hogy az égi pályán végighaladó égitest – egy, a Földhöz rögzített pontot megvilágítva – milyen árnyékot vet egy vízszintes síkra. Kiderül, hogy ér-

4. táblázat

A 2014. július 25-én, Siófokon végzett mérés táblázata

| idő (h:m) | t (min) | l (mm) |
|-----------|-----------|----------|
| 09:57 | -123 | 422,5 |
| 10:28 | -92 | 340 |
| 10:53 | -67 | 300 |
| 12:29 | 29 | 206 |
| 12:36 | 36 | 203 |
| 12:44 | 44 | 198 |
| 12:49 | 49 | 195 |
| 12:57 | 57 | 198 |
| 13:16 | 76 | 200 |
| 13:20 | 80 | 202 |
| 15:08 | 188 | 312 |
| 15:18 | 198 | 333 |

dekes geometriai problémáról van szó, a Nap esetében helytől és időponttól függően különböző, de jól megszerkeszthető görbét kaphatunk.

Néhány jó tanács azoknak, akik valamilyen oknál fogva végrehajtanák a mérést.

Hibabecslés

A becsléseket a 45. szélességi fokra adjuk a sinus- és cosinus-függvények egyszerűbb értékei miatt.)

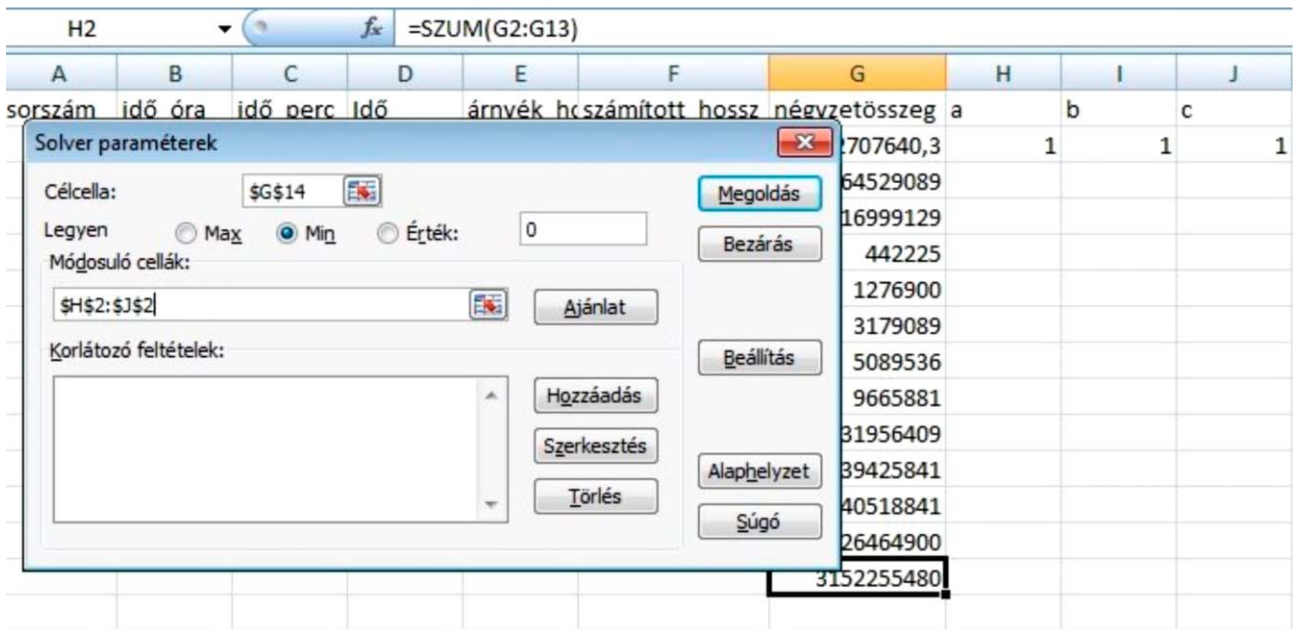
Miben követhetünk el hibát a mérés során?

Kritikus a legrövidebb árnyék hossza, illetve annak időpontja. Nézzük, mit okoz egy perc tévedés például a hosszúsági fok megállapításakor!

5. táblázat

A közelítő parabola adatainak becslése

| t (min) | l (mm) | számított hossz (mm) | különbségnégyzet (mm^2) | a | b | c |
|---------------|----------|----------------------|------------------------------------|-----|-----|-----|
| -123 | 422,5 | 15007 | 212707640,3 | 1 | 1 | 1 |
| -92 | 340 | 8373 | 64529089 | | | |
| -67 | 300 | 4423 | 16999129 | | | |
| 29 | 206 | 871 | 442225 | | | |
| 36 | 203 | 1333 | 1276900 | | | |
| 44 | 198 | 1981 | 3179089 | | | |
| 49 | 195 | 2451 | 5089536 | | | |
| 57 | 198 | 3307 | 9665881 | | | |
| 76 | 200 | 5853 | 31956409 | | | |
| 80 | 202 | 6481 | 39425841 | | | |
| 188 | 312 | 35533 | 1240518841 | | | |
| 198 | 333 | 39403 | 1526464900 | | | |
| négyzetösszeg | | | 3152255480 | | | |



12. ábra. A solver hívása és beállítása.

360°-ot fordul a Föld egy nap alatt, akkor 1 perce alatt 0,25 fok elfordulás jut. Távolságra átszámítva ezt a 45. szélességi fokon körülbelül 19,6 km hosszúsági eltérés adódik. Ezért célszerű a várható időpont környékén akár percenként jelölgetni.

A Nap látszó átmérője 0,5°. Ez a gnomon végpontjának árnyékát elmosódottá teszi. Mindez könnyen okozhat 2 perces hibát, vagyis a fentiek értelmében csak az árnyék elmosódottsága miatt majdnem 40 km

hibánk lehet kelet–nyugati irányban. Rövid gnomon esetén az árnyékpontok élesebbek, de kevésbé mozdulnak el, hosszú gnomon távolabbi árnyékpontokat, de elmosódott árnyékot ad.

A gnomon hossza és állása

Figyeljünk, hogy a pálca a vízszintes talajra merőlegesen álljon, a talppont pontosan a síkon legyen! Egy körülbelül 30 cm hosszú pálca hosszát elég pontosan meg tudjuk mérni. Ennek mérési hibáját elhanyagoljuk. De az árnyék hosszának mérése pontatlanabb. Nézzük az ebből adódó hibát. A már ismert összefüggés alapján:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{l}{b}\right) + Decl.$$

A $d\varphi$ szögeltérést az árnyékhossz dl megváltozásának függvényében deriválással kapjuk:

$$d\varphi = \frac{b}{b^2 + l^2} dl.$$

Például a 45. szélességi fokon napéjegyenlőség idején $b \approx l$. Fél fokos látszó nap esetén:

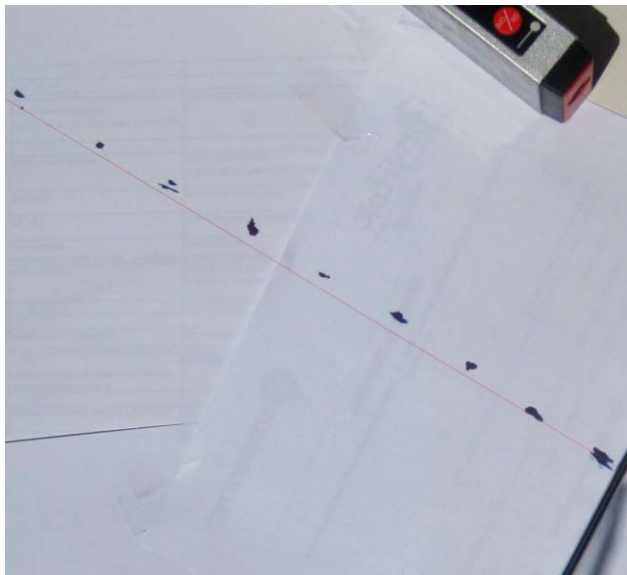
$$dl = \frac{\sqrt{2} \cdot 2\pi \cdot 0,5}{360} b,$$

$$d\varphi = \frac{dl}{2b} = 0,0061.$$

13. ábra. A kiszámított időpont és árnyékhossz.

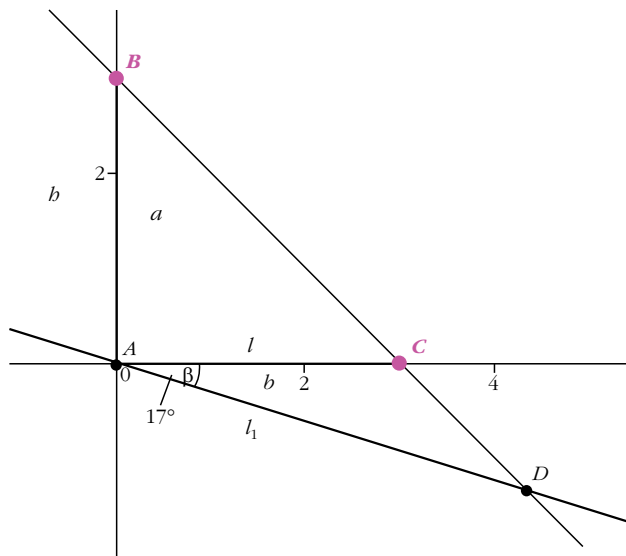
| D | E | F | G | H | I | J |
|------|----------|-----------------|---------------|-------------|----------|----------|
| Idő | árnyék_h | számított_hossz | négyzetösszeg | a | b | c |
| -123 | 422,5 | 416,4486522 | 36,61881001 | 0,006764225 | -0,76996 | 219,4074 |
| -92 | 340 | 347,4962857 | 56,19429931 | | | |
| -67 | 300 | 301,3594534 | 1,848113507 | A | B | C |
| 29 | 206 | 202,7672538 | 10,45064774 | 0,006764225 | 56,91425 | 197,4965 |
| 36 | 203 | 200,4552454 | 6,475775723 | Eot | | 6,57 |
| 44 | 198 | 198,6246571 | 0,390196536 | Decl | | 19,57 |
| 49 | 195 | 197,9202141 | 8,527650143 | Pálca_h | | 412,5 |
| 57 | 198 | 197,4965845 | 0,253427141 | Hosszuság | | 17,41394 |
| 76 | 200 | 199,9605118 | 0,001559321 | Szélesség | | 45,15414 |
| 80 | 202 | 201,101542 | 0,807226819 | | | |
| 188 | 312 | 313,7294223 | 2,990901472 | | | |





14. ábra. Az árnyékpontok rajzának változása.

Ez a különbség a Föld felszínén $39,2 \text{ km} \approx 40 \text{ km}$ eltérést jelenthet észak–déli irányban.



15. ábra. Ferde alapsík által okozott hiba.

Hibát okozhat, ha a vízszintes sík akár 1 fokkal is eltér a valódi vízszintestől (15. ábra). A gnomon mérhető árnyékhosszát megváltoztatja, l helyett l_1 -ot mérünk. A különbség kiszámítható a sinustétel és egy kivonás segítségével, ezt elvégezve újabb 40 km körüli eltérést kapunk.

Verne Gyula *Rejtelmes sziget* című regényében Cyrus Smith hasonló módon határozta meg a sziget helyzetét. Ezek szerint a mérési hibáink ellenére egy $40 \times 40 \text{ km}$ -es terület esetén reménytelen módon megtalálhatjuk a helyzetünket.

Irodalom

1. <http://www.yourdictionary.com/meridian>
2. <http://www.portcities.org.uk/london/server/show/ConNarrative.132/chapterId/2706/Greenwich-and-the-story-of-time.html>
3. <https://hu.wikipedia.org/wiki/Nap-éjegyenlőség>
4. Láng R.: Látogatás a CERN-ben. *Fizikai Szemle* 63 (2013) 23–26.
5. www.csillagaszat.hu/a-het-kepe/budapesti-analemma
6. www.wsanford.com/~wsanford/exo/sundials/SunAnalemma.xls
7. www.mysundial.ca/files/Analemma.xls

VAN ÚJ A FÖLD FELETT

Az elmúlt 15 év legfontosabb csillagászati eredményeit összefoglaló, tanórai előadásra is alkalmas segédanyag on-line változata szabadon letölthető a www.fizikaiszemle.hu honlap „mellékletek” pontjából.



KOLLEKTÍV DÖNTÉSEKET HOZNI – HOGYAN LÁTJA EZT A SZOCIOFIZIKA

Jávor Márta – ELTE PhD hallgató, Fizika Tanítása Program
Geszi Tamás – ELTE Fizikai Intézet

A szociofizika a statisztikus fizika viszonylag új, aktív kutatóterület, amely aktivitás pár évtizeddel ezelőtti felfutását *Serge Galam* francia fizikus érzékelt először, ő adott neki nevet is, őt ezért néha „a szociofizika atyjának” is nevezik [1]. A szociofizika működését egy közösség döntéshozatalának példáján mutatjuk be; arról szeretnénk olvasóinkat, rajtuk keresztül pedig tanítványainkat is meggyőzni, hogy egy ilyen emberi-közösségi játszma váratlanul érdekes betekintést kaphatunk egy fizikai modellen – a mágneses anyagok rendeződésének Ising-modelljén – keresztül.

Átmenetileg hagyjuk a döntéshozás problémáját, ismerjük meg a fizikai hátteret! A statisztikus fizika a 19. század második felében jött létre, amikor kezdtek komolyan venni azt a sejtést, hogy a körülöttünk lévő anyagok parányi, egymással és a környezettel kölcsönható részecskéiből – atomokból, molekulákból – állnak. Kicsiségük miatt, amit mi anyagtulajdonságnak látunk, a rengeteg atom, molekula vagy ezek még kisebb alkotórészei – például elektronok – statisztikai átlagos viselkedését fejezi ki.

Ennek a – mára a fizika egyik alapvető ágává terebélyesedett, nagy matematikai eszköztárat pörgető – tudományterületnek [2] van egy egyszerű, középiskolában is elmondható magja (bár az exponenciális függvényt ismerni kell hozzá). *Maxwell* számolta ki először egy ideális gázban szabadon röpködő, időnként ütközésekben energiát és impulzust cserélő atomok sebességeloszlását. Ezt terjesztette ki *Boltzmann*

arra az esetre, amikor a statisztikailag függetlenül mozgó atomokra külső erőter is hat, így energiájukban potenciális energia is megjelenik: ő írta fel először, hogy egy atom pillanatnyi állapotának (helyének és sebességének) valószínűsége csak az adott állapotbeli E energiájától és a T abszolút hőmérséklettől függ, mégpedig

$$f(E) = \frac{\exp\left(-\frac{E}{kT}\right)}{Z} \quad (1)$$

alakban („Boltzmann-eloszlás”). $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K a Boltzmann-állandó, Z pedig egy normálási állandó („állapotösszeg”), ami biztosítja, hogy a különböző valószínűségek összege 1 legyen, mert valamilyen állapota biztosan van a rendszernek. A képletből látszik, hogy az anyag a kisebb energiájú állapotokat jobban szereti, nagyobb valószínűséggel tartózkodik bennük, de e válogatásnak ellene dolgozik a magas hőmérséklet: a meghatározó az E/kT arány.

Gibbs jött rá, hogy ez az egész nem csak gázokra, hanem erősen kölcsönható rendszerekre is igaz, csak ott E már nem egy atom, hanem az egész rendszer energiáját jelenti. Ekkor persze a statisztikát úgy kell érteni, hogy azt az egy rendszert sok példányban képzeljük el („Gibbs-sokaság”), vagy mivel a sok példányt ténylegesen legyártani vagy megvenni a boltban sokba kerülne, legyen csak egy példányunk belőle, de mérjük meg rajta ugyanazt sokszor egymás után, és a sok mérés eredményeire készítünk statisztikát.

Ennek egyik legegyszerűbb példája, a ferromágnességet magyarázó Ising-modell jó lehetőséget ad a statisztikus gondolkodásmód szemléltetésére és kipróbálására a középiskolában. Vegyünk egy állandó mágnezt, például egy mágnesezett vasból készült kockát, és képzeljük el, hogy belenézhetünk és megfigyelhetjük a mágneses spin hordozó atomokat. A modell szerint a vaskocka mágnesezettsége attól függ, hogy ezek az atomi spinok egy irányba rendezettek-e; azokat az anyagokat nevezzük ferromágnesesnek (vas, kobalt, nikkell és néhány szigetelő kristály), amelyekben ez magától megtörténik. *Pierre Curie* fedezte fel, hogy a mágnezt melegítve, a spontán mágnesesedés csökken, majd egy élesen meghatározott hőmérsékleten („Curie-pont”) eltűnik.

A spontán mágnesesedés forrása az atomi spinok közötti kölcsönhatás, ennek legegyszerűbb modelljét, mai nevén az Ising-modellt *Ernst Ising* doktori disszertációjában mutatta be. A modell szerint egy spin vagy felfelé, vagy lefelé áll, ezt az i -edik spinre



Jávor Márta az ELTE matematika-fizika tanári és ezzel párhuzamosan meteorológia szakán végzett 1980-ban, később kémia-tanári oklevelet is szerzett. Az oktatás minden szintjén (általános és középiskola, főiskola, egyetem) tanított. Jelenleg az ELTE Fizikai Doktori Iskola Fizika Tanítása programjának doktorandusza.



Geszi Tamás fizikus az ELTE-n végzett 1961-ben, 1993 óta az ELTE egyetemi tanára, 2000–2003 között a Komplex rendszerek fizikája tanszék vezetője, 2008 óta emeritus. Kutatási területe: régebben statisztikus fizika (folyadék-üveg átalakulás, neuronhálózatok modellezése), újabban kvantummechanika.

$S_i = +1$ vagy -1 számmal írjuk le. A sok spin beállásától így függ a kölcsönható spinek rendszerének E energiája:

$$E = - \sum_{i,j} J_{ij} S_i S_j - H \sum_i S_i, \quad (2)$$

ahol J_{ij} az i -edik és j -edik spin közötti csatolás együtthatója, H a külső mágneses mező. Ha minden J_{ij} pozitív (ilyenek a ferromágnesek), külső mező nélkül ($H = 0$) az energia úgy lesz a legkisebb, ha minden spin egy irányba áll be, de mindegy, hogy merre, $S_i S_j$ így is, úgy is pozitív. Ezt a rendeződést találja meg az anyag, ha nincs túl meleg.

Az atomokhoz vagy azok spinjeihez hasonlóan emberek is sokan vannak, és egymással, valamint környezetükkel számos módon kapcsolódhatnak. Ekképpen tehát párhuzamot állíthatunk a kétféle rendszer között, bár az emberek közötti kölcsönhatások minőségileg természetesen különböznek az atomok közötti kölcsönhatásoktól. Mindez nem akadályozza meg a statisztikus fizika módszereinek alkalmazását társadalmi rendszerekre. Az emberek közötti kapcsolatok persze bonyolultabbak. A társadalmi folyamatokat az egyéni és a társas viselkedés határozza meg. A kollektív viselkedések tanulmányozásához elengedhetetlen az emberek közötti kapcsolatok sajátosságainak ismerete, amelynek vizsgálata a szociológia témakörébe tartozik. Ahogy a statisztikus fizikában nem akarják leírni egyedileg az atomokat, csak az együttes viselkedésüket, ugyanígy a szociológusok sem vizsgálják valamennyi személy egyéni viselkedését, számukra csupán a kollektív viselkedésük a fontos. Ebben kisebb csoportok – egy iskolai osztály vagy egy társasház lakói – esetében sokszor döntő szerep jut a páros kölcsönhatásoknak, ilyenkor lehet esélyünk Ising-szerű modelleken keresztül vizsgálni az emberi közösségek kollektív viselkedését.

Az atomok közötti erők nagysága az atomok távolságától és valamely fizikai tulajdonságuktól – mint az elektromos töltés, a mágneses momentum vagy a tömeg – függ. Az atomok szabálytalan mozgásának mértéke a hőmérséklet: ha a hőmérséklet nő, az atomok gyorsabban mozognak, ami szétzilálja az erők rendezésre törekvő hatását. Analóg módon, amikor az emberek „gyorsabban mozognak”, sokféle hatásnak tesz ki magukat, „nincs elég idejük” az egymással való kapcsolatra, ami a kollektív viselkedésben azt jelenti, hogy a kölcsönhatás (a kommunikáció, az „odafigyelés”) közöttük gyengébb, sok minden más dologra is figyelnek, nemcsak egymásra.

A környezet nem csak a hőmozgás zajával befolyásolja egy rendszer folyamatait, hanem néha rendezett, irányító hatásokkal is. Az atomok esetében ez külső elektromágneses vagy gravitációs mező lehet, a ferromágneses rendeződésnél ilyen hatás a külső mágneses mező. Emberi közösségek esetében ilyen lehet például egy domináns személy, vagy az egyik csoporttag speciális ismerete is.

A mágneses rendeződés példájára visszatérve, a (2) egyenlet felhasználásával az (1) egyenlethől – ha ismerjük a T abszolút hőmérsékletet – kiszámítható, hogy egy adott spinbeállítás milyen valószínűséggel valósul meg. A valószínűségek ismeretében kiszámíthatjuk például mágneses mező nélkül ($H = 0$) az

$$M = \sum_i S_i$$

mágneszettség átlagértékét, és megnézhetjük – csupa pozitív J_{ij} (ferromágneses csatolás) mellett – milyen hőmérséklet alatt lesz a mágnesezés nullától különböző: ezeken a hőmérsékleteken nagy valószínűséggel egy irányba állnak be a spinek, ilyenkor mágnes a mágnes.

Ha a spinek egydimenziós láncot alkotnak és csak a szomszédok csatolódnak össze azonos pozitív J együtthatóval, mindent könnyű kiszámolni, ez már Ising doktorijában is benne volt, de az eredmény nem túl izgalmas. Kétdimenziós rácson ülő spinek esetét Lars Onsager végigszámolta egy eszméletlenül bonyolult számolással, az olvasó ne röstellje, ha nem tanulta meg. Három dimenzióban már nem is lehet zárt képletekkel végigszámolni, de hatékony numerikus számolási módszerek léteznek, ezeket ajánljuk olvasóinknak és tanítványaiknak.

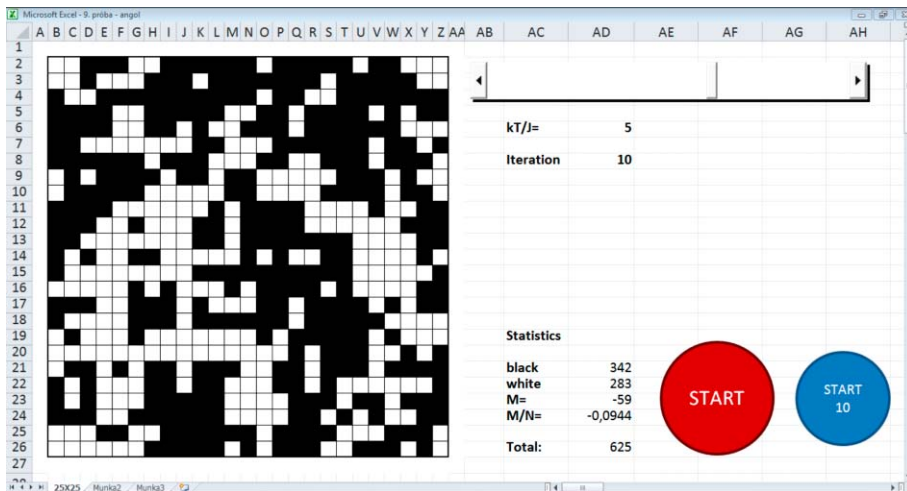
Számítógépes szimulációk

Véletlenszerű mozgások valószínűségeit akarjuk követni, ezért a véletlen számokat alkalmazó Monte-Carlo módszert használjuk [3, 4]. Ez egy olyan általános statisztikai módszer, amelyet a tanulók is képesek alkalmazni, és nem túl bonyolult eszközökkel érdekes eredményeket kaphatnak. A Monte-Carlo módszeren belül a leleményes Metropolis algoritmust alkalmazzuk. Az algoritmus valamilyen kezdeti spinértékekből kiindulva, iteratív eljárással többször végigjárja az egy rácspan elhelyezkedő spineket, egyenként vagy átbilenti őket, vagy nem (lásd alább), minden körbejárás után kiszámítja a mágnesezettséget, és ezt addig ismétli, amíg beáll a termodinamikai egyensúly, ahol a mágnesezettség apró fluktuációktól eltekintve már nem változik.

Hogy egy körbejárásban egy adott spin billen vagy nem, azt a Metropolis algoritmus így dönti el:

- feltesszük, hogy a spin aktuális állapota átbillett -1 -ről $+1$ -re, illetve $+1$ -ről -1 -re (aszerint, hogy hol találtuk); a (2) egyenlethől kiszámítjuk az átbillenéshez tartozó ΔE energiaváltozást, és ebből a W elfogadási valószínűséget:

$$W = \begin{cases} 1, & \text{ha } \Delta E < 0, \\ \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right), & \text{ha } \Delta E > 0, \end{cases} \quad (3)$$



1. ábra. A szimuláció Excel munkalapja.

más szomszédjai lesznek, így tehát minden cellának négy szomszédja van, a cellákra azonos feltételek mellett végezhető az iterációs számítás.

Az egyes cellákban lévő spinértékek könnyen megjeleníthetők az Excel táblázat celláinak fehérre ($S = +1$) és feketére ($S = -1$) történő festésével. Ez a szimuláció nem túl gyors (a kiszínezéssel még inkább lassul), de így a tanulók vizuálisan is megfigyelhetik a spinek változását az egyes iterációs lépések során. Eredménynek M/N , értékét tekintettük, ahol M a (törz-

szűkületen lévő) négyzetrcs teljes mágnesezettsége, N pedig a négyzetrcs celláinak száma: 625 (1. ábra).

A kT/J változó értéke csúszkával változtatható (k a Boltzmann-állandó). A kezdeti állapot: minden cellában véletlen spin van. A négyzetrcs valamennyi celláján végigmenve, minden cella új spinjét a Metropolis algoritmus szerint határozzuk meg a cella és négy szomszédjának aktuális spinjéből.

elfogadjuk, ha a véletlen szám $\leq W$,

elvetjük, ha a véletlen szám $> W$.

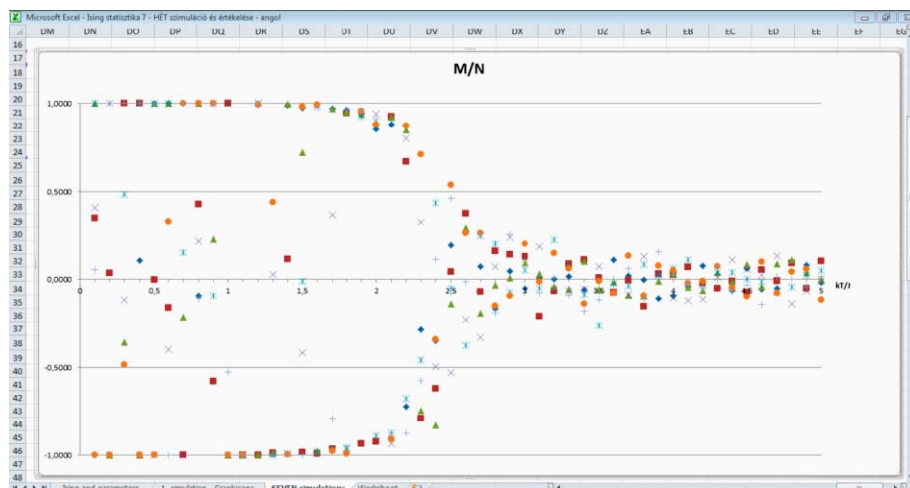
Ezek a szimulációk jól mutatják az alacsony hőmérsékleteken bekövetkező spontán mágneseződést (2. ábra). A fontos és érdekes változás a kT/J változó $2,0$ és $2,5$ közötti tartományában figyelhető meg: eltűnik a spontán mágneseződés. Ez nem más, mint egy fázisátalakulás: a hőmérséklet emelésének hatására az anyag spontán mágneseződést mutató állapotból átalakul olyan állapotba, amelyben már nincs spontán mágneseződés.

A Metropolis algoritmust legegyszerűbben Visual Basic-ben megírt Excel-makrók segítségével lehet bemutatni. A programozás egyszerű és azonnal láthatjuk az eredményt is. A diákok maguk is meg tudják írni ezt az egyszerű programot.

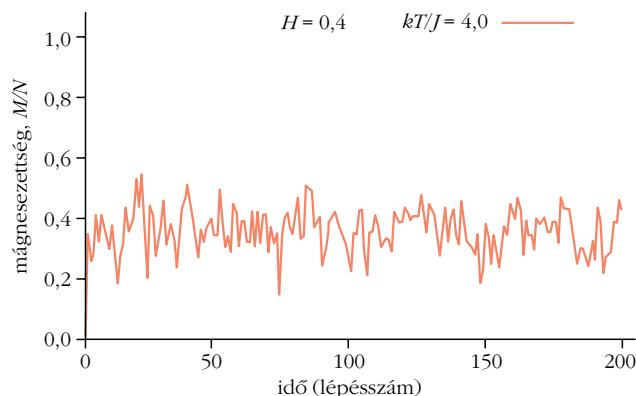
Vegyünk egy 25×25 -ös négyzethálót, amelynek minden cellájában van egy spin. A határon lévők kivételével minden cellának 4 szomszédja van, ezekkel azonos J kölcsönhatásban áll, a többi cellához nem csatolódik. Elkerülhetjük a határon levők megkülönböztetésével járó bonyodalmakat, ha alkalmazzuk a periodikus határfeltételt, amely geometriailag a négyzetrcsből tórusz felületet formáz. A feltétel könnyen beépíthető a szimulációs programba: az alsó és a felső sor, illetve a bal és a jobb szélső oszlop cellái egy-

gy-

2. ábra. A spontán mágnesezés a hőmérséklet függvényében, Ising-modellből Monte-Carlo módszerrel számolva: külső mágneses mező nélkül ($H = 0$) végzett 7 darab 100 lépéses iteráció eredménye, a kT/J változó értékét $0,1$ -től $5,0$ -ig $0,1$ -enként változtatva.



szimulációt végeztünk a külső mágneses mező hatására is. Magasabb hőmérsékleteken ($2,5$ feletti paraméter esetén) látszik a különbség az előbbi eredményekhez képest, itt nem spontán, hanem a külső mágneses tér által generált mágneseződés játszódik le. Ezt mutatja a 3. ábra grafikonja $4,0$ paraméterérték esetében. Néhány iterációs lépés után a mágnesezettség nem változik jelentősen, egy adott érték körüli fluktuációja figyelhető meg. Ez összhangban van a kísérleti tapasztalatokkal: a mágneses mezőbe helyezett vasból készült tárgy mágnessé válik.



3. ábra. Egy szimuláció a mágnesezettségre, rendezetlen állapotban (Curie-pont fölötti hőmérsékleten), külső mágneses mezőben.

Adott hőmérsékleten (a kT/J paraméter értéke most is 4,0) a végső mágnesezettség gyenge mezőnél arányos a külső mezővel, az arányossági tényező a szuszceptibilitás, ami a szimulációval jól mérhető, mint a görbe kezdeti meredeksége. Ha tovább növeljük a külső mágneses mezőt, a mágnesezettség végül telítődésbe megy át. E folyamat kezdeti szakasza látható a 4. ábrán, jól látszik a görbe növekedésének lassulása.

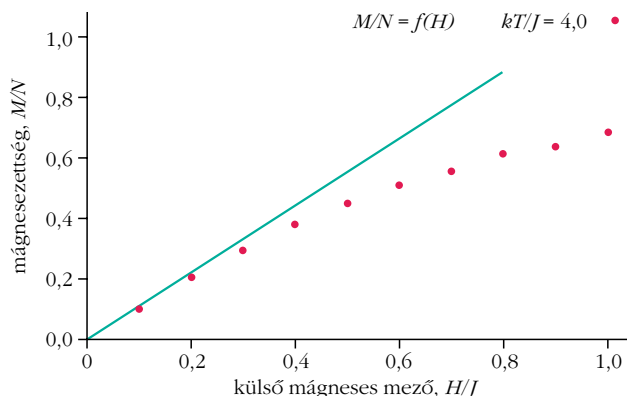
A szociofizikai alkalmazás: kollektív döntéshozatal

Ideje áttérni eredeti célunkra: nézzük meg, hogyan lehet alkalmazni ezt a modellt a társadalmi rendszerek vizsgálatánál! Emlékezzünk rá, hogy az Ising-modell akkor alkalmazható, ha csak két választási lehetőség van: „igen” és „nem”, mert ebben a modellben a spineknek csak két állapota lehet: „spin fel” és „spin le” [5].

Egy egyszerű döntési helyzet, amely megfelelhet az Ising-modell alkalmazási feltételeinek, amikor egy osztály közössége választ két lehetséges kirándulási helyszín közül: a hegyekbe vagy a tópartra. A döntés határozottságát, az osztály összetartását azonban már az M/N arányból tudjuk megítélni.

Nehezebb kérdés a „hőmérséklet és kölcsönhatás arányát” jelző paraméternek megfelelő „szociológiai paraméter” mérése, pedig ezen ellenőrizhetjük a modell működését. A diákoknak biztosan vannak ötleteik, hogyan lehetne mérni az osztálytársak közötti kapcsolatok (átlagos) erősségét, érdemes ezeket megvizsgálni. Az osztálytársak közötti kapcsolat erősségét jellemezheti például a baráti viszonyban lévő tanuló-párok száma. Ennek maximális értéke egy n tanuló-ból álló osztály esetében:

$$\frac{n(n-1)}{2},$$



4. ábra. A mágnesezettség átlagértéke a külső mágneses mező függvényében.

akkor mindenki baráti jó viszonyban van minden osztálytársával. Ezt a számot vehetjük a modell J csatolási állandójának, de ez nem kötelező: a kölcsönhatás erősségében benne van annak meghatározása is, mennyire figyelnek egymásra a diákok, azaz mennyire köti le figyelmüket a kirándulással kapcsolatos döntés és barátaik (szomszédjaik) véleménye (például matekdolgozat előtt inkább a minél jobb felkészülésre fognak figyelni); ennek mérése nehezebb feladat. Akármit választottak J -nek, most jön csak a hőmérsékletnek (a modellben a kT szorzatnak) megfelelő szocio-paraméter: a figyelmük megosztottságát vagy egyirányúságát jellemezheti, hogy egy iskolai órákői szünetben (vagy egy tanítási nap során) átlagosan hány témáról beszélgetnek osztálytársaikkal, amely témák egyike a kirándulás helyszíne. Ha túl sokféle terjed ki figyelmük, kevesebbet foglalkoznak a kirándulás úti céljával. A tanulók ötletei alapján különböző mérési lehetőségeket lehet kipróbálni. Egyáltalán nem biztos, hogy ezek a különböző „szociológiai paraméterek” egy adott osztály esetében ugyanarra az eredményre vezetnek.

A modellben szerepel még a H külső mágneses mező. Ha az egyik helyszínek van valami különleges vonzereje a diákok számára, például olcsó szálláshely

vagy sportolási lehetőség, ez jelentősen befolyásolja a döntés eredményét. A kedvező lehetőség „külső mágneses mezőként” egyik irányba billenti a vélemények többségét. Minél erősebb a vonzó lehetőség és minél több diák számára hat befolyásoló tényezőként, annál nagyobb arányban fogják ezt a helyszínt választani. Természetesen egy negatív információ is ugyanilyen hatással bír, például, ha már nincs szabad olcsó szálláshely a kiválasztott helyszínen.

Az iskolából kilépve más, kisebb társadalmi csoportok is kerülhetnek az előbbihez hasonló helyzetbe. Ilyen csoport egy társasház tulajdonosi közössége. A társasház egy olyan ház, amelyben minden lakás tulajdonosa egy család, és időről időre közösen kell dönteniük a házzal kapcsolatos kérdésekről. Az Ising-modell alkalmazhatóságához itt is teljesíteni kell annak feltételeit, tehát most is csak két lehetőség áll rendelkezésre. Például, ha lyukas a tető, dönteni kell, hogy megjavíttassák vagy sem, és másképpen oldják meg a problémát (megmarad egy csomó pénzünk, de lavórt kell tenni a lyuk alá).

A fizikai modellezésben most is a hőmérséklet mutatja meg, hogy milyen intenzíven figyelnek egymásra az emberek. Alacsony hőmérsékleten a társasházi tulajdonosok intenzíven figyelnek egymásra, ezért gyorsan egyetértésre jutnak. A probléma a kapcsolatok intenzitásának mérése, ami ez esetben már korántsem egyszerű. A szociológusok kutatási területe az emberi kapcsolatok mérésének, erősségének vizsgálata. A fizikai modell szemléletes képet ad a döntés mechanizmusáról. A társasházi döntésnél tehát általában a szomszédok közötti kapcsolatok ismerete nélkül lehetetlen előre megmondani egy szavazás eredményét. Ez a kapcsolat lényegesen bonyolultabb lehet, mint a tanulók közötti kapcsolat.

A külső mágneses mezőnek megfelelő külső hatások – ide számítjuk, hogy a legtöbb tulajdonosnak van határozott saját véleménye, ami emberileg nem „külső”, de mégis úgy működik, mint egy mágneses mező – egy irányba terelik a véleményeket. Az eredmény a modell szerint: 0-tól 1-ig növekvő mágnesesség, amelynek nagysága ettől a külső hatástól függ. A szimulációkból látható, hogy a ferromágnesesség Ising-modellje megmagyarázza, hogyan befolyásolják a külső hatások a döntés eredményét.

Szaporíthatnánk még a példákat, amelyben egy közösség döntését vizsgálhatjuk a modell segítségével, olvasóinkat is bátorítjuk erre, de legyenek elkészülve rá, hogy még az se magától értetődő, hogy mekkora közösségre próbálunk alkalmazni egy modellt: Ising-szerű homogén modellek kis közösségek esetén működhetnek, nagyobb közösségek már hajlamosak csoportokra szétesni; ez már túlmehet az egyszerű modelleken [6].

A következő példát *Szabó Györgytől* kaptuk. Egy kisváros lakói elhatározzák, hogy az internet gyorsabb és biztonságosabb elérése érdekében új, korszerű hálózatot építenek ki. A környéken két szolgáltatónak van olyan hálózata, amelyhez csatlakozhatnak, tehát közülük kell választaniuk. Olcsóbb és egy-

szerűbb a hálózat kiépítése, ha mindannyian azonos szolgáltatót választanak, de legalább az egymáshoz közel lakók. A legjobb, ha egységesen az egyik szolgáltató mellett teszik le voksukat. Ehhez sokat kell egymással beszélgetniük a kérdésről. Ha jó (és „megfelelően” erős) a közvetlen szomszédok közötti kapcsolat (ami az Ising-modellben kicsi kT/J paraméternek, azaz a hőmérséklethez képest erős csatolásnak felel meg), a szimulációk eredményeiből látszik, hogy biztosan megegyezésre jutnak, és lényegében minden család ugyanazt a szolgáltatót választja; hogy melyiket, az a véletlenül múlik. Ha sok az egyéb zavaró körülmény, annak magasabb hőmérséklet felel meg: a szomszédoknak nem lesz idejük vagy alkalmuk kellő alapossággal megvitatniuk a kérdést, így végül – megegyezés híján – a két szolgáltató valójában véletlen eloszlással építheti ki hálózatát az egész városban; ez a legkedvezőtlenebb eset, hiszen tulajdonképpen két teljes hálózatot kell kiépíteni, ami megkétszerezi a költségeket. Felmerülhet külső hatás is, ami a mágneses modellben a külső mágneses mezőnek felel meg. Ez a külső hatás sokféle lehet, például valamelyik városlakó műszaki ismeretekkel rendelkezik, és megállapította, hogy az egyik szolgáltató műszaki megoldása biztonságosabb, korszerűbb. Ha készít erről egy tájékoztatót, amit mindenkihez eljuttat, ez egy irányba hatóan fogja befolyásolni a választást. És itt jöhet egy modell érvényességének határa: egy kisváros is lehet túl nagy ahhoz, hogy egységes rendeződést (Ising-modell!) tűzhessünk ki célnak: ha nem sikerül teljes egyetértésre jutniuk az egész városban, már az is csökkentheti a kiadásokat, ha legalább az egy városrészben (utcában vagy közvetlen szomszédságban) lakók azonosan választanak. Egy gazdagabb modellben azt a kérdést is fel lehet vetni, vajon mekkora lehet a kizárólag egy szolgáltató által kiszolgált összefüggő terület? Egy utca, esetleg egy főút és mellékutcai? Ez múlhat azon is, hogy a szűkebb környezeteket más-más erősségű csatolás jellemzi, de a nagy egység felbomlása lehet spontán folyamat is. Mivel jelen esetben emberek közötti kapcsolatokról van szó, a szociológia sokszínűsége állandóan keresztezheti modellépítő buzgalmunkat.

Ha belegondolunk, hogy az emberek milyen sokfélék, tulajdonképpen nagyon meglepő, hogy az egyszerű modellek bármilyen betekintést adnak a társadalmi kérdések megértésébe. Ez azon múlhat, hogy a szerveződés szintjei között kevés az átjárás: a kémia az elektronfelhők játsszák és emiatt nem sokat vesz észre az atommagok finomságaiból, az egyes emberek közötti apró kémiai különbségek csak a szervátültetés extrém körülményei között jutnak szerephez, és a társadalom sok-sok kérdésében a véleményeink sokszínűsége csak olyankor számít, amikor időnként megszámloljuk, hogy egy-egy célzatosan megválasztott kérdésről mit válaszolnak többen, mit kevesebben. Néha ez az egyszerűsítés jól kifejezi a folyamatok lényegét, és működő modellekhez vezet, néha – mint a gazdasági előrejelzés

terén, amikor abból lesz kisebb-nagyobb összeomlás, amit a modellből kihagytunk – keserű csalódásokhoz: a világ időnként emlékeztet arra, hogy felnőttek vagyunk, hát igyekezzünk megkülönböztetni a mesét a valóságtól.

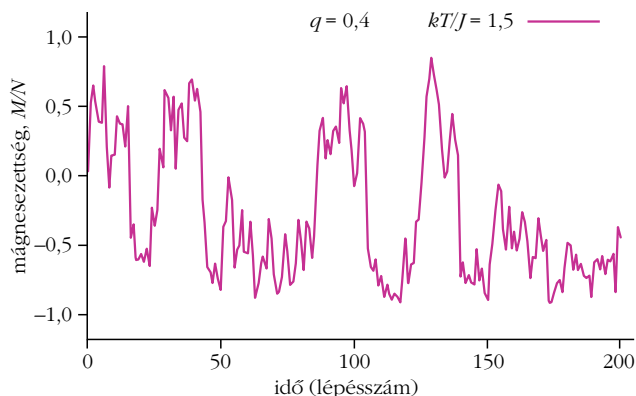
Az egyszerű modellek mégis meglepően sokszor hozzásegítenek, hogy eligazodjunk szűkebb vagy bővebb emberi környezetünk dolgaiban, és a jó statisztikus fizikai elemzésből néha olyan beelátást kapunk egy fontos helyzetbe, amit másképpen nehezebben értenénk meg.

A szimmetria kérdése

Az Ising-modellben a kölcsönhatás szimmetrikus: az i spin ugyanúgy J erősséggel hat a j spinre, mint a j hat az i -re. Az emberek közötti valóságos kapcsolatok általában nem szimmetrikusak. Túl a fizikán kipróbáltuk a modellt aszimmetrikus kölcsönhatás esetére is. Hogy ne bonyolítsuk túl a modellt, jobbra és felfelé J , balra és lefelé qJ csatolással számoltunk; az így bevezetett $q < 1$ paraméter jellemzi az aszimmetriát; $q = 1$ felel meg a szimmetrikus esetnek. Az eredmények érdekesek, és erősen függenek a q és kT/J paraméterek választásától; ezen függés elmélete nem egyszerű, aki mégis belevágna, annak a [7] cikket ajánljuk. Az 5. ábrán szemléltetjük, amint a mágnesezettség két szélső, egy pozitív és egy negatív érték között váltakozik: néhány iterációs lépés erejéig egy pozitív érték körül, majd hirtelen egy negatív érték körül ingadozik, szintén néhány iterációs lépésen keresztül. A döntés szempontjából ez azt jelenti, hogy az eredmény nem végleges, idővel pont az ellenkezőjébe is fordulhat.

Összefoglalás

Távoli tudományterületek között néha meglepően sikeres átjárások nyílnak, például egyszerű fizikai modellekből sokat tanulhatunk bonyolult szociális problémákról, ezzel foglalkozik a szociofizikának nevezett, néhány évtizedes múltra visszatekintő tudományág, amelynek elég jól megértett része a döntéshozatal kisebb közösségekben. Ebbe a fizika egyik legendásan egyszerű, mégis sok finomságot hordozó modellje, a ferromágneses rendeződés Ising-modellje érdekes betekintést enged.



5. ábra. A mágnesezés időbeli változása aszimmetrikus spin-spin csatolás esetén.

Ez a téma középiskolában is tanítható, amiben sokat segíthet, hogy a modell egyszerű numerikus eszközökkel is jól vizsgálható.

A társadalmi jelenségek általában bonyolultabbak, mint a fizika által vizsgált rendszerek, ezért nyitott szemmel kell figyelni a modellek alkalmazhatóságának korlátaira; ennek egy példáját mutattuk be az aszimmetrikus csatolás példáján.



Az itt bemutatott munkához NEDA ZOLTÁN előadásának hatására fogtunk hozzá, amelyet az ELTE Doktori Iskola Fizika Tanítása Programjában tartott. Köszönetet mondunk még CSERTI JÓZSEFNEK, KERTÉSZ JÁNOSNAK és SZABÓ GYÖRGYNEK a cikk első kéziratához tett javaslataikért, amelyeket beépítettünk az itt olvasható végleges változatba.

Irodalom

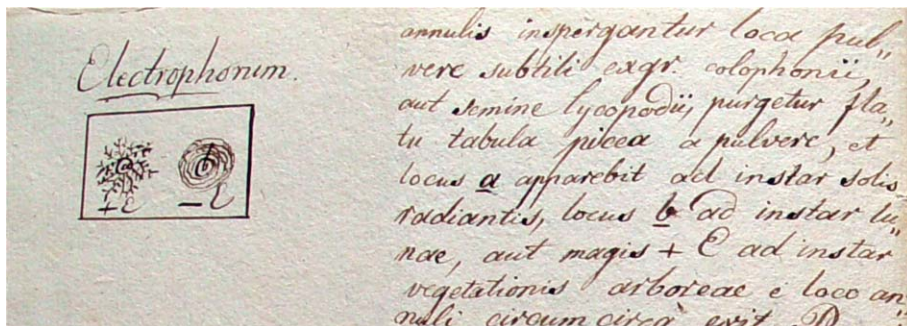
1. Serge Galam: Sociophysics. *Int. J. Mod. Phys. C* 19 (2008) 409; <http://arxiv.org/pdf/0803.1800v1.pdf>
2. NEDA Zoltán, Tyukodi Botond, Kacsó Ágota-Enikő: *A klasszikus statisztikus fizika alapjai*. Ábel kiadó, Kolozsvár 2014.
3. Cserti József: A munkára fogott véletlen I–II. *KöMaL* 2003 október 432. oldal, november 493. oldal. Angol változata: Harnessed Hazard, *Mathematical and Physical Journal for Secondary Schools* 3 (2004) 48.
4. J. Kertész, J. Cserti, J. Szép: Monte Carlo simulation programs for microcomputers. *European Journal of Physics* 6 (1985) 232.
5. D. Stauffer: Social applications of two-dimensional Ising models. *Am. J. Phys.* 76 (2008) 470; <http://arxiv.org/pdf/0706.3983v1.pdf>
6. D. Stauffer: Statistical physics for humanities: a tutorial. <http://arxiv.org/pdf/1109.2475v1.pdf>
7. H. Crisanti, H. Sompolinsky: Dynamics of spin systems with randomly asymmetric bonds: Ising spins and Glauber dynamics. *Phys. Rev. A* 37 (1988) 4865.

A szerkesztőbizottság fizika tanításáért felelős tagjai kérik mindazokat, akik a fizika vonzóbbá tétele, a tanítás eredményességének fokozása érdekében új módszerekkel, elképzelésekkel próbálkoznak, hogy ezeket osszák meg a Fizikai Szemle hasábjain az olvasókkal!

LICHTENBERG-ÁBRÁK KELTÉSE BOLYAI FARKAS IDEJÉN ÉS MA – 1. RÉSZ

Gündischné Gajzágó Mária
Hatvan

Bolyai Farkas fizikai és csillagászati jegyzeteinek kiadásával¹ nem csak nagy matematikusunk és híres tanárunk jegyzeteinek dokumentumszerű bemutatását céloztuk meg, hanem azoknak „életre keltését” is. De mit jelent az „életre keltés” a 150-200 éves tankönyvet helyettesítő fizikajegyzetek esetében? – Elsősorban a jegyzetek feladatainak megoldását, az ott leírt kísérletek átgondolását, újbóli elvégzését. E törekvésünket példázzák könyvünk „szerkesztői kiegészítés” címmel jelölt részei. Hasonló szándék vezetett e cikk megírására is. Egy szinte elfelejtett, de Bolyai Farkas korában nagyon is divatos elektrosztatikai kísérletet szeretnénk a következőkben feleleveníteni. De azt is szándékozunk megmutatni, hogyan lehet korunk modern anyagtechnikai lehetőségeit felhasználva házilag készített eszközökkel Lichtenberg-ábrákat létrehozni.²



1. ábra. Lichtenberg-ábrák, részlet Bolyai latin nyelvű jegyzetéből.

Lichtenberg-ábrák Bolyai jegyzeteiben és Baumgartner könyvében

Az 1847 júniusában írt, *Néhány kérdés a villanyról* című Bolyai-jegyzet elején olvashatjuk:³ „Ha egy simán öntött spanyolviasz vagy szurok táblára két gyűrűt tétetik, egymástól bizonyos távra; az egyik berzített üveggel, a másik berzített spanyolviaszszal érintetik, s péld. licopodium hintetvén reá, a felesleg lefuvatik, az üveggel érintett kerekén sugárzó alaku lesz, a másik magába vonulo hold. Honnan amazt üveggerznek, ezt szurokinak hívják; sőt azt napinak, ezt holdinak Franklin azt + ϵ , ezt - ϵ nek nevezte.” (I. kísérlet)

Egy latin nyelvű Bolyai-jegyzetben hasonló leírást találunk az itt leírt kísérletre, és mellette egy szép rajtot (1. ábra) is.⁴



Gajzágó Mária a kolozsvári Babeş-Bolyai Egyetem Fizika Karán szilárdtestfizika szakon végzett, majd 1980-ban ugyanott szerzte az I. tanári fokozatot. 1986-ig, 15 éven át a marosvásárhelyi Bolyai Farkas Liceumban, 1987-től Szombathelyen, Békéscsabán és Hatvanban tanított. 1983-tól kutatja Bolyai Farkas kéziratban maradt fizikajegyzeteit. 2013-ban jelent meg – férjével, Gündisch Györggyel és Szenkovits Ferencsel írt – *Bolyai Farkas fizikája és csillagászata* című könyve.

Ezt a kísérletet Georg Cristoph Lichtenberg végezte el, és 1778-ban latin nyelvű előadásában mutatta be Göttingenben, amint azt Abraham Gotthelf Baumgartner *Természettanában* olvashatjuk.⁵ Szerinte Lichtenberg közvetlenül a gyanta (szurok) felszínét érintette meg elektromozott üveggel, illetve elektromozott gyantával, majd finom porral beszórva első esetben sugárszerűen elágazó alakzatot kapott stb. Ezekről írja Baumgartner: „A Lichtenberg-ábrák meggyőzően szemléltetik a kétféle elektromos állapot – du Fay által már korábban felfedezett – különbözőségét.” Majd így folytatja: „Az a tény, hogy a növények színére az üveg elektromosság savként, a gyanta elektromosság pedig lúgként hat, – egyes szerzők szerint – szintén a kétféle elektromosság közti különbséget mutatja.”

Baumgartner „Glaselectricitát” és „Harzelectricitát”-ről beszél. Itt hívnám fel a figyelmet arra, hogy Bolyai Farkasnál a „berz”, „berzített” szavak az „Electricitát” és „electrisiert” szavak fantáziadús megfelelői. A „napi” és „holdi” kifejezéseket Bolyai valószínű Lichtenbergtől vette át. Az „üveg-” és „napi berz” a pozitív; a „szuroki-” és „holdi berz” a negatív elektromosságot jelentik. Ezekkel a Bolyai Farkas által kitalált új szakszavakkal sem nyelvújító kortársainál, sem a későbbi

¹ Gündischné Gajzágó Mária, Szenkovits Ferenc, Gündisch György: *Bolyai Farkas fizikája és csillagászata. Másfél évszázada lappangó kéziratok*. Magyar Tudománytörténeti Intézet, Budapest, 2013. (Beszerezhető a MATI-nál, e-mail: tudomanytortenet@gmail.com).

² Ez utóbbi törekvés megvalósításában önzetlenül segített Bíró Tibor fizikatanár, volt kollégám, a Marosvásárhelyi Sapientia Egyetem ma is aktív alkalmazottja. Ezúton szeretném megköszönni közreműködését.

³ Lásd a könyv 189. oldalát, B 561/6 (Ez utóbbi szám a jegyzet könyvtári jelzete a Teleki-Bolyai Könyvtárban Marosvásárhelyen.)

⁴ Lásd a könyv 189. oldalát, B 649/2v. A jegyzet első sora: „Inter elementa inponderabilia quod numeratur tertium? Materia electrica ...”

⁵ A. Baumgartner: *Die Naturlehre nach ihrem gegenwärtigen Zustände mit Rücksicht auf mathematische Begründung*. Wien, 1826, 418–9. o., 265–6. §.

magyar nyelvű fizikai szakirodalomban nem találkoztam. Ezen nem csodálkozhatunk, hiszen Bolyai fizikatanári jegyzetei nyomtatásban annak ellenére nem jelentek meg, hogy évtizedeken át használták azokat a Marosvásárhelyi Református Kollégiumban.

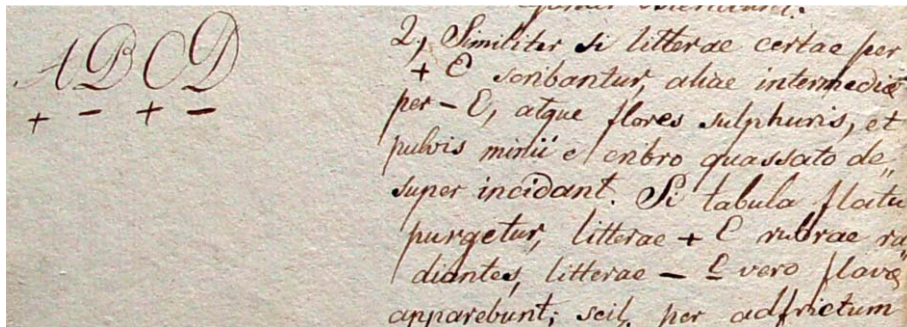
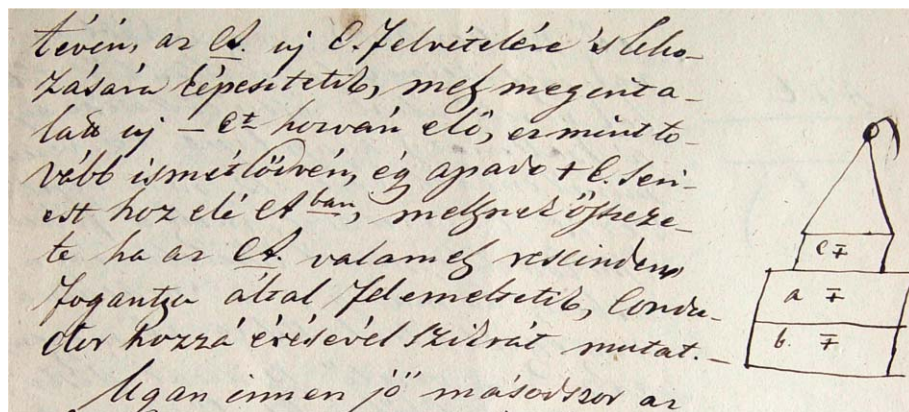
A *Néhány kérdés a villanyról* című Bolyai-jegyzet elején olvashatjuk még: „Továbbá ha egy simán öntött spanyolviasz vagy szurok táblára, egymás után betűk irodnak, az első berzített üveggel, a másik berzített spanyolviaszsal s ugy tovább; és minium s kénvirág elegyül szítaltatik reá, az 1, 3, 5-ik esat. betű veressen jelenik meg; a 2, 4-ik esat. sárgán, ha a feleslegi por lefuvatik.” (II. kísérlet)

Az itt leírt kísérlethez tartozik a mellékelt, 2. ábra a már említett latin nyelvű Bolyai-jegyzetből, ahol a számok helyett betűk szerepelnek.

Baumgartner leírásában⁶ sima gyantafelületre fémből, illetve elefántcsontból készült tárggyal kell írni, majd bizonyos magasságból minium- és kénpor keverékével beszórni. A fémmel írt helyeken a gyanta pozitívan, az elefántcsonttal írt helyeken pedig negatívan töltődik fel. A miniumpor levegőben esve pozitív, a kénpor negatív töltésű lesz; így a kénpor a fémmel írt betűket, a miniumpor az elefántcsonttal írottakat fedi be. (Megjegyezzük, hogy mindkét Bolyai-jegyzetben a sárga és vörös színeződés felcserélődött.)

A Bolyai által leírt két kísérletet először egy megdörzsölt üveg-, illetve ebonitrúddal próbáltuk elvégezni. Sajnos eredménytelenül. Valószínűleg az üveg-, illetve ebonitrúd dörzsölésével nem nyertünk elegendő mennyiségű töltést. Ezért áttértünk az elektrofor használatára. Ennek szükségességét különben az a körülmény is sugallta, hogy a latin nyelvű jegyzet Lichtenberg-ábrája fölött az „Electrophorum” szó olvasható.

3. ábra. Az elektrofor vázlatja Bolyai Farkas *Néhány kérdés a villanyról* című, 1847-ben írt kéziratából. *b* fémlap, például pléhtepsi; *a* dörzsöléssel feltölthető pogácsa, például spanyolviasz; *c* töltések szállítására szolgáló fémlap, például óntányér.



2. ábra. Részlet az előbbi, latin nyelvű Bolyai-jegyzetből, a kísérlet során a pozitív töltésű betűk vörösen, a negatív töltésűek sárgán színeződnek.

Bolyai Farkas, Baumgartner és Lichtenberg elektrofor-ismertetései

Nézzük meg először az elektrofor felépítését és működési elvét a fentebb említett, 1847-ben írt Bolyai-jegyzetben található leírás és vázlat (3. ábra) alapján.⁷

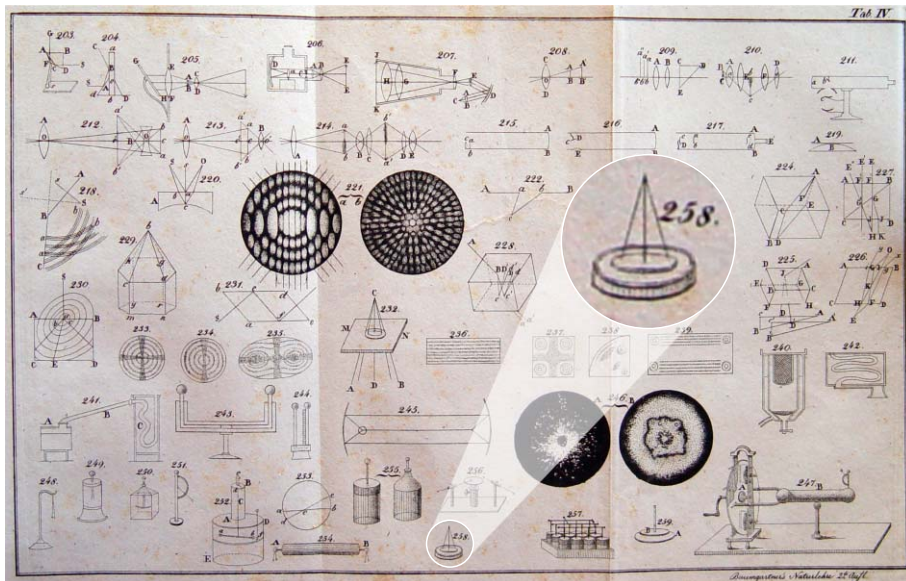
Az „electrophorum” vázlatán „*b*. berzvezető, péld: egy pléh tepsi, *a*. egy belé öntött sima színű spanyolviasz pogácsa vagy szurok placinta (placenta), *c*. berzivivő, péld: egy sima ón tányér; az *a*. nevezetik placentanak, a’ *b*. patina’nak, a *c*. clypeusnak, – az utobbi, valamely rescindens, péld: selyem szálak által, csigán fel ‘s le bocsáttathatik. Ha a szurok placenta színe megveretik róka farkkal – ϵ ered, melly *c*.-ben + zónát csinál distributio által, ... ekkor, ha *c*-hez érek, ... ‘s ha azután felemelem, + ϵ -t kapok; ha pedig hozzá nem értem ‘s úgy emelem fel in statu naturali lesz.”

Ma ezt – kissé tömörebben fogalmazva – így mondanánk: ha a pléh tepsibe öntött spanyolviasz- vagy gyantapogácsa sima felszínét rókaprémmel megcsapkodjuk, ráhelyezzük az óntányérra, majd ujjunkkal megérintjük, s végül selyemszálakkal az óntányérra felemeljük, az óntányér pozitív lesz. Ha érintés nélkül emeljük fel, az óntányér semleges marad. Magyarán: a spanyolviasz vagy gyanta rókaprémmel dörzsölve vagy csapkodva negatívan töltődik fel (az *a* pogácsa felszínén negatív töltések jelennek meg), a ráhelyezett *c* óntányéron elektromos megosztás történik, az elek-

tronok a *c* óntányér felső felületére taszítódnak, az óntányér alsó felülete pozitív töltésű lesz. Ha ujjunkkal megérintjük az óntányérra, az elektronokat onnan elvezetjük, a pozitív töltések a spanyolviasz felszínén lévő negatív töltések vonzása miatt maradnak, így a tányér pozitív lesz felemelése után is. Ha érintés nélkül emeljük fel, a megosztás megszűnik, az óntányér semleges lesz.

⁶ Ugyanott: 420. o., 268. §.

⁷ Lásd a könyv 192–3. oldalát, B 563/3.



4. ábra. Az elektrofor rajza Baumgartner 1826-ban kiadott *Die Naturlehre...* című könyve ábramelékletének 4. tábláján. A rajz alsó része a fémből készült forma, rajta a gyantapogácsa, felül a fémfedél a selyemzsinórokkal.

Baumgartner tömör leírást és rajtot⁸ (4. ábra) is ad az elektroforról: „Különösen fontos műszer a Wilke által feltalált és Volta által tökéletesített elektrofor. Ez egy vezető (fém) *formába* öntött sima felszínű gyanta *pogácsából*, valamint egy lekerekített, kisebb méretű, szintén vezető (fém) *fedélből* áll. A fedél *selyemzsinórokkal* emelhető, illetve súllyeszthető.”

A készülék leírását működésének részletesebb, egy oldalnyi magyarázata követi, valamint az a megjegyzés, hogy az elektrofor eredményesen hasznosítható gyújtókészülékeknel és leideni palackok feltöltésére is.

Lichtenberg⁹ részletesebben ismerteti a „beständiger Electricitätsträger” (Electrophorus perpetuus) felépítését. A „beständiger”, „perpetuus” jelzők arra utalnak, hogy a fedéllel ismételt töltéslevétel lehetséges, ha az

5. ábra. Elektrofor macskaprémme, 1780 körül, Göttingeni Egyetem Fizikai Intézete.



újából a pogácsára tesszük, megérintjük, majd leemeljük. Lichtenbergnél a *forma* kör alakú fémlemez vagy sztaniollal, illetve aranypapírral bevont deszkalap. A *pogácsa* burgundi gyanta, kolofonium, vörös pecsétviasz vagy terpentint tartalmazó gumilakk, amit megolvastva öntöttek a formába. A *fedél* szintén kör alakú fémlap, vagy vászonnal, esetleg bőrrel, végül sztaniollal bevont könnyű falemez. Az *alap* vagy *forma* úgy 18 hüvelyk, azaz körülbelül 46 cm, a *fedél* pedig 14 hüvelyknyi, vagyis körülbelül 36 cm (5. ábra).¹⁰ A fedél selyemzsinórokkal, vagy a fogantyúként hozzá erősített üvegcsővel emelhető fel. A szigetelő fogantyúval ellátott fedél használata előnyös, hi-

szén így a fedél, a tulajdonképpeni töltésszállító, a vízszintestől eltérő helyzetekbe is hozható.

Baumgartner és Lichtenberg is megjegyzi, hogy gyantapogácsa helyett a dörzsöléskor pozitívan feltöltődő üvegtábla is használható. Mivel azonban az üveg nem képes az elektromosságot elég hosszú ideig megtartani, levegőréteget kell helyette alkalmazni. Ezt valósítja meg *Joseph Weber* a „levegős elektrofor”-ral, amelynél a léckeretre kifeszített macskaprém könnyed súrolással éppen úgy feltölthető mint az üveglemez. Weber¹¹ több mint 220 éves könyvecskéjét ajánlom e téma iránt érdeklődőknek, akik 74 oldalon 24 kísérlet gót betűs, de áttekinthető leírását digitális formában olvashatják számítógépük képernyőjén, időutazást tehetnek az elektromosság születésének évtizedeibe.

A Lichtenberg ábrák felfedezése¹²

Georg Christoph Lichtenberg (1742–1799), a göttingeni egyetem híres fizika és csillagászat professzora abban a reményben, hogy nagyobb méretű elektro-

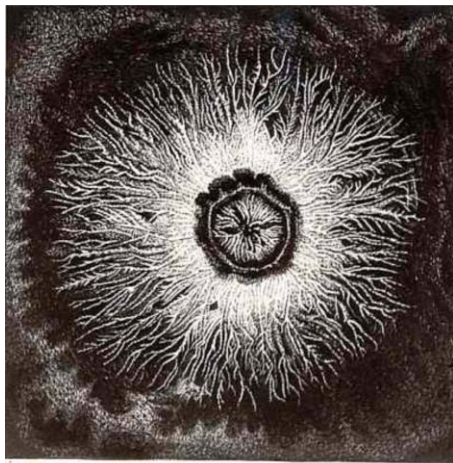
⁸ Baumgartner említett könyvében 435. o., 297. §, 258. ábra (az elektrofor részeinek német megnevezései: Form, Harzkuchen, Deckel). *Johann Karl Wilke* 1762-ben Wismarban felfedezte, *Alessandro Volta* 1771-ben a comói Paviában továbbfejlesztette az elektrofort.

⁹ *Anfangsgründe der Naturlehre. Entworfen von J. C. Policarp Erleben. Mit Zusätzen von G. C. Lichtenberg. 5. Auflage. Göttingen, 1791., 482–8. o., 538.b – 538.f §.*

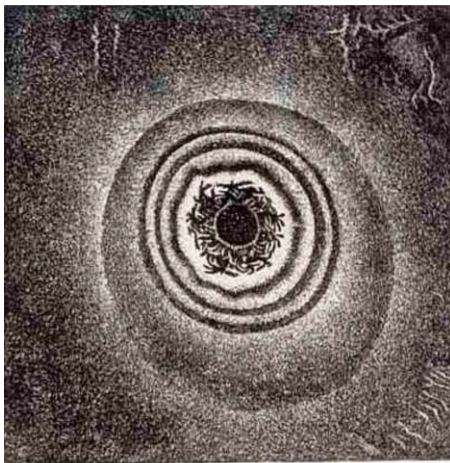
¹⁰ http://www.lichtenberg-gesellschaft.de/leben/l_wirk_phys.html

¹¹ Elegendő a „Joseph Webers positiver Lufterlektrophor” cím begépelése, <https://books.google.hu/books?id=j3I5AAAACAAJ&pg=PA23&lpg=PA23&dq=Webers+Lufterlektrophor&source=bl&ots=yZEDEi1tFJ&sig=0szkDHvYIsDKjRZrYKYaDjnUky8&hl=hu&sa=X&ved=0CDMQ6AEwA2oVChMIgY-7mtjzxwIVyV0UCh0YzggK#v=onepage&q=Webers%20Lufterlektrophor&f=false>

¹² Jelen fejezet, a közölt ábrák és idézetek netes forrása: http://www.lichtenberg-gesellschaft.de/leben/l_wirk_phys.html



Lichtenberg nova Cyp Asteris.



Lichtenberg nova Cyp Asteris.

6. ábra. Két eredeti, G. C. Lichtenberg által keltett ábra az 1777 áprilisától 1778 májusáig tartó időszakból.

forral eredményesebben kísérletezhet, 1777 áprilisában megépített egy 1,8 m átmérőjű elektrofort. Ehhez 26 kg gyantát használt fel, fedelét csigasorral emelte, és 40 cm-es szikrákat keltett vele, ami 200 kV kisülési feszültségnek felel meg.

„1777-ben tavasz kezdetén, közvetlenül az elektrofor elkészítése után szobám finom gyantaporral volt tele, amely készülékem alapfelületének gyalulása és csiszolása során szállt fel és aztán belepte a falakat, könyveket.” – meséli Lichtenberg, majd így folytatja: „Huzat esetén a por nagy bosszúságomra az elektrofor fedelére hullott. Amint később a fedelet gyakran a mennyezeten függeni hagytam, előfordult, hogy az alapfelületet nem egyenletesen fedte be a por, mint korábban a fedelet, hanem nagy gyönyörűségemre kis csillagokba, napocskákba, ágacsokba stb. rendeződött, eleinte alig felismerhető módon. Ha azonban ezekre port szórtam, jól felismerhetők és szépek lettek, az ablaküvegek jégvirágaihoz hasonlóan.”

Lichtenberg szerette volna megérteni gyantaporral kapcsolatos megfigyeléseit, ezért kísérleteket kezdett végezni az érdekes alakzatok létrehozására. Megfigyelte például, hogy koncentrikus körök sokaságát tudja létrehozni egyetlen szikrával.

Lichtenberg áprilisi felfedezéséről professzortársa, korábban tanára *Abraham Gottbelf Kästner* számolt be a Göttingeni Akadémián 1777. május 3-án: „Legszébb ábrái közül néhányat Lichtenberg professzor megpróbált lerajzolni, de nemsokára feladta, mert rövidebb utat talált a másolásra. A porábrákra, ragasztós fekete papírt préselt, majd a lenyomatokat üveglemez mögé tette. ... Ami különösen figyelemre méltóvá teszi ezt az eljárást az az, hogy egy ilyen napocskáról például tetszőleges számú lenyomat készíthető, mert ha az ábrát alkotó port letöröljük, ismételt por-

hintés esetén, azok újra előjönnek, gyakran 4-5 nap eltelté után is.”

E sorokban felismerhetjük napjaink másológépei és lézernyomtatói elvi alapjainak csírát.

Lichtenberg csak 10 hónappal később, 1778. február 21-én mutatta be az elektroforral és leideni palackkal keltett ábrákra vonatkozó kísérleteit a Göttingeni Királyi Társaság tudósai előtt. A dolgozat címe: *Új módszer az elektromos anyag természetének és mozgásának vizsgálatára*.¹³

Következzék egy kísérleti leírás Lichtenberg nevezetes előadásából. „Ebonit- vagy közönséges gyantatáblára állítsunk csiszolt végű kis fémcsövet. Vigyünk pozitív töltést (+E) a csőre. Ha a csövet pusztá kézzel megfogva eltávolítjuk, és a táblára port szórunk, a táblán sugárzó nap jelenik meg.” – Lásd a 6. ábra bal oldali, csillagszerű alakzatát. – „Ha a csövet szigetelő tárgy segítségével távolítjuk el, a csillagszerű alakzaton hiányzik az a fekete kör, ahonnan a sugarak az előbb kiindultak.”¹⁴ (A koncentrikus körökből álló jobb oldali ábra kialakulásához negatív töltéseket kell a csőre vinni.)

7. ábra. Felül Kästner és Lichtenberg, alattuk tanítványaik: a fiatal Gauss és Bolyai Farkas.



¹³ Az előadás eredeti, latin nyelvű címe: *De nova methodo naturam ac motum fluidi electrici investigandi*.

¹⁴ A kísérlet második részére vonatkozó eredeti ábra a 12. lábjegyzetben megadott forrásban nem áll rendelkezésre, különben a jelenség kísérletileg ellenőrizhető.

Lichtenberg előadásait 1796 és 1799 között Bolyai Farkas és *Carl Friedrich Gauss* (7. ábra) is élvezettel hallgatta. Az egy szemeszteres, 120 órás fizikakurzusán Lichtenberg körülbelül négyszázötven különböző kísérletet mutatott be. Ő tekinthető a modern bemutató kísérleti előadások atyjának. Gauss „Göttingen díszé”-nek nevezte őt. Az aforizmáiról is híres Lichtenberg hirdette és elvárta, hogy a természeti tünevények, kísérletek bemutatása, ismertetése ne csak

érdekes legyen, hanem esztétikai örömet is okozzon a hallgatónak.

Befejezésül idézzük *Albert Einsteint*, amint Lichtenberget, a nagy kísérleti fizikust és természetfilozófust dicséri: „Senkit sem ismerek, aki olyan tökéletesen értené a növekvő fű hangját, mint Lichtenberg.”¹⁵

¹⁵ Az eredeti idézet német nyelven: „Ich kenne keinen, der mit solcher Deutlichkeit das Gras wachsen hört wie Lichtenberg.”

HÍREK – ESMÉNYEK

PLÓSZ KATALIN, 1939–2015

Plósz Katalin, Rátz Tanár Úr Életműdíjas fizikatanár, Boldogasszony iskolanővér, az Eötvös Loránd Fizikai Társulat Középiskolai Szakcsoportjának volt titkára 76 éves korában 2015. december 7-én, hosszú betegség után elhunyt.

Az Eötvös Loránd Tudományegyetem fizika-matematika szakát 1962-ben végezte el, ettől kezdve – mivel már az érettségi után belépett a Boldogasszony Iskolanővérek, akkori nevükön a Miasszonyunkról nevezett Szegény Iskolanővérek rendjébe – mintegy 20 évig a debreceni Svetits Katolikus Gimnázium, majd 1985-től nyugdíjazásáig a budapesti Patrona Hungariae Gimnázium tanára volt.

Georgia nővér – a fiatal kollégák és tanítványok számára Dzsordzsi néni – sokat kísérletezett és kísérleteztetett. Gondos óre és fejlesztője volt a gimnázium szertárának, igényes támogatója az iskolába belépő fiatal fizikatanároknak. Az előadóterem asztalán centiméterre kimért helye volt az egyes eszközöknek, a gyors előkészítést gondos, a kollégák által követhető jegyzetei segítették. Mindkét iskolában – a Patrona 1992–1995 évi bővítése során is – nagy szerepe volt az előadóterem kialakításában és a szertárfejlesztésben. Úttörő volt a tanulókísérletek oktatásba való bevezetésében. Az eszközkészítésbe – szakköri foglalkozás keretében – tanítványait is bevonta. Diákjait rendszeresen küldte megyei és országos versenyekre, kísérte őket tudományos előadásokra, a Fizikai Tanulói Ankétokra, de az iskolába is hívott neves előadókat.

Nagy gondot fordított a humán érdeklődésű tanulóknak, a lányok természettudomány iránti érdeklődésének felkeltésére. Az ATOMKI diákpályázatain, különösen a kísérleti témákban, 1980 és 1995 között több mint száz tanulója szerepelt „dobogós” vagy díjazott csoportok tagjaként. Az Ankétokat rendszeresen látogató kollégák közül ki ne emlékezne mosolyogva a „gilisztásokra”, a biofizikai kísérletekkel díjat nyert lánycsapatra, akik műhelyfoglalkozáson segítettek bennünket, tanárokat a kísérletezésben!



Plósz Katalin maga is számos továbbképzésben vett részt, lelkes támogatója volt a modern fizika oktatásának. Emellett egészen más nevelői területek is érdekelték. Színdarabot írt és rendezett a rend alapítójának életéről, valamint – a századik évfordulón – az elektron felfedezéséről. Pedagógusi munkáját sajtós humorral fűszerezte.

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat 1991-ben ünnepelte centenáriumát. Ebből az alkalomból mutatta be Plósz Katalin a családi örökségként kezéhez jutott, addig még nem publikált Eötvös leveleket, és megkezdte apa és fia, *Eötvös József* és *Loránd* kapcsolatának feltárását. Évről-évre több anyagot gyűjtött össze az Eötvös-családról, valamint a gyermek és az ifjú Eötvös Loránd fejlődéséről, levéltárak, anyakönyvek, könyvtárak anyagának kutatásával. 1998-ban már 20, majd 22 tablóból álló gyűjtemény készült el, amely a következő években bejárta az ország középiskoláit.

A munka egyes újabb fázisairól a Fizikatanári Ankétokon és a *Fizikai Szemle* hasábjain közzétett cikkeiben számolt be.

Plósz Katalin 1993–1999-ig az Eötvös Társulat Középiskolai Oktatási Szakcsoportja titkáráként aktívan részt vett a társulati munkában, az Anketók szervezésében.

A fizika népszerűsítésében végzett, valamint versenyre felkészítő munkáját, Eötvös Lorándra vonatkozó kutatásait a szakmai élet többször elismerte: Mikola Sándor-díjat (1991), Eötvös társulati érmet (1996) kapott, 2007-ben a Marx György professzor úr által útjára indított vándorplakett tulajdonosa lehetett. 2007-ben a fizikatanároknak járó legmagasabb kitüntetést, a Rátz Tanár Úr Életműdíjat is átvehette a Magyar Tudományos Akadémián.

A kutatómunkát nyugdíjas éveiben is folytatta: az apa-fiú kapcsolaton kívül, mint vérbeli pedagógust, főként az foglalkoztatta, hogy a különböző hatások közül melyik miben és milyen mértékben alakította az ifjú Eötvös Loránd személyiségét. Miben hatottak rá az apa elvei, példája, vagy az utazások során szerzett személyes tapasztalatok, illetve az iskola, a Piarista Gimnázium szellemisége, és az adott korban magas szintű természettudományos képzése? Mindezek feltárásával a mának, a jelen iskolai nevelésének kívánt

utat mutatni, példát szolgáltatni. Az anyag folyamatos bővülésével a könyvformában való kiadás halasztódott, végül az informatikai feldolgozásban és a sajtó alá rendezés előkészítésben az egyre súlyosbodó, két és fél évtizeden át nagy megpróbáltatások elé állító, de bátran viselt betegsége megakadályozta. Gyűjteményének méltó gondozása a szellemi utódokra vár.

Életművét kollégái, rendtársai szavával jellemezhetjük legkifejezőbben: szenvedélyes tanár volt.

Emlékét tisztelettel és pedagógusi példának tekintve őrizzük – kollégák, barátok, tanítványok.

Vantsó Erzsébet

Plósz Katalin írásai a *Fizikai Szemlében*

Eötvös Loránd elveszettnek hitt levelei – 1992/41

Jedlik Ányos emléktúra – 1995/427

A Mikola verseny helyezettei a CERN-ben – 1997/34

Kísérletek sugárzó hővel – 1997/190

A hőmérsékleti sugárzás bemutatása az iskolában – 1998/102

„Mint legjobb barátod őszinte tanácsa”... – Nevelési elvek Eötvös

József és fia, Loránd levelezésében – 1998/185

Eötvös Loránd emlékkiállítás – 1998/404

Eötvös Loránd gyermek- és ifjúkora – 2002/197

Hol született Eötvös Loránd? – 2003/346

MAJOR JÁNOS, 1945–2015

Egy napfényes kora őszi napon a budafoki temetőben temettük el *Major Jánost*, sokunk által jól ismert fizikust. Elbúcsúztak tőle családja, rokonai, barátai és kollégái.

Major János 1945. július 17-én született Debrecenben, ott is kezdett iskolába járni, majd 1954-ben a család Budapestre költözött. Középiskolai tanulmányait az akkor magas színvonalú Kandó Kálmán Technikumban végezte. Családi hagyományt folytatva a *Középiskolai Matematikai Lapok* (ma *Középiskolai Matematikai és Fizikai Lapok*) szorgos megoldójává vált mind matematikából, mind fizikából. A középiskola második osztályát végezte, amikor meghívást kapott az Eötvös Loránd Fizikai Társulat Ifjúsági Fizikai Körébe. Ezen önképző szervezet keretein belül, *Gaal István* irányítása alatt, a tagok kéthetente előadást tartottak a fizika valamely területéről. Nemsokára János e Kör társtíkára lett. Az előadások utáni hosszú beszélgetések, néha heves viták alatt – amelyek az utcán sétálva is folytatódtak – alakult ki máig tartó barátságunk. A középiskola befejezése után sem szűnt meg kapcsolata az Ifjúsági Fizikai Körrel, amelynek később nemcsak résztvevője, hanem irányítója is lett.

Az Ifjúsági Fizikai Kör hatására döntötte el, hogy fizikus lesz, az ELTE fizikus szakán diplomázott 1968-ban. Első éves hallgatóként az Eötvös-versenyen harmadik díjat nyert. Diákköri munka keretében – *Mezei Ferenc* irányítása alatt – nagyérzékenységű dilatometert fejlesztett, amely 100 nanométer hosszváltozást is képes volt kimérni. A diákköri konferenciákon két dolgozata is díjat nyert. Mint a Fizikus Diákkör titkára

nyári iskolákat, konferenciákat szervezett. Egyetemi évei alatt és utána is segített a középiskolás diákok fizikai olimpiára való felkészítésében.

Az egyetem elvégzése után az Eötvös Loránd Tudományegyetem Kísérleti Fizika Tanszékén előbb tanársegédként, majd adjunktusként dolgozott. Nagy pedagógiai érzékkel és mély szakmai ismeretekkel végezte oktatási munkáját, amelyet mindig fontosnak tartott. Több évfolyam fizikus és matematika-fizika szakos hallgatója emlékszik nevezetes előadásaira és gyakorlataira. 1973-ban az Eötvös Loránd Fizikai Társulat hármunkat, Mezei Ferencsel együtt, Selényi Pál-díjjal tüntetett ki. Kandidátusi dolgozatát 1975-ben védte meg a nikkell hőátágulásának és fajhőjének precíziós méréséből. A kritikus hőmérséklet körüli mérés olyan pontos volt, hogy belőle kritikus exponenseket lehetett meghatározni.

1974-ben került a Műszaki Fizikai Kutatóintézetbe, ahol a volfrám és molibdénrel ötvözött acél fémtanával, valamint előállításuk technológiájával foglalkozott. Fél évet töltött a Pennsylvanai Egyetemen, mint „visiting scientist” *Wayne Worrell* professzor csoportjában.

1983-tól a stuttgarti Max Planck Institut für Metallforschung intézetben és a Stuttgarti Egyetemen dolgozott. A kísérleti szilárdtestfizikában alkalmazott nukleáris módszerekkel kutatta az anyag tulajdonságait. Előbb *Alfred Seeger* professzor – ő szintén a közelmúltban hunyt el – munkatársaként a pozitronannihilációs és müon-spektroszkópia módszereivel elért eredményekben játszott jelentős szerepet. A pelletron gyorsító üzembe helyezése után pozitronforrást épített hozzá, és

relativisztikus pozitronokkal vizsgálta az anyagokat. A pozitron „age-momentum correlation” mérés (AMOC) és a müonspinrezonancia-mérések szakértőjévé vált. A 2000-ik évtől a Stuttgarti Egyetemen számos egyetemi előadást tartott német és angol nyelven egyaránt, sok doktori folyamatban vett részt. Seeger professzor nyugdíjba vonulása után *Helmut Dosch* professzor vette át az intézetet, ekkor ismét egy új kutatási terület nyílt meg János előtt. Az addig kívülálló szemével kamatoztatta müonos tapasztalatait a neutronos kutatások területén. A kisszögű neutronszórás és a neutronspin-echo módszer házasítása által egy olyan mérési módszer kifejlesztésében és megépítésében játszott döntő szerepet, amely különösen alkalmas a mezoszkopikus struktúrák vizsgálatára (SERGIS).

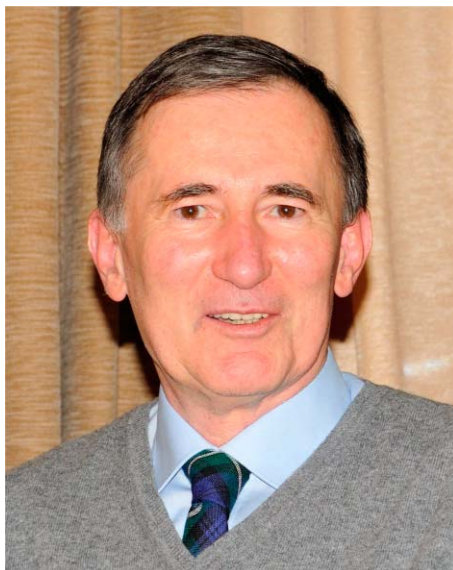
Pályája során otthonosan mozgott Európa számos gyorsítójában és kísérleti reaktorában: SIN, később PSI (Svájc), RAL (Anglia), ESRF és ILL (Franciaország), FRM II (Németország).

Széles szakmai érdeklődése révén szinte minden fizikai kísérleti eszközt jól ismert. Sok diplomamunkás és doktorandusz hallgató köszönhette neki a kísérleti fizikusi képességek megszerzését. Már fizikusi pályája kezdetétől, sőt hallgató korától folytatta azt a rá jellemző pedagógusi tevékenységet, ami nem egyszerűen a fizika népszerűsítésére irányult, hanem inkább az érdeklődés elmélyítésére, gondolkodásra készített ifjút és idősebbet egyaránt. Csak egy példa erre az, amikor még egyetemistaként néhány éven keresztül a TIT (Tudományos Ismeretterjesztő Társulat) keretében vidéki középiskolákat látogattunk meg, és ott előadásokat tartottunk fizikai problémák megoldásából. Egy fizikus kollégánk mesélte el, hogy éppen János egyik ilyen előadása a mechanikai feladatok megközelítéséről adott neki egy olyan „pedagógiai lökést”, hogy egyre több örömet lelve a fizikafeladatok megoldásában végül az ELTE fizikus szakára jelentkezett. Kezddő fizikusként újra János segítette első munkahelyén. Életre szóló szakmai és személyes kapcsolat alakult ki közöttük. Nem ő volt az egyetlen, akit János megérintett lelkesítő tanításával és elindított a fizikusi pályán.

Erős belső készletést érzett a tudás és öröme másokkal való megosztására. Támogatott és szelíden nevelt mindenkit, aki csak enyhe érdeklődést is mutatott a

fizika, de bármilyen tudás világa iránt, mindezt úgy, hogy saját személyét soha nem helyezte előtérbe, a másik volt fontosabb számára. Erre így emlékezik egy másik tanítvány-kolléga barátja: „János úgy tudott segíteni, hogy hallgatott, kérdezett, látszólag másról beszélt. Én általában csak utólag jöttem rá, hogy tőle kaptam a megoldást úgy, hogy rákérdezett valami másra, a megértést és az érzelmi támogatást úgy, hogy másra terelte a szót és úgy tett, mintha semmi se történt volna.”

A kísérleti fizikusi kutatómunkából 2010-ben ment nyugdíjba, s ettől fogva „hobbijának”, a tanításnak szentelte életét, amivel egyben édesapja hagyományát is folytatta. Tízéves gyerekektől érettségire készülő nagydiákokig ismertették meg általa a természettudományos gondolkodás ajándékait, a kísérletezés örömet.



Külföldi munkája során is kapcsolatot tartott fenn a hazai tudományos élettel. A „Tudomány Doktora” címet 1994-ben védte meg a Magyar Tudományos Akadémián. János közreműködésével került a KFKI-ba a Grenobleban korábban működött MPI MF neutron-reflektométer, aminek itthoni továbbfejlesztett megépítésében szintén fontos részt vállalt. Az ELTE Anyagfizikai Tanszékére egy forgó anódos röntgen-diffraktométer megszerzését

is segítette. Hosszabb ideig ő látta el a Budapesti Neutronközpont (BNC) nyalábidő-pályázati bírálóbizottságának elnöki tisztségét.

János mindig is szeretett sportolni, sokat síelt, kérekpározott. Fiatal korában háromtusázott, valamint később is rendszeresen futott és úszott. Nyugodt természete, és nagyon nyugodt keze folytán célba lövésben is tehetséges volt. Egyszer egyetemista korunkban a Balatonon egy céllövöldében mindent lelőtt, amire kértük, ami után a céllövöldés megtagadta, hogy további töltenyt vegyünk. Nyugodtsága és kez ügyessége a kísérleti munkában is nagy hasznára volt.

Jánosban tehetséges embert ismertünk, aki céljai eléréséért keményen, de nem erőszakosan dolgozott. Életpéldája a munka folytatására serkent mindnyájunkat. Betegségét hősiiesen tűrte, tisztában volt súlyosságával, de nem csüggedt. Ebben is példaképünk lehet.

Itt, a *Fizikai Szemle* hasábjain is búcsúznak tőle kollégái, barátai és tanítványai.

Tichy Géza

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: Szatmáry Zoltán főszerkesztő.

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

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

Terjeszté az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, előfizethető a Társulatnál vagy postautalványon a 10200830-32310274-00000000 számú egy számlán.

Megjelenik havonta, egyes szám ára: 800.- Ft + postaköltség.

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

Benkő József, Mizser Attila (szerk.): METEOR CSILLAGÁSZATI ÉVKÖNYV 2016

Magyar Csillagászati Egyesület, Budapest, 2015, 368 oldal

Az évkönyvben különböző szolgáltatások találhatók.

A kötet nagyobb részét adó *Kalendárium* napról napra követi a Nap és a Hold keltét, delelését, nyugtát, a meteorológiai előrejelzések bizonytalansága nélkül. Ezekhez az adatokhoz a névnapokkal együtt minden hónapban két oldal kell – tehát több mint 180 oldal marad a csillagászat szakmai adataira: a bolygók jellemzőire az egyes hónapokban, az eseménynap tárra (hogy például január 23-án 5 óra 31 perckor vége a Ganymedes (Jupiter-hold) fogyatkozásának; vagy hogy szeptember 10-én 22 óra 3 perckor a Hold eléri legkisebb deklinációját); az adott hónap fontos üstökösének mozgásaira; a Jupiter-holdak és Szaturnusz-holdak helyzetváltozásaira. Itt jut hely a fontosabb együttállások leírására és az évfordulókra – a csillagok születésénél pontosabban ismert a csillagászok születése, és elegendően vannak ahhoz, hogy minden hónapra jusson néhány kerek évforduló. És mert a *Meteor* a többségében amatőr csillagászból álló MCSE (Magyar Csillagászati Egyesület) évkönyve, kerül hely a nyári megfigyelési lehetőségek ismertetésére, hangsúllyal az augusztusi hullócsillagok, a Perseidák tulajdonságaira.

A 190 oldalas *Kalendárium* miatt lesz egész évben kezünk ügyében a *Meteor*; csillagászati ismereteink bővüléséről a 110 oldalt kitevő öt cikk gondoskodik.

Balázs Lajos Konkoly Thege Miklós és az asztrofizika forradalma című írásában az ógyallai földbirtokos családban 1842-ben született *Konkoly Thege* működését, tudományos eredményeit, a magyar csillagászat fejlődésében 1916-ban bekövetkezett haláláig játszott szerepét vázolja fel. 1871-ben kastélya mellett kis kupolát épített egy 4 hüvelykes távcső számára. Tíz évvel később már tekintélyes műszerparkkal rendelkezett – 10 hüvelykes reflektorral, refraktorokkal, 19 spektroszkóppal. A műszeres fejlődés szakadatlan munka közben valósult meg: napfizika, üstökösök, meteorok, kisbolygók, bolygók és a csillagszínképek megfigyelése, elméleti vizsgálata. Persze mindez munkatársakkal: „Szigorú szabálynak számított az ógyallai csillagvizsgálóban, hogy derült éjszakákon mindig észlelni kellett. Borult időben azonban a Konkoly-kastélyban vidám vendégségek voltak, ahol politikusok, hazai és külföldi tudósok, írók, költők, zenészek mellett természetesen a csillagda munkatársai is részt vettek.”

Tóth Imre Az üstökösök megismerésének mérföldkövei 2. rész: Üstökös kutatás az űrkorszakban című írásában a 2. szám az előzményre utal: „Az üstökösök vizsgálatának öt korszakát lehet megkülönböztetni.

Az első négy korszak mérföldköveit foglalja össze a *Meteor Csillagászati Évkönyv 2015-ös kötete* 242–264. oldalán megjelent cikk.” Az ötödik korszakról szól ez az írás, amihez ugyan nem kötelező, de érdemes az előzményt is áttanulmányozni.

„A 20. század utolsó harmadában egyre több üstököszt figyeltek meg egyre korszerűbb eszközökkel az ultraibolyától a rádiótartományig. Így egyre több kémiai elemet, molekulát [...] mutattak ki.” Az eddig üstökösben talált legnagyobb moláris tömegű molekula az etilén-glikol. Ezt, a fagyálló alapanyagát is adó biomolekulát a csillagközi anyagban is megfigyelték. A mesterséges holdak és földi telepítésű űrteleszkópok segítségével rengeteg üstököszt fedeztek fel. Közvetlen mérésekkel és szimulációs modellekkel mind az üstökösök ioncsóvjára, mind az üstökös magra vonatkozóan nagy információmennyiség birtokába jutottak a kutatók. Az űrszondák korszaka 1986-ban a Halley-üstökös mellett elrepülő szondákkal kezdődött. Közülük „a VEGA szondák televíziós képfelvevő rendszere, elektronikája, fedélzeti szoftvere és földi optikai kalibrációja magyar fővállalkozásban készült.” Különböző űrszondákkal sikerült néhány száz km-re megközelíteni egyes üstökös magokat – az így végzett megfigyelések eredményeként az üstökös magok meglepő sokfélesége adódott. Egy másik űrszonda „két üstökös porkómáján átrepülve üstökösport gyűjtött be aerogél anyagba ágyazva, és egy kapszulában visszajuttatta azt a Földre.”

Tóth Imre cikkének főszereplője a Rosetta űrprogram, ezen belül a 2014-es leszállás egy üstökös mag felszínére. Az ESA (Európai Űrügynökség) 2004 tavaszán indította a 67P/Churyumov–Gerasimenko üstökös felé a jelentős magyar hozzájárulással készült szondát. Augusztus 6-án pályára állt a Rosetta az üstökös mag körül. A pályán tartáshoz rendszeres korrekcióra volt szükség. A szonda műszerparkja révén lehetővé vált az üstökös gáz- és poranyagának elemzése, az üstökös mag felületének feltérképezése. A közeli megfigyelést akadályozta az üstökös feléledő aktivitása, ezért a szondát 2015 tavaszán a magtól 100 km-re biztonságos pályára vezérelték. Közben, 2014. november 12-én a Philae leszállóegység elérte az üstökös mag felszínét, ám a helyhez kötési manőver nem sikerült, a Philae némi pattogás után falakkal határolt helyen állapotodott meg, ahol árnyékba kerülve akkumulátora nem egészen három nap alatt kimerült. De aktív állapota 54 órájában rengeteg információt gyűj-

tött és továbbított a Rosetta rendszerén keresztül a Földre. Ráadásul 2015 június közepén újraéledt – igaz, csak 85 másodpercig lehetett a 300 millió km-re lévő Philae rádióüzenetét fogni a Földön.

A 40 oldalas cikk hangvételét az elismerés és lelkesedés jellemzi. Befejezésül a közeljövő terveiről is szól – egyebek közt a 2017-ben induló Comet Odyssey-ről, amely egy évig figyelne közelről a 9P/Tempel 1 üstökös, majd a felszíni mintavétel eredményével térne vissza a Földre 2027-ben.

Regály Zsolt Távoli bolygórendszerek felfedezése és keletkezése címmel az utóbbi két évtizedben felfedezett több mint 2000 exobolygóval kapcsolatos kérdéseket tárgyal.

A távoli bolygók felfedezésének különböző módszerei közül a bolygóátvonulás a csillagkorong előtt bizonyult a legeredményesebbnek, annak ellenére, hogy a bolygópálya síkja tetszőleges lehet a látóirányhoz képest. A gravitációs lencsehatás módszere áttekintésének az általános relativitáselmélet centenáriuma különös hangsúlyt ad.

A távoli bolygórendszerek tulajdonságait Naprendszerünk jól ismert adataival célszerű összevetni. Ezt az összevetést négy színes ábra mutatja igen szemléletesen. Ezek a megfigyelési adatok alapozzák meg a modern bolygókeletkezési elméleteket. A ma általánosan elfogadott bolygómag-akkréciós elmélet szerint „a keletkezés főbb fázisai a következők:

1. A por növekedése során a mikrométeres szemcsék összetapadnak, és milli- vagy centiméteres méretű agglomerátumokat alkotnak.

2. Az agglomerátumok ütközése során a méretnövekedés tovább folytatódik, és kialakulnak a kilométeres planetézimálok.

3. A planetézimálok gravitációs vonzásuk következtében egybeolvadnak, és kialakulnak a bolygócsírák, amelyek további ütközéseik révén Föld-szerű kőzetbolygókká növekednek.

4. Az elegendően nagy tömegű kőzetbolygók hatalmas gázköpenyt gyűjtenek, és kialakulnak az óriásbolygók.”

Befejezésül a bolygókeletkezés nyitott kérdései is előkerülnek.

Szinte Regály Zsolt cikkének folytatása *Kóspál Ágnes és Moór Attila* írása: *Hogyan látja az ALMA a fiatal csillagok korongjait?* ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) a világ legnagyobb milliméteres antennahálózata a chilei Atacama-sivatagban. Milliméteres hullámhosszú rádióhullámokat kellően magas és száraz helyen enged át a légkör, ezért épült az ALMA az 5000 méter magasan található sivatagban.

„A perdület megmaradása miatt a születőben levő csillagokat egy anyagkorong veszi körül, amelyről por és gáz áramlik a növekvő protocsillagra [...]. A ko-

rongban a porszemcsék összetapadnak, bolygókeletkezésévé, planetézimálokká állnak össze.” A korong sugárzásának milliméteres hullámhosszúságú komponensét vizsgálva az ALMA segítségével számos meglepő eredmény adódott. Szép felvétel tanúsítja, hogy már fiatal, néhány millió éves csillagok körül is megindul a bolygóképződés. A felvételek alapján a fiatal csillagok körüli különböző méretű porszemcsék elhelyezkedését, egymásba alakulásuk és növekedésük dinamikáját lehet megállapítani. Az ALMA segítségével a protoplanetáris korongban bonyolult cianidmolekulákat fedeztek fel, amiből arra lehet következtet-

ni, hogy a Naprendszer szerves molekulákat tartalmazó üstökösei nem tekinthetők különösnek az Univerzumban.

Az ötödik cikk *Gabányi Krisztina, Frey Sándor* írása: *Legközelebbi galaxiszomszédaink, a Lokális Csoport*. A cikk tárgya egy mondatban: amit galaktikus környezetünkről mindenkinek tudni illik. 1936-ban a Lokális Csoporthoz azokat a galaxisokat sorolták, „amelyek úgy tűntek, közelebb vannak a Tejútrendszerünkhöz, mint mások; szám szerint tizenegyet. Azóta eltelt közel nyolcvan év, s az ismert tagok száma majdnem nyolcszorosára nőtt.” Ilyen népes társaságban számos érdekességgel találkozhatunk. Van közöttük csillagontó galaxis, amely-

ben hatalmas tempóban születnek új csillagok, azonban a Lokális Csoport tagjainak többsége öreg csillagokból áll. A Lokális Csoport kiterjedése az Univerzumhoz képest oly csekély, hogy benne a Hubble-törvény sem érvényes – a csoport két legnagyobb tömegű tagja, Tejútrendszerünk és az Andromédaköd 110 km/s sebességgel közeledik egymáshoz. A megfigyelések alapján alkotott dinamikai elméletek szerint a múltbeli – több milliárd évvel korábbi – eloszlások igencsak különböztek a jelenlegitől. A jövőbe tekintve pedig az várható, hogy hatmilliárd év múlva az Andromédaköd és a Tejútrendszer egybeolvadnak. A jelenben pedig a Lokális Csoport kutatásával „a csillagászok közelebb kerülnek saját galaktikus környezetünk még pontosabb feltérképezéséhez, s általában a galaxisok felépítésének, kialakulásának, fejlődésének, kölcsönhatásainak megértéséhez.”

A *Meteor csillagászati évkönyv* utolsó oldalain a csillagászok belügyeiről tájékozódhatunk, csillagászati egyesületek, kutatócsoportok, tanszékek beszámolóit olvashatjuk. Azt hogy belügy, a beszámoló műfaja okozza, hiszen tapasztalhatjuk, hogy a csillagászat széles körű érdeklődést vált ki. A *Fizikai Szemle* is hasznos húz ebből az érdeklődésből, sokat köszönhetünk csillagász szerzőinknek, akiknek írásaival örömmel találkozunk az idei *Meteor évkönyvben* is.

Füstöss László

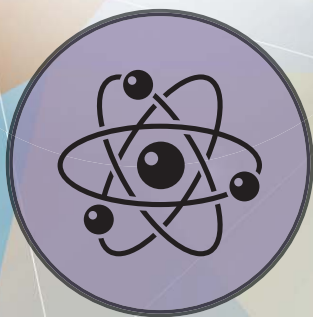
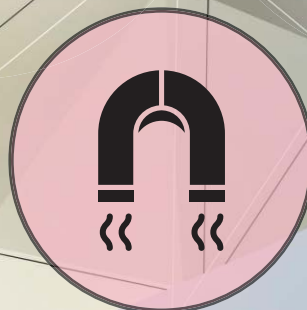
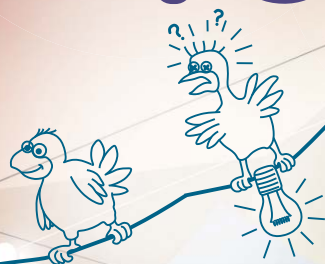




Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat szervezésében



2016. ÁPRILIS A FIZIKA MINDENKIÉ 2.0



A fizika 2016-ban is mindenkié! A tiéd, miénk és mindenkié – tanároddal, barátaiddal, szüleiddel fizikázz, végezz kísérletet vagy készíts új eszközt, hallgass vagy szervezz előadást –, szóljon minden a fizikáról! Vegyél részt, regisztráld a saját programod és ünnepeljük együtt a fizika kérdéseit és csodás eredményeit! Hiszen a fizika segítségével adunk választ számos, a társadalmat érintő problémára – például energia, közlekedés, kommunikáció, környezetvédelem –, amelyek mindannyiunk életét befolyásolják.
Mert A FIZIKA MINDENKIÉ!

Információért látogass el weboldalunkra:

WWW.AFIZIKAMINDENKIE.KFKI.HU

Támogatók:

