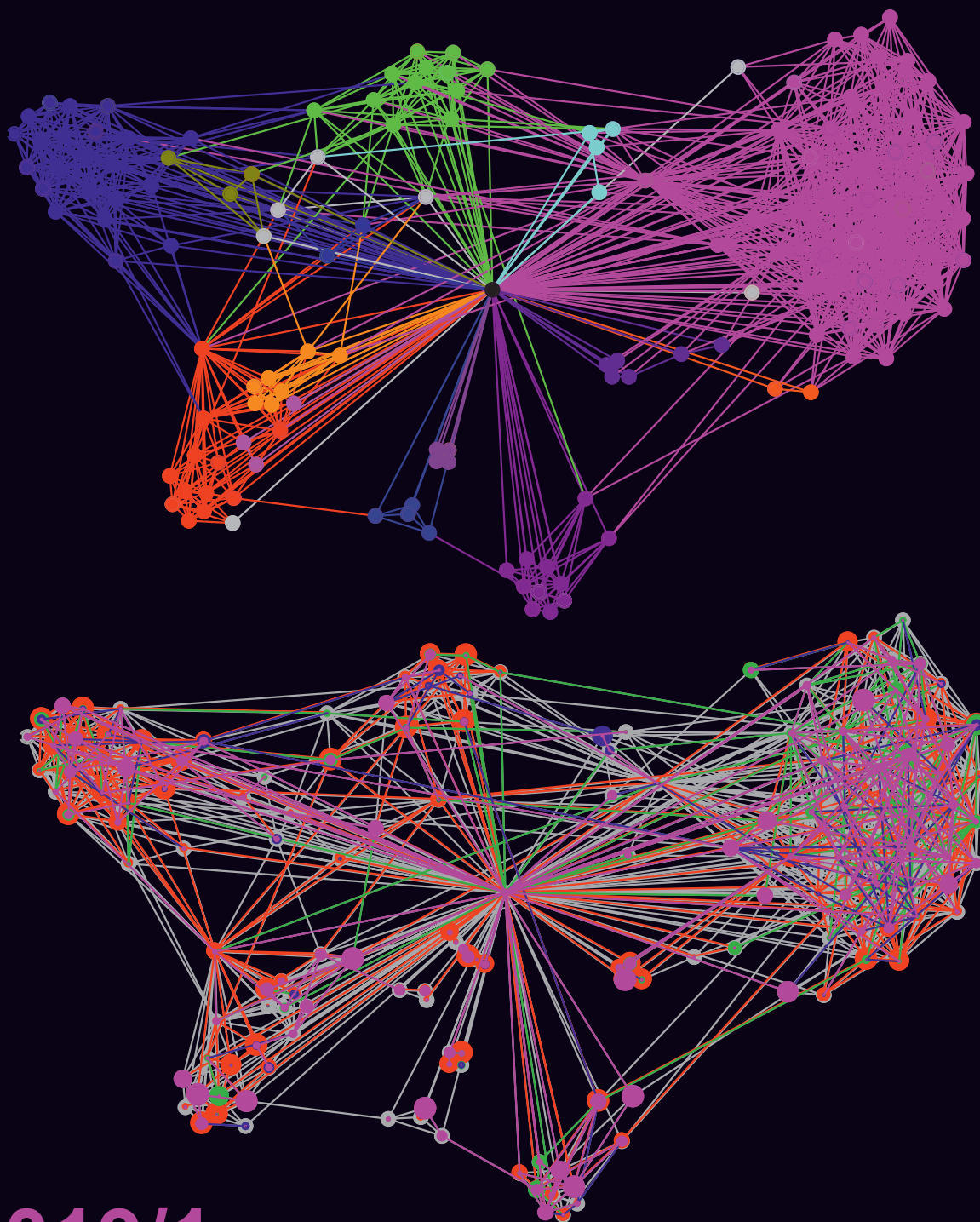


fizikai szemle



2019/1

Tájékoztató az Eötvös Loránd Fizikai Társulat 2019. évi tagdíjairól

Tisztelt Társulati Tagjaink!

Mindenekelőtt szeretném tolmácsolni a **Társulat Elnökségének üdvözlését és újévi jókívánságait** a Társulat tagjainak, a fizika barátainak és a **Fizikai Szemle** valamennyi olvasójának. A Társulat és a **Fizikai Szemle** az idén is változatlan erővel kívánja megvalósítani mindazokat a feladatokat, amelyek betöltésére Alapszabályában vállalkozott.

Kérem, hogy a 2019. évre vonatkozó tagdíjukat, amelynek összege a 2018. évhez képest **csak a papíralapú terjesztést kérők esetében növekedett kis mértékben** (az elektronikus formában kérők számára nem változott), az alábbiak figyelembevételével szíveskedjenek befizetni.

Ha Ön a Társulatunk **rendes tagja** és

- a **Fizikai Szemle** számaait **elektronikus formában** kéri, akkor a 2019. évi tagdíja **8400 Ft**.
- a **Fizikai Szemle** számaait **papíralapú terjesztéssel** kéri, akkor a 2019. évi tagdíja **9000 Ft**.

Ha Ön a Társulat tagjaként **általános vagy középiskolai tanár** és

- a **Fizikai Szemle** számaait **elektronikus formában** kéri, akkor 2019. évi tagdíja **800 Ft** alaptagdíj + **4600 Ft** kiegészítő tagdíj, azaz összesen **5400 Ft**.
- a **Fizikai Szemle** számaait **papíralapú terjesztéssel** kéri, akkor 2019. évi tagdíja **800 Ft** alaptagdíj + **5200 Ft** kiegészítő tagdíj, azaz összesen **6000 Ft**.

Az alap- és kiegészítő tagdíjat együtt kérjük befizetni.

Ha Ön **nyugdíjasként** tagja a Társulatnak és

- a **Fizikai Szemle** számaait **elektronikus formában** kéri, akkor 2019. évi tagdíja **3400 Ft**.
- a **Fizikai Szemle** számaait **papíralapú terjesztéssel** kéri, akkor 2019. évi tagdíja **4000 Ft**.

Ezúttal is tisztelettel kérem azokat a nyugdíjas korú tagjainkat, akik nyugdíjuk mellett teljes munkaviszonnyal vagy közalkalmazotti jogviszonnyal rendelkeznek, hogy a tagdíjfizetés szempontjából ne tekintsék magukat nyugdíjasnak.

Ha Ön **tanulmányait végzi** (felsőoktatási intézmény hallgatója és munkaviszonnyal nem rendelkezik vagy középiskolai tanuló), vagy **30 évnél fiatalabb** (azaz, aki 1988. december 31-e után született) és

- a **Fizikai Szemle** számaait **elektronikus formában** kéri, akkor kedvezményes tagdíja **3400 Ft**.
- a **Fizikai Szemle** számaait papíralapú terjesztéssel kéri, akkor kedvezményes tagdíja **4000 Ft**.

Kérem, hogy aki a fiataloknak szóló **kedvezmény**vel élni kíván és még nem adta meg születési adatait a tagnyilvántartáshoz, írja meg a Társulat titkárságának (elft@elft.hu).

Kérem, hogy bármilyen adatváltoztatást (például lakcím, e-mailcím megváltozása) e-mailben legyenek szívesek megírni az elft@elft.hu címre.

Kérem, hogy tagdíjukat mielőbb szíveskedjenek rendezni. A tagjainknak tagsági jogon járó **Fizikai Szemle** folyamatos küldését csak azok számára tudjuk biztosítani, akik 2019. évi tagdíjukat rendezték. Felhívom ugyanakkor szíves figyelmüket arra a lehetőségre, hogy tagdíjuk megfizetését esetleg munkahelyük is átvállalhatja. Továbbá felhívom szíves figyelmüket az **önkéntes többletfizetés lehetőségére**. Kérem, hogy a leírtakra – különösen az utóbbira – külföldön élő ismerőseiknek is hívják fel a figyelmét. Nekik a **Fizikai Szemlét** elektronikus formában, e-mailen küldjük el; ha nyomtatott Szemlét kérnének, akkor kérjük, a lényegesen magasabb postázási költséget vegyék figyelembe.

Az újonnan belépni kívánók a Társulat honlapján – <http://elft.hu/jelentkezes-a-tarsulatba> – jelentkezhetnek társulati tagnak.

Amennyiben lehetőségük van rá, kérem, hogy a tagdíj befizetését átutalással szíveskedjenek rendezni a **K&H Banknál vezetett 10200830-32310274-00000000** számú folyószámlánkra. A közlemény rovatba a befizető nevét, városát kérjük feltüntetni. A Titkárságon (1092 Budapest, Ráday utca 18. földszint 3.) lehetőség van készpénzes befizetésre is, illetve csekk is kérhető.

Az Európai Fizikai Társulatba (EPS) a továbbiakban csak egyéni tagként lehet belépni. Kérem a kollégákat, hogy a hazai fizika megfelelő képviselője érdekében az **EPS-be minél nagyobb számban lépjenek be**. Az EPS-be annak weblapján, a www.eps.org címen lehet belépni; ugyanott fizetheti be az EPS-tagdíjat is. Mivel az ELFT az EPS tageszervelete, az ELFT tagjai az EPS legkedvezőbb egyéni tagdíját fizetik.

Felhívás tagjainkhoz és a fizika minden barátjához

Tájékoztatom a Társulat tagjait és a **Fizikai Szemle** olvasóit, hogy a 2017. évről szóló jövedelemadó-bevalláshoz kapcsolódó felajánlások révén a Társulat 2018-ban **744 763 Ft** bevételhez jutott, amit a korábbi évekhez hasonlóan teljes egészében a **Fizikai Szemle** megjelenítési költségeinek részbeni fedezeteként használtunk fel. Ez a támogatás tette lehetővé többek között azt is, hogy tagjaink folyamatosan megkaphatták társulatunk folyóiratát, amiért köszönetünket fejezzük ki a Társulat javára rendelkezőknek. Kérem a fizika minden barátját, hogy ha teheti, az idén is rendelkezzen **személyi jövedelemadója 1%-ának** a Társulat céljaira való felajánlásáról és buzdítsa erre barátait, ismerőseit is. Az Eötvös Loránd Fizikai Társulatnak a nyilatkozaton feltüntetendő adószáma **19815644-2-43**.

Tisztelettel:
Groma István
az ELFT főtájtára



JANUÁR

BÚÉK 2019! Jó lenne az újév első számában csupa jó hírt megjelentetni, de most éppen nem ilyenek érkeznek hozzánk. Elég gyakran előfordul, hogy felkérék kiváló kutatókat, tanárokat, írjanak tevékenységükkel kapcsolatos cikket a *Szemle* számára. Nagy öröömre, ezekre a felkérésekre sokszor pozitív válasz érkezik. Így volt ez annak a két, MTA kutatóintézetekben dolgozó szerzőnek az esetében is, akiktől most januárban módosító üzeneteket kaptam, amelyeknek egy-egy mondatrészletét másolom ide: „Az SZBK-t, illetve munkacsoportunkat érintő akadémiai átvilágítással, illetve az (ismeretlen természetű) átalakulásokkal kapcsolatban előre nem látható teendőim akadtak. Ezek miatt nem fogom tudni tartani a február végi határidőt.” „A... cikket csak később tudom megírni (MTA-ITM ügyben nyakig benne vagyok)...” Ezekből az derül ki számomra, hogy legaktívabb vezető kutatóink a már megszokott pályázatiírás, projektvezetés, beszámolás stb. mellé most további adminisztratív feladatot kaptak, ami huzamosabb ideig, jelentős mértékben elvonja őket a kutatómunkájuktól.

Egy másik sajnálatos januári hír, hogy miután az Elsevier Kiadóval kötött korábbi szerződés 2018. december 31-én lejárt, az on-line irodalomkeresés az Elsevier ScienceDirect, a Scopus és a Scival adatbázisaiban január 11-én leállt, cikkeket letölteni nem lehet. A kiadóval folytatott tárgyalásokról a <http://eisz.mtak.hu/index.php/hu/open-access/281-kerdesek-es-valaszok-az-elsevier-targyalasokrol.html> címen olvashatunk. Szerencsére vannak más lehetőségek (első sorban Open Access, arxiv stb.), ezek azonban nem pótolják az EISZ hiányát. A fenti web-címen olvasható, hogy más országok egyes intézményeiben is bojkottálják az Elseviert, reménykedjünk, hogy sikerül mihamarabb megállapodásra jutni, és újra használható lesz az EISZ.

Problémákról szólnak az ELTE-vel kapcsolatos hírek is: az Egyetem két kara, a Bölcsészettudományi és a Természettudományi Kar vezető oktatók elbocsátására és nyugdíjazására kényszerül. Az Egyetem vezetőinek január 21-én kiadott sajtóközleménye szerint az Eötvös Loránd Tudományegyetem pénzügyi helyzete és működése stabil, a két kar működésének optimalizálása és gazdálkodásának racionalizálása zajlik. Eközben a Természettudományi Kar 20 főt küld el, köztük olyan nyugdíjkorhatárt elért 65 éves professzoroktól is kénytelen megválni, akik kimagasló kutató és oktató tevékenységet végeznek, és akik mindeddig úgy tervezték, hogy 70 éves korukig teljes állásban, változatlan aktivitással folytathatják munkájukat. Ez az eljárás méltatlan az Eötvös Loránd Tudományegyetemhez és teljességgel érthetetlen, különösen figyelembe véve a hallgatói normatíva bejelentett jelentős mértékű emelését szeptembertől kezdődően.

Jó hír is van: január 14-én nagy érdeklődés kísérte az Eötvös Loránd halálának 100. évfordulója alkalmából rendezett tudományos ülésszakot. Az MTA, az Eötvös Loránd Fizikai Társulat és az Eötvös Loránd Tudományegyetem közös rendezvényén megtelt az MTA nagyterme. Az ülés előadói bemutatták Eötvös Loránd szerteágazó, máig ható tevékenységét, így Eötvös Lorándot, mint fizikust, geofizikust, MTA-elnököt, rektort, minisztert és sportembert. Az Eötvös 100 alkalmából a *Fizikai Szemle* is számos cikkel szándékozik bemutatni Eötvös munkásságát. Így megkerestük az ülés előadóit, hogy előadásaikat tegyék közzé lapunkban cikk formájában is, közülük többen vállalták is ezt. Jelen számunk internetes mellékleteként Cserti József: *Eötvös Loránd a fizikus* című prezentációját tesszük elérhetővé és Eötvös jelentőségével és időszerűségével foglalkozik Patkós András írása is.


Lendvai János
főszerkesztő

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

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

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat havonta megjelenő folyóirata.

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

Főszerkesztő:
Lendvai János

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

Műszaki szerkesztő:
Kármán Tamás

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

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

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



A címlapon:
Egy ember egocentrikus multiplex hálózata: felül a különböző kapcsolattípusok, alul a különböző kommunikációs csatornákon megjelenő kapcsolatok szerint.
Az írást lásd a 13–17. oldalakon.

TARTALOM

<i>Lendvai János:</i> Január	1
<i>Ormos Pál:</i> Optikai csipeszek <i>Arthur Asbkin Nobel-díjának bűtere</i>	3
<i>Patkós András:</i> Eötvös Loránd időszerűsége – 1. rész – Az ekvivalenciaelv kísérleti ellenőrzése újabb kísérletekkel <i>Eötvös mérőberendezésének elvét változatlanul alkalmazzák, a technika fejlődése egyre nagyobb mérési pontosságot tesz lehetővé.</i>	6
<i>Török János, Kertész János:</i> Mit tanulhatunk a big datából, avagy hogyan választunk kommunikációs csatornát? <i>A vizsgálat tanulsága a felhasználó számára: minél intenzívebben basznál valaki egyfajta szolgáltatást, róla annál többet lehet megtudni.</i>	13
<i>Faigel Gyula:</i> Szerkezetmeghatározás egyetlen, 100 fs-os röntgenimpulzusból <i>Hogyan lehet egyetlen, 10⁻¹³ másodperc hosszúságú röntgenimpulzussal meghatározni egy kis biológiai részecske szerkezetét?</i>	17
VÉLEMÉNYEK	
<i>Ván Péter:</i> Alvajárunk? <i>A tudós személyiségének szerepe a tudományban, Koestler könyvének tanulságai alapján.</i>	21
A FIZIKA TANÍTÁSA	
<i>Bokor Nándor:</i> Miért tudja kimutatni a LIGO a gravitációs hullámot? <i>A lézer-interferométer karbösszainak változásait nem a fényhullámokkal, mint hosszetalonnal, hanem a rögzített frekvenciával működő lézert óraetalonként basználva, és végső soron a két karról visszaérkező fényjelek időkülönbségének változásait követve mérik.</i>	23
<i>Garambegyi Gábor:</i> Safecast-projekt megvalósítása az Isaszegi Gábor Dénes Gimnázium és Szakgimnáziumban <i>Diákok bekapcsolódása egy, az országghatárokon messze túlélő nemzetközi projektbe.</i>	30
HÍREK – ESEMÉNYEK	
Tájékoztató az Eötvös Loránd Fizikai Társulat 2019. évi tagdíjairól	1
Jelölési/pályázási felhívás az Eötvös Loránd Fizikai Társulat kitüntetettjeire, valamint felsőoktatási és tudományos díjaira	36
www.fizikaiszemle.hu/mellekletek	
<i>Cserti József:</i> Eötvös Loránd, a fizikus	
<i>P. Ormos:</i> The other half of the 2018 Nobel Prize in Physics: Optical tweezers	
<i>A. Patkós:</i> The Timeliness of Loránd Eötvös – Part I. Experimental Control of the Equivalence Principle with New Experiments	
<i>J. Török, J. Kertész:</i> What can we learn from big data, or how we choose our communication channel?	
<i>G. Faigel:</i> Structure determination from a single 100 fs X-ray pulse	
OPINIONS	
<i>P. Ván:</i> Are we sleepwalking?	
TEACHING PHYSICS	
<i>N. Bokor:</i> Why can LIGO detect gravitational waves?	
<i>G. Garambegyi:</i> Implementation of the Safecast project in the Dennis Gabor High School in Isaszeg	
EVENTS	
www.fizikaiszemle.hu/mellekletek	
<i>J. Cserti:</i> Roland Eötvös, the physicist	

Fizikai Szemle
MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

megjelenését támogatják:



OPTIKAI CSIPESZEK

A 2018. évi fizikai Nobel-díj másik fele*

Ormos Pál

MTA Szegedi Biológiai Kutatóközpont Biofizikai Intézet

Az *Arthur Ashkin* által feltalált optikai csipeszek mikroszkopikus részecskéket képesek megragadni lézernyaláb „ujjaikkal”. Az alkalmazás a fény mechanikai hatásán alapul. *Johannes Keplernek* már 1619-ben feltűnt, hogy az üstökösök csóvjaja a Nappal ellentétes irányba mutat, és úgy vélte, ez a fény nyomása miatt van így. Ez volt a fény mechanikai hatásának első felvetése. Az elektromágnesség Maxwell-féle elmélete azután megmagyarázta, hogy az elektromágneses sugárzás valóban nyomást fejt ki, és pontosan megadta nagyságát is – ez 1873-ban történt. Ekkor természetesen az is látszott, hogy e hatás termikus fényforrásokból származó fénnel makroszkopikus testekre nagyon kicsiny, igazi gyakorlati jelentősége nincsen. Persze ez az érdekes jelenség ettől még izgatta a fizikusokat, és 1900-ban *Pjotr Lebegyev* orosz fizikus kísérletileg mutatta ki a hatást. Ezután megnyugodott a világ, a fény nyomása a mindennapokban jelentéktelen, és kétségtelen érdekessége a tudományos fantasztikum világába zárta. Gyerekkoromban, az ötvenes-hatvanas években gyakran lehetett fotonrakétákról olvasni, amelyek a hajtóerőt fény kibocsátásával nyernék, és velük – tekintve, hogy a hajtóanyag kiáramlása fénysebességgel történik – akár fénysebességhez közeli sebesség is elérhető lenne. A lézerek megjelenése azután nagy változást eredményezett e területen – is. Ezek az újfajta fényforrások „tankönyvi”, valóban a diffrakció által limitált nyalábokat képesek produkálni, és a fény hullámhosszával összemérhető méretű területre fókuszálhatók. Egy ilyen mikroszkopikus méretű test tömege nagyon kicsiny, ezért most már a Maxwell-elmélet által megadott rá ható erő alkalmas a piciny test mechanikai manipulációjára, akár csapdázására. A jelenséget a 2018-as fizikai Nobel-díjjal kitüntetett Arthur Ashkin, a Bell Laboratórium kutatója mutatta ki először. Nevéhez fűződik az optikai manipuláció szinte minden fontos ágának leírása, első megvalósítása.

* A díj egyik feléről múlt havi számunkban közöltünk cikket.



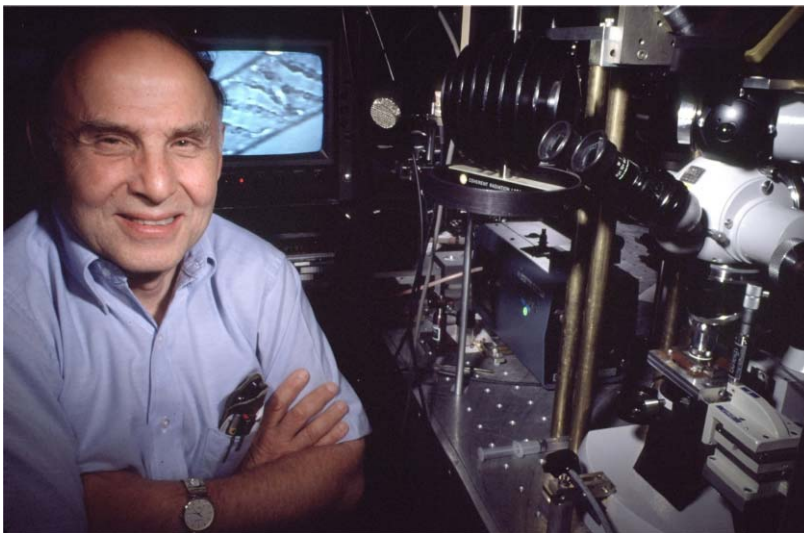
Ormos Pál 1975-ben végzett fizikusként a szegedi József Attila Tudományegyetemen. Biofizikus kutató, az MTA Szegedi Biológiai Kutatóközpont Biofizikai Intézetének kutatóprofesszora. 2010 és 2017 között a kutatóközpont főigazgatója volt. 1998-ban választották az MTA levelező tagjává, 2004 óta az MTA rendes tagja. Kutatási területe a fehérjék szerkezet-működés kapcsolata, a biológiai energiaátalakítás, illetve az optikai manipuláció fejlesztése és biológiai alkalmazása.

Ashkin 1922-ben született Brooklynban. Édesapja Ogyesszából származott, édesanyja pedig Galícia Osztrák–Magyar Monarchiához tartozó részéből került Amerikába. Az alapképzést a Columbia Egyetemen kapta, a PhD-t a Cornell Egyetemen szerezte 1952-ben. Ezután a Bell Laboratóriumba került, és aktív életét ott töltötte. Kezdetben mikrohullámokkal foglalkozott, a lézerek megjelenésével pedig az új terület kötötte le érdeklődését. A lézerek alkalmazásának különböző lehetőségeit tanulmányozta, és így került kapcsolatba a lézerfény-anyag kölcsönhatás részleteivel. Az optikai manipulációhoz vezető első lépés az átlátszó dielektromos részecskék fókuszált fény általi mozgatásának kimutatása volt vízben és levegőben – ezt 1970-ben írta le [1]. A kölcsönhatás alapja az, hogy a környezetétől eltérő törésmutatójú anyaghoz érve a fény impulzusa – a törése, illetve a felületi részleges reflexiója során – megváltozik. A fénnel kölcsönható részecskék alapvetően a fény terjedésének irányában mozognak. Azt is megmutatta, hogy a terjedési irányba mutató úgynevezett szórási erőn kívül a fényintenzitás gradiensének irányában (a környezeténél nagyobb törésmutatójú anyagú test esetében a nagyobb intenzitás fele mutató) egy gradienserőnek nevezett erő is fellép, amely a nyalábban tartja a részecskéket – hiszen a nyaláb intenzitása a tengely fele nő. Ebben az 1970-es, forradalmi közleményben azt is megmutatta, hogy egymással szemben haladó, fókuszált nyalábokkal a részecskék háromdimenziós csapdázása is elérhető. A csapdázás technikájában fontos mérföldkő az egy gyűjtőlencsével történő megvalósítás. Nyilvánvaló ugyanis, hogy fókuszálás esetén az intenzitás a fókuszban a legnagyobb, a gradienserő minden irányból ide mutat. Elegendően nagy numerikus apertúrájú mikroszkópobjektívekkel olyan fókuszot lehet létrehozni, amelyben a gradienserő meghaladja a szóró erő nagyságát, vagyis csapdázás érhető el. Ezt 1986-ban közölték [2]. Jelenleg ez a kivétel a legszélesebb körben használt elrendezés – bár más megoldásoknak, például az eredeti, két, szembeirányított nyalábbal megvalósított csapdának is van létjogosultsága.

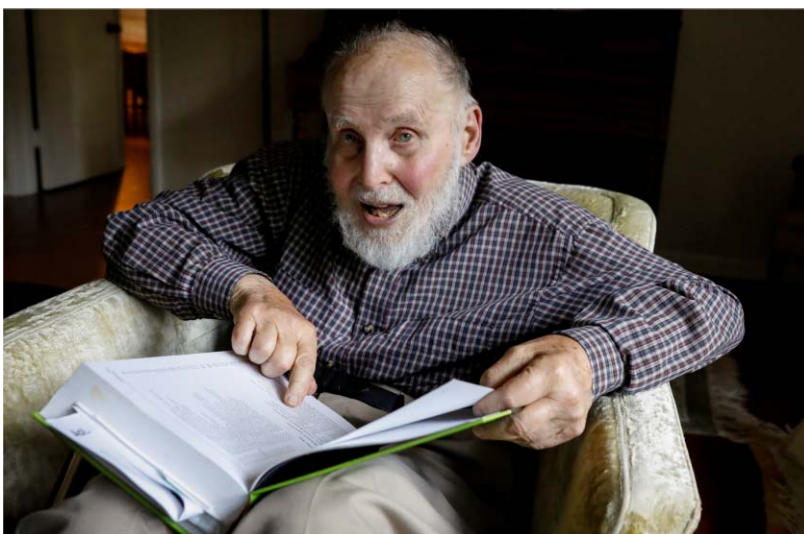
Bármennyire is elbűvölő a fénnel elért mechanikai manipuláció jelensége, fizikai alapja tulajdonképpen nagyon egyszerű. Ebből fakad a történet egyik érdekessége is: amikor Ashkin elkészítette az 1970-es közlemény kéziratát, az volt a szokás a Bell Laboratóriumban, hogy be kell mutatni, és ki kell kérni a kutatóközösség véleményét. A közösség első véleménye pedig az volt, hogy az anyag nem tartalmaz új fizikát, ezért a cikk megjelentetése nem indokolt. Nagy szerencse, hogy nem így alakultak a dolgok.

Fizikus lévén Ashkin érdeklődése először fizikai alkalmazások felé fordult. Igen hamar felvetette két rendkívül fontos fizikai alkalmazás lehetőségét: 1978-ban arról írt, hogy a lézer fénynyomása alkalmas atomok csapdázására, valamint direkt hűtésére is, állítván, hogy lézeres hűtéssel mikrokkelvin körüli hőmérséklet érhető el [3]. 1979-ben tovább részletezte a rezonáns hűtés technikáját [4]. E hatás azon az ötleten alapul, hogy a csapdázó fény és a csapdázott atom rezonáns kölcsönhatását a részecske hőmozgása modulálja a Doppler-effektus révén, így több irányú csapdák frekvenciájának (hullámhosszának) megfelelő hangolásával elérhető, hogy a különböző irányból jövő fénynyalábok mind lassítsák a csapdázott atomot, vagyis hőmérsékletének csökkenését eredményezzék. E korai, atom- és molekulafizikára vonatkozó alkalmazások furcsa módon nem szerepeltek a jelen Nobel-díj indoklásában. Ennek az a valószínű oka, hogy a két említett alkalmazásnak (lézeres hűtés, illetve atomcsapdázás) két korábbi fizikai Nobel-díjban már kulcsszerepe volt. Az 1997-es fizikai Nobel-díjat *S. Chu*, *C. Cohen-Tannoudji* és *W. D. Phillips* kapták a lézeres atomcsapdázás és -hűtés megvalósításáért. A lézeres hűtéssel sikerült egy mikrokkelvinnél alacsonyabb hőmérsékletet elérni. Közülük Steven Chu korábban Arthur Ashkin munkatársa volt a Bell Laboratóriumban, nála ismerkedett meg az optikai csapdázással. Nem sokkal később, 2001-ben szintén rokon munkát jutalmaztak Nobel-díjjal: *E. A. Cornell*, *W. Ketterle* és *C. E. Wieman* érdemelték ki, döntően a Bose–Einstein-kondenzátum létrehozásáért – e kísérletekben is meghatározó volt a lézeres csapdázás és hűtés. E két említett korábbi Nobel-díj Arthur Ashkin „találmányán” alapult, ráadásul Ashkin írt is az ilyen irányú kísérletekről. Ki kell emelni, hogy az említett 1970-es, illetve 1978-as kulcsfontosságú közleményeket Arthur Ashkin egyedül jegyezte. A szakterület általános véleménye szerint neki is – akár mind a két esetben – a kitüntettek között kellett volna szerepelnie.

Azt lehet mondani, hogy a jelenlegi díj mintegy a korábbi mellőzések kárpótlása is – mindenesetre az idei Nobel-díj rá vonatkozó részében az indoklás a biológiai alkalmazásokat hangsúlyozza. Szerencsére az optikai csapdázás olyan nagy horderejű felfedezés, olyan széles körben alkalmazható különleges hatékonysággal, hogy a jelek szerint egy harmadik fizikai Nobel-díjat is generált. Ezek alapján a biológiai alkalmazás is Arthur Ashkin nevéhez kötődik: ő ismerte fel



Arthur Ashkin aktív korában,



illetve kitüntetésékor.

először, hogy biológiai mikrorészecskék is csapdázhatók fénnel. Először mikronnál kisebb méretű biológiai részecskéket, vírusokat próbáltak csapdázni [5]. A kicsiny (300 nm hosszú és 20 nm átmérőjű henger alakú) dohánymozaik-vírusok csapdázása néhány száz mW teljesítményt igényelt. A kísérletek közben derült ki, hogy (a vizes minták befertőződése nyomán a felszaporodott baktériumoknak „köszönhetően” – mert egy fizikus nem szívesen kísérletezik steril körülmények között) baktériumok is közvetlenül csapdázhatók ily módon, ehhez ráadásul – a nagyobb, mikrométeres méretük miatt – jóval kisebb, néhány mW teljesítmény is elegendőnek bizonyult.

A következő időkből nyilvánvalóvá vált, hogy a biológiában is rendkívül széles körben használható az eljárás. E ténynek számos oka van: a sejtek, baktériumok mikronos méretűek, ez éppen a látható fény hullámhosszának mérettartománya. A lézercsipesz egyszerűen létrehozható: egy nem túl nagy teljesítményű lézer (néhány 10 mW is elég), és egy jó minőségű, nagy numerikus apertúrájú mikroszkópobjektív a mi-

nimális szükséglet. E tételek könnyen elérhetők, nem drágák. Az optikai csapda kivitelezésének számos útja van: lehet mikroszkópra építeni a csapdázó lézer bevezetésével, de lehet teljesen függetlenül is összeállítani – a kísérlet követelményeinek megfelelő komponensekből. A legegyszerűbb, egy fénysugár által létrehozott optikai csipesz használhatóságát ki lehet terjeszteni: a nyaláb megsokszorozható, több, egymástól függetlenül mozgatható csapda is létrehozható. Mostanában elterjedtek a holografikus optikai csipeszek: ezekben megfelelő optikai elemekkel a csapdázó lézernyaláb fázisfrontját tetszőlegesen be lehet állítani, így a csapda paraméterei sokféleképpen variálhatók. Az optikai csapdával természetesen erőt is ki lehet fejteni, illetve mérni – hiszen a csapda úgy működik, hogy a csapdázott testre a csapda helyétől való kitéréssel arányos, azzal ellentétes irányú erő hat. Szerencsénkre a mW teljesítményű lézerek jó minőségű, de általános objektívvvel körülbelül pN nagyságrendű erők kifejtésére képesek, és értelemszerűen ugyanilyen nagyságú erők mérésére is alkalmasak. Ez az erőtartomány éppen megfelel a vízben úszkáló biológiai mikroorganizmusok csapdázására. Ugyanígy optimálisak a biológiai erőkifejtő rendszerek erejének mérésére, valamint a biológiai makromolekulák, sejtek mechanikai tulajdonságainak jellemzésére is. Az optikai csipesz – természeténél fogva – a hullámhossz mérettartományába eső testek csapdázására optimális. Sokkal kisebb, vagy sokkal nagyobb testek manipulálásához segédeszközöket használnak. Például a biológiai molekulák (fehérjék, DNS-molekulák) túl kicsik a közvetlen optikai manipuláláshoz, e rendszereknél mikronos műanyaggyöngyöcskát rögzítenek a molekulákra, és ezeket megragadván, közvetett úton történik a manipuláció. Sejteket bonyolult alakú, fotopolimerizációval előállított és fénnel aktivált manipulátorokkal lehet mozgatni. Ki kell emelni még az optikai manipuláció egy jellegzetes sajátosságát: a kísérletek egyes részecskéken folynak, ezért az információk is egyes részecskékre vonatkoznak. Ha a vizsgált rendszer egyforma részecskékből áll, akkor az így nyert átlagos információ felel meg a makroszkopikus mintának. Olyan esetekben viszont, amikor a mintát alkotó molekulák heterogenitásának is szerepe van – és gyakran ez a helyzet –, alapvető többletinformációt is szolgáltat az eljárás. Az egyrészecske-megfigyelés és -jellemezés – köszönhetően a technikai fejlődésnek – az utóbbi idők fejleménye egyéb területeken is, például a mikroszkópiában. A detektálás érzékenysége annyira megnőtt, hogy lehetőség nyílt ilyen eljárások alkalmazására. Nyilvánvaló, hogy az egyrészecske-manipuláció és az egyrészecske-megfigyelés kéz a kézben járnak – hiszen jó látni a manipulált objektumot.

Korábban említettük, hogy elsősorban a környezetiüknél nagyobb törésmutatójú, de átlátszó anyagok esetében használható az eljárás. (A teljesség kedvéért meg kell itt jegyezni, hogy fordított esetben is lehet csapdázni, de az eljárás bonyolultabb.) Nagyon fontos, hogy a fény ne nyelődjön el, mert bár az összteljesítmény kicsi, de a fókuszálás miatti teljesítménysűrű-

ség nagyon nagy, és kárt tehet a biológiai anyagban. Olyan hullámhosszúságú lézerfényt kell használni, ami nem nyelődik el se a vízben, se a mintában, általában a közeli infravörös tartományban működnek.

Az alábbiakban (a teljesség igénye nélkül) néhány, jellemző, lézercsipesszel végzett kísérletet, illetve általuk elért eredményt – amelyek áttörést hoztak a biológiában – sorolunk fel. Ezekre az eredményekre általában jellemző, hogy más módszerrel nem (vagy csak nagyon nehezen) lehetett volna őket elérni, ugyanakkor igen nagy a jelentőségük a biológiai rendszerek működésének megértésében, így jól illusztrálják a lézercsipesz által kiváltott forradalmat.

DNS-molekulák végeire műanyag golyót rögzítve, azokat manipulátorként használva meghatározták a DNS-polimer mechanikai tulajdonságait: nyújtási, torziós rugalmasságát, a rugalmasság határait, hogyan lehet mechanikai úton fázisátalakulásokat létrehozni, denaturálni stb. [6, 7]. Meghatározták, hogyan kapcsolódik a DNS-re a benne rejlő információt kinyerő, DNS-t építő, javító enzimek [8]. Megmérték, mekkorákat lépnek és milyen erőt képesek kifejteni a DNS polimeráz enzimek. DNS-szekvenciát is sikerült meghatározni a DNS-en lépegető polimeráz mozgásának vizsgálatával [9]. Fehérjék mechanikai tulajdonságait is megmérték, ráadásul fehérjék denaturálását is elérték, ugyanígy mechanikai úton tudták szabályozni a gombolyodást is [10]. Az aktin és miozin a biológiai erőkifejtés molekulái az izmokban. Lézercsipesszel sikerült meghatározni az aktinszálon lépegető miozin lépéseinek nagyságát, az általa kifejtett erőket [11]. Más ilyen erőkifejtő, lépegető fehérjék (dienin, kinezin) mechanikai paramétereit, energiaátalakítási hatásfokát is így sikerült meghatározni [12]. A nem túlságosan régmúlt nagyon érdekes felfedezése, hogy a biológiai mikrovilágban nagyon fontos szerepet töltenek be a forgó biológiai motorok, ilyenek a bakteriális flagellák meghajtói, de az energiaátalakításban szereplő úgynevezett F_0F_1 ATPáz motorok is. Ezek felfedezésében, jellemzésében fontos szerepet játszottak az optikai manipulációs eljárások [13, 14]. Egész sejtek vizsgálatában is érdekes, új lehetőségeket hozott az eljárás: optikai erőket használva, mechanikai tulajdonságaik alapján sikerült rákos sejtek és egészséges sejtek megkülönböztetése, klinikai kidolgozás alatt van például egy szájüregi rákra vonatkozó szűrési eljárás, amely korai detektálást ígér [15].

E felfedező jellegű kísérleteken túl az aktív manipuláció lehetőségei is végtelenek: optikai manipulációval sejtek szétválogatása lehetséges bármilyen mérhető tulajdonságuk szerint. Szövetekben – egyéb úton azonosított – sejteket különíthetünk el lézeres vágással, majd optikai manipulációval szortírozhatunk [16]. Mesterséges megtermékenyítésben is használnak már optikai manipulációt [17].

E példák is világosan mutatják, hogy a lézerek által nyújtott manipulációs eljárás rendkívüli lehetőségeket nyújt a kísérleti biológia területén, már eddig is forradalmi újdonságokkal szolgált, használata egyre terjed, és a jövőben nyilvánvalóan még több ismeretet szerzünk ezen az úton.

Az ismertetést e Nobel-díj különleges voltának említésével zárom. Arthur Ashkin 1922-ben született. 2018-ban, a Nobel-díj odaítélésekor tehát 96 éves volt: ő a valaha kitüntetettek legidősebbike. Ráadásul már 1994 óta nyugdíjas, és bár állítása szerint azóta is folyamatosan a tudománnyal foglalkozik, publikációs aktivitása csekély. Ugyanakkor, ha a díj alapjául szolgáló munkát tekintjük, igazából nem különleges a helyzet: 1970-ben 48 éves volt, vagyis „megfelelő” korú a Nobel-díjat érő eredmény eléréséhez. A tény, hogy ilyen idősön kapta meg a díjat, inkább a rendszer hibájának következménye tehát. Megállapíthatjuk, szerencse, hogy a díj még jó egészségben érte, és kívánjuk, minél hosszabban élvezhesse még méltó kitüntetését.

Irodalom

1. A. Ashkin: Acceleration and Trapping of Particles by Radiation Pressure. *Phys. Rev. Lett.* 24/4 (1970) 156–159.
2. A. Ashkin, J. M. Dziedzic, J. E. Bjorkholm, S. Chu: Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles. *Optics Letters* 11/5 (1986) 288–290.
3. A. Ashkin: Trapping of Atoms by Resonance Radiation Pressure. *Phys. Rev. Lett.* 40/12 (1978) 729–732.
4. A. Ashkin, J. P. Gordon: Cooling and trapping of atoms by resonance radiation pressure. *Optics Letters* 4/6 (1979) 161–163.
5. A. Ashkin, J. M. Dziedzic: Optical trapping and manipulation of viruses and bacteria. *Science* 235 (1987) 1517–1520.
6. S. B. Smith, Y. Cui, C. Bustamante: Overstretching B-DNA: The Elastic Response of Individual Double Stranded and Single Stranded DNA Molecules, *Science* 271 (1996) 795.
7. L. Oroszi, P. Galajda, H. Kirei, S. Bottka, P. Ormos: Direct measurement of torque in the optical trap and its application to dsDNA. *Phys. Rev. Lett.* 97 (2006) 058301.
8. M. J. McCauley, M. C. Williams: Optical tweezers experiments resolve distinct modes of DNA-protein binding. *Biopolymers* 91 (2009) 265–282.
9. E. Abbondanzieri, W. J. Greenleaf, J. W. Shaevitz, R. Landick, S. M. Block: Direct observation of base-pair stepping by RNA polymerase. *Nature* 438 (2005) 460–465.
10. M. Z. Kellermayer, S. B. Smith, H. L. Granzier, C. Bustamante: Folding-Unfolding Transitions in Single Titin Molecules Characterized by Force-Measuring Laser Tweezers. *Science* 276 (1997) 1112–1116.
11. M. P. Sheetz, J. A. Spudich: Movement of myosin-coated fluorescent beads on actin cables in vitro. *Nature* 303 (1983) 31–35.
12. K. Svoboda, C. F. Schmidt, B. J. Schnapp, S. M. Block: Direct observation of kinesin stepping by optical trapping interferometry. *Nature* 365 (1993) 721–727.
13. Y. Sowa, A. D. Rowe, M. C. Leake, T. Yakushi, M. Homma, A. Ishijima, R. M. Berry: Direct observation of steps in rotation of the bacterial flagellar motor *Nature* 437 (2005) 916–919.
14. H. Noji, R. Yasuda, M. Yoshida, K. Kinosita Jr.: Direct observation of the rotation of F1-ATPase. *Nature* 386 (1997) 299–302.
15. J. Guck, S. Schinkinger, B. Lincoln, F. Wottawah, S. Ebert, M. Romeyke, D. Lenz, H. M. Erickson, R. Ananthakrishnan, D. Mitchell, J. Käs, S. Ulvick, C. Bilby: Optical Deformability as an Inherent Cell Marker for Testing Malignant Transformation and Metastatic Competence. *Biophys. J.* 88/5 (2005) 3689–3698.
16. K. Xiao, D. G. Grier: Multidimensional Optical Fractionation of Colloidal Particles with Holographic Verification. *Physical Review Letters* 104/2 (2010) 028302.
17. A. Clement-Sengewald, K. Schütze, A. Ashkin, G. A. Palma, G. Kerlen, G. Brem: Fertilization of bovine oocytes induced solely with combined laser microbeam and optical tweezers. *J. Assist. Reprod. Genet.* 13 (1996) 259–265.

EÖTVÖS LORÁND IDŐSZERŰSÉGE – 1. rész

Az ekvivalenciaelv kísérleti ellenőrzése újabb kísérletekkel

Patkós András
ELTE Fizikai Intézet

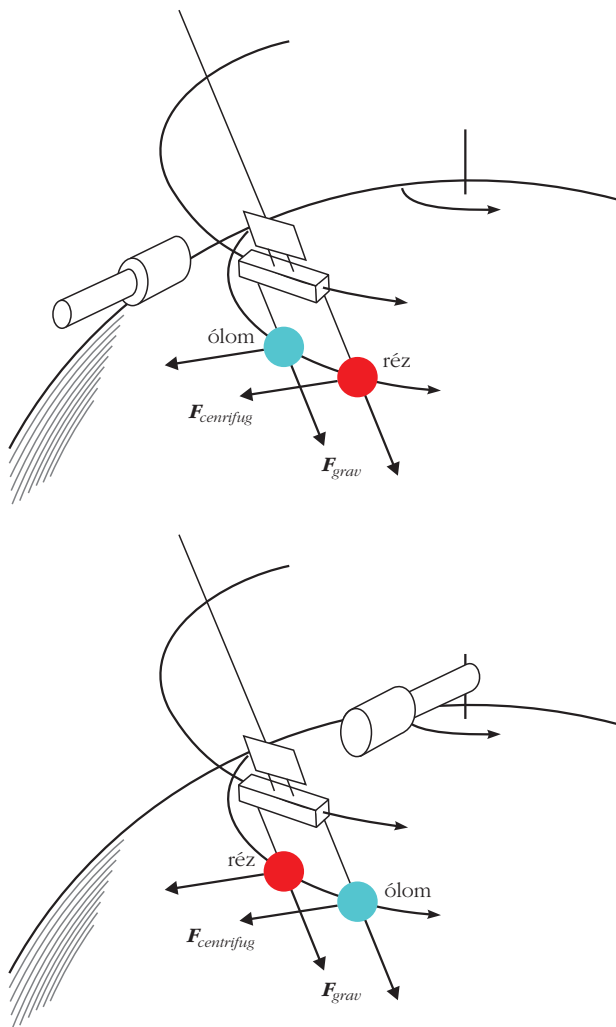
Mikola Sándor írta az *Eötvös Loránd* halálának 10. évfordulója alkalmából kiadott *Emlékkönyvben* [1]: „Báró Eötvös Lorándnak a nehézségi erőre és a felületi feszültségre vonatkozó igazságai ezer év múlva éppolyan igazak és értékesek maradnak, amilyenek ma, még abban az esetben is, ha akkorára a tömegvonzásra és az anyag legkisebb részeire vonatkozó mai fogalmaink meg is szűnnek.”



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

A Mikola által célba vett időtáv logaritmikus közepéhez érkezve elmondható, hogy Eötvös tudományos alkotásainak igazságát nem csak nem kérdőjelezte meg a tudományos haladás elmúlt évszázada, de mérőberendezésének konstrukciós koncepcióját változtatlanul, technikai megvalósítását pedig egyre tökéletesítve alkalmazzák a gravitációnak a 20. század elején született új elmélete központi fontosságú elve, az ekvivalenciaelv érvényességi tartományának kitapogatására. Azaz Eötvös méréseinek egyre tökéletesedő továbbvitele *Einstein* gravitációs elméletének egyik legfontosabb próbája. E cikk mellett kíván érvelni, hogy ugyan majd fél évszázadnyi késéssel, de Eötvös Loránd tudományos felfogását követve alakult ki a kísérleti gravitációs fizika, az alapvető kölcsönhatások legígéretesebbnek tűnő 21. századi kutatási irányzata.

Király Péter 2007-ben részletes cikkben ismertette az ekvivalenciaelvhez kapcsolódó kutatások akkor aktuális helyzetét [2]. Alább friss fizikátörténeti közle-



1. ábra. Az Eötvös-mérés elve. Torziós szálra szimmetrikus felfüggesztéssel egy ólomból és egy rézből készült, azonos súlyú golyót helyeznek el. Mindkét golyóra hat a Föld tömegvonzása és a forgásból származó centrifugális erő. A torziós szál nyomatéka a két golyóra ható erők forgatónyomatékainak eredőjét kompenzálva alakítja ki az egyensúlyi helyzetet. A golyókat megcserélve, a szál elfordulását eredményezi, ha a tehetetlenségi és súlyos tömeg hányadosa a kétféle anyagra különböző.

mények, illetve az elmúlt évtizedek gravitációs mérés-sorozatairól megjelent összefoglaló cikkek alapján aktualizálom az általa írottakat, majd a közelmúltban elért újabb eredményekkel foglalkozom.

Eötvös-ingával Galilei és Newton nyomában

A 16. és 17. század fordulóján egyre elterjedtebben próbálkoztak a testek föld felé esése sebességének kísérleti vizsgálatával. Benedetto Varchi (1544), majd Giuseppe Moletti (1576) is beszámolt ejtési kísérleteiről, amelyek ellentmondtak a korábban kétségbe vonhatatlan arisztotelészi megállapításnak, miszerint a nehezebb testek gyorsabban esnek. Simon Stevin 1586-ban Jan de Groottal a delfti Nieuwe Kirke 30 méter magas tornyából leejtett különböző súlyú ólomgolyók becsapódásakor keletkező hang egyidejűségé-

ből arra jutott, hogy a testek esési végsebessége azonos. Galilei (1634-ben kiadott) *Discorsi e Dimostrazioni Matematiche* című munkája abban volt első, hogy a szabadesés matematikai leírását adta és hangsúlyozta, hogy – a légellenállástól eltekintve – a törvény független az anyagi minőségtől. Azt, hogy a tollpihe könnyűségű testek esés helyett felfelé szállnak ő tulajdonította elsőként a légellenállásnak [3]. A szabadesés univerzalitásának (anyagi minőségtől és az anyag mennyiségétől való függetlenségének) tulajdonságait az általános relativitás elmélet gyenge ekvivalenciaelvnek keresztelte.

A gravitációs gyorsulás anyagi minőségtől való függetlenségét Galilei, majd Newton is különböző anyagból készült súlyok ingamozgásának összehasonlításából vonta le. A tehetetlen (a gyorsítással szemben „ellenálló”) és a súlyerővel arányos súlyos tömeg fogalmi különbözőségét Newton fogalmazta meg elsőként. *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* című művének [4] I. meghatározásában írja: „Ingával végzett nagyon pontos kísérletekkel megállapítható, hogy a tömeg a súllyal arányos mennyiség.” Newton különböző anyagból készült pontszerű tömeget hordozó matematikai ingái lengésidejének összehasonlítása ezen arányosság univerzalitásának ellenőrzéseként értelmezendő. Newtont követően F. Bessel végzett úgynevezett reverzibilis ingával gravitációs-gyorsulás-méréseket (1832), megerősítve a súlyos és tehetetlen tömeg univerzális arányosságának tulajdonságát.

Eötvös Loránd a két különböző anyagú lengő inga lengésidejeinek összehasonlítása helyett torziós inga két karjára függesztette fel a kétféle anyagból készült mintát. A torziós inga elcsavarodását a két próbatestre ható erők forgatónyomatékának különbsége határozza meg. Ezzel elkerülte az ingás mérések pontosságát korlátozó azon körülményt, hogy a két tömeg önálló lengésidejének különbségében keressen egy kicsiny, nem zérus maradékot. Eljárásával mérései pontosságát Bessel korábbi mérései pontosságának négyszázszorosára finomította [5]. A mérés elvét a műszer szépséges részleteitől megfosztott vázlatos ábra teszi áttekinthetővé (1. ábra).

Az A és B jelű próbatestekkel végzett mérésekből az úgynevezett *Eötvös-paraméterre* lehet becslést (null-eredmény esetén abszolút értékére felső korlátot) adni:

$$\eta(A, B) = 2 \frac{\left(\frac{m_g}{m_i} \right)_A - \left(\frac{m_g}{m_i} \right)_B}{\left(\frac{m_g}{m_i} \right)_A + \left(\frac{m_g}{m_i} \right)_B}.$$

Itt m_g a tömegvonzás hatását érzékelő tömeget, m_i a Newton II. törvényben szereplő tehetetlenségi tömeget jelöli. Eötvös és munkatársai a null-eredménytől való lehetséges eltérésre 10^{-8} – 10^{-9} nagyságrendű felső korlátot nyertek [6].

Növekvő pontosságú Eötvös-típusú kísérletek

A gravitáció modern elméletéhez kapcsolódó kísérleti/megfigyelési gravitációs fizika területén az Eötvös-csoport munkáit követő évtizedekben az általános relativitás elméletét igazoló kis számú klasszikus effektuson (Merkúr perihéliummozgása, fény elhajlása a Nap körül) túl nem volt kiterjedt kutatási program. Robert Dicke munkásságáról írott tanulmányában P. J. E. Peebles [7] idézi Dicke 1957-ben tartott konferencia-előadásának szövegét [8]: „Szerencsétlen helyzet, hogy az általános relativitáselmélet kísérleti ellenőrzésének helyzete alig jobb, mint néhány évvel annak megalkotása után, mondjuk 1920-ban volt. Ez kiáltó ellentétben van a kvantumelmélettel, amelynek sokezernyi kísérleti ellenőrzését tartják számon.”

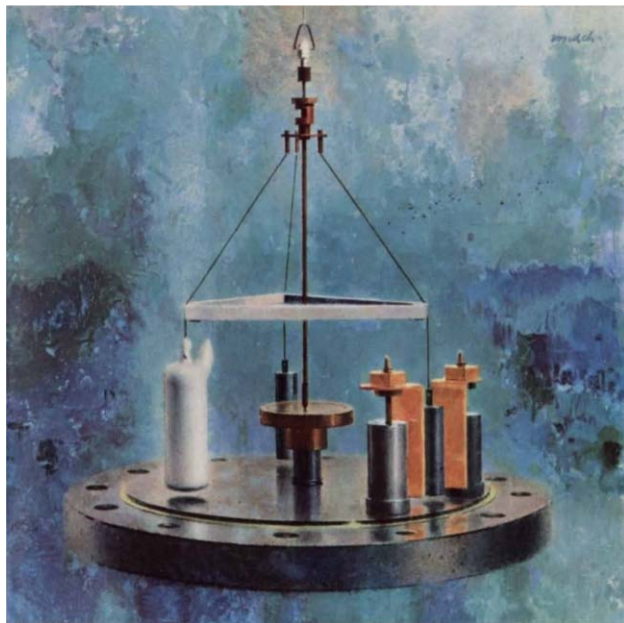
Dicke a kísérleti gravitációs fizika új korszakának elindítására hirdetett programot: „A kísérleti fizika nagy kihívása e helyzet megjavítása. Az elmélet ellenőrzéséhez új kísérleteket kell konstruálni, régebbieket pedig finomítani.” A finomítandó eredményű kísérletek között első helyen a gravitációs gyorsulás modern eszközökkel való újramérését, második helyen pedig az Eötvös-kísérlet megismétlését említette.

Az utóbbihoz kapcsolódóan tette fel azt a kérdést, amelyet ma a tankönyvek az „erős ekvivalenciaelv” érvényességének kérdéseként emlegetnek: „A gravitációs állandó helyről helyre változhat, hiszen a gravitációs energia esetleg másképp járul hozzá a test súlyához, mint az egyéb energiák. Elvben az ekvivalenciaelv sérülhet is, vagy csak közelítőleg lehet igaz. Az Eötvös-kísérletnek éppen ezen a ponton nincs mondanója, mert nem eléggé pontos.” Mai terminológiával az eredeti Eötvös-kísérlet a „gyenge ekvivalenciaelv”, vagy más elnevezéssel az „univerzális szabadesés” nagy pontosságú bizonyítéka.

Előadásában Dicke meg is fogalmazta a javított Eötvös-kísérlet alapötletét: „Feltéve, hogy a gravitációs kötési energia anomálishan járul hozzá a test súlyához (egyéltalan nem vagy éppen túlzottan járul hozzá), egy nagy test gravitációs gyorsulása eltérne egy kis testétől. Az első esetleg megfigyelhető hatás egy kis különbség lenne egy test súlyában, amennyiben a Föld Nap felé eső, vagy azzal ellentétes oldalán mérik meg.”

Végül a princetoni csoport egy jelentősen megjavított stabilitású, hőszigetelésű és adatkiolvasási biztonságú Eötvös-ingát készített (2. ábra). Dicke ötletének megfelelően Föld saját tengelyforgására bízta a két minta Naphoz viszonyított helyzetének felcserélését. Amennyiben az alumínium- és aranyminták Nap-irányú gyorsulása eltérő lett volna, akkor az inga csavarodási szöge időfüggésének Fourier-felbontásában 24 órás periódusú jelet kellett volna találni. A napi periodicitást mutató hatások kiküszöbölése komoly kihívást jelentett, ám végül az Eötvös-paraméterre 10^{-11} nagyságrendű korlátot tudtak adni [9], azaz közel három nagyságrendet javítottak az akkor nagyjából fél évszázados mérési korláton.

A kísérlet előkészítése során fellépő nehézségeket felismerve Dicke magyar fizikusokkal is kapcsolatot

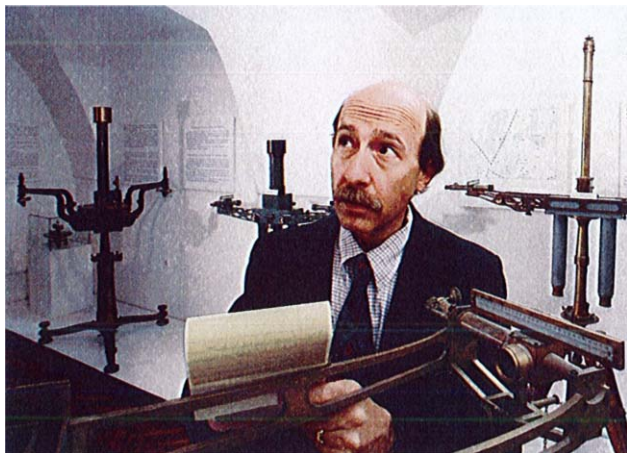


2. ábra. A Princeton Egyetem Eötvös-ingájának elvi vázlata a *Scientific American* 1961. decemberi címlapján. Az alig több, mint 1 század milliméter vastagságú volfrámhuzalon lógó kvarcháromszög-re két arany- és egy alumíniumhengert akasztottak.

keresett. Megkapta az Eötvös, *Pekár* és *Fekete* 1922-es cikkének alapjául szolgáló mérési jegyzőkönyvet, majd később *Renner* egyik méréssorozatát is, amelynek elemzésében *Renner* az EPF-cikk eljárását követte. Az Eötvös–Dicke-mérésként emlegetett mérésükről készült publikáció történetére visszaemlékezve *Peter Roll* a Dicke-től kapott feladatai között hangsúllyal sorolta fel Eötvös és társai, valamint *Renner* adatainak újraelmzését [7].

A moszkvai Lomonoszov Egyetem Fizikai intézetének pincéjében építette fel *Viktor Braginszkij* és munkatársa azt az Eötvös-típusú ingát, amellyel 1972-ben a platina- és alumínium-próbátárgyak Nap felé gyorsuló esésében tesztelték a 24 órás periódus fellépését. *Braginszkij* az öt meglátogató *Anna Nobilinak* még meg tudta mutatni [10] azt az elrendezést, amely szimmetrikusan elhelyezett 4-4 Al- és Pt-próbatestből állt. Az elrendezés speciális geometriájával a gravitációs tér inhomogenitása multipólus-sorfejtésének ötödik kifejtési együtthatóját is kiküszöbölték. A napi periódusú környezeti hatásoktól a Lomonoszov Egyetem alatti sziklába vájt pince védte a berendezést. *Braginszkij* és *Panov* újabb nagyságrenddel közelebb szorította nullához az Eötvös-paraméter értékét [11].

A legszisztematikusabb Eötvös-típusú méréssorozatot Washington Állam Egyetemén, Seattle-ben az *Eric Adelberger* vezetésével dolgozó csoport hajtotta végre. Mérésüket a gyenge ekvivalenciaelv ellenőrző program *E. Fischbach* (3. ábra) által átfogalmazott stratégiája ösztönözte [12]. Egy véges makroszkopikus hatótávolságú erőter, amely például különböző intenzitással csatolódik a protonokhoz és a neutronokhoz, a gyenge ekvivalenciaelvet sértő Yukawa-potenciállal egészítené ki az általános tömegvonzás Newton-törvényét. Megtalálása (vagy cáfolata) volt Adelberger csoportjának célja.

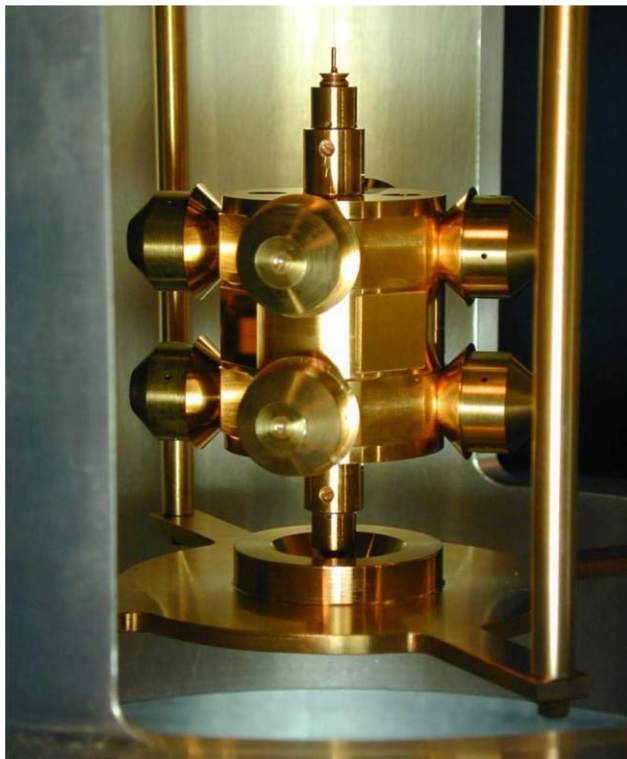


3. ábra. Ephraim Fischbach az 5. erő keresésének kezdeményezésével 1986-ban új életre keltette az Eötvös-kísérletet. A kép az akkor még létezett tihanyi Eötvös-inga gyűjteményben tett 1988-as látogatásakor készült (A Nat. Geo. Magazine engedélyével).

A Nap felé gyorsulást mérő korábbi princetoni és moszkvai mérések révén csak a 10^{11} m-nél nagyobb hatótávolságú erők kimutatására lett volna esély. Viszszatértek a Föld gravitációs terében történő szabad-esés Eötvös-paraméterére végzett kísérletekhez. A seattle-i laboratórium környezetének gravitációs inhomogenitása lehetővé tette, hogy a hipotetikus Yukawa-potenciál létezését egészen 1 m-es hatótávolságig ellenőrizhessék.

Továbbá meg akartak szabadulni a mérési eredmények pontosságát szisztematikusan korlátozó napi periódusú környezeti zajoktól is. Miután a berendezés alkatrészei (torziós szál, forgótányér stb.) sajátrezgéseikhez való dinamikus csatolódást is meg kívántak

4. ábra. Az Eöt-Wash csoport forgó Eötvös-ingája.



akadályozni, végül mHz periódussal forgó Eötvös-ingával oldották meg a próbatetek ciklikus cserélésének feladatát (4. ábra).

A kísérletekhez 4-4 Be-Ti és Be-Al anyagpárból álló próbatestet alakítottak ki, amelyek rezgésállapotát együttforgó tükrök segítségével 75, illetve 110 napig regisztrálták, majd a jel időfüggésének Fourier-felbontásából felső korlátot adtak a mHz-es spektrális komponens jelenlétére. A múlt év végéig a seattle-i csoport Eötvös-mérés elvén alapuló méréséből származó 10^{-13} -as korlát volt a gyenge ekvivalenciaelv érvényességére vonatkozó legjobb kísérleti eredmény [13].

Túl az Eötvös-típusú méréseken

Égitestek szabadesése

Peebles történeti visszatekintése [7] szerint az 1957-es Chapel Hill konferencián tartott előadásában Dicke javaslatot tett a Hold mozgásának nagy pontosságú mérésére is, amely végül a Hold-Föld-távolság hosszú időtartamú lézeres monitorozásához vezetett. Az ehhez szükséges tükröt Dicke javaslatára az Apollo-11 vitte el a Holdra. A tükrő lézersugárral történő megtalálása komoly nehézségek után sikerült (a szovjet Lunohod-1 automata holdraszálló egysége által 1970-ben elhelyezett tükröt 2010-ben találták meg). 1971-ben az Apollo-15 misszió újabb, nagyobb felületű tükrögyűttest helyezett el. (Ekkor végezte el a Galileinek tulajdonított ejtési kísérletet – egyik kezéből egy kalapácsot, másikkal egy madártollat leejtve – David Scott a Holdon, lásd <http://fizikaiszemle.hu/extra/1901patkos.mp4>.)

A Földről indított néhány szögmásodpercnyi lézernyaláb a Holdon néhány kilométeresre szélesedik. A tükrőről visszaverődő fotonok a Földön a megfigyelő állomás körüli néhány tíz kilométeres sugarú területre érkeznek, így fejlett eljárásokkal érhető csak el, hogy néhány másodpercenként észleljenek egy-egy visszaverődő foton. A foton körútjának idejét mérve 1969-ben 15 cm-es, jelenleg 1 cm-es pontossággal tudják mérni a Föld-Hold-távolságot.

A két égitest pályájának gravitációs szabadesése a Nap felé összevetve a Lawrence Livermore Laboratórium szuperszámítógépén folyamatosan integrált tisztán newtoni háromtest-mozgásegyenletek megoldásával szintén 10^{-13} nagyságrendű korlátot adott az Eötvös-paraméterre [14]. A két égitest elemösszetételének különbözősége esetén ez a gyenge ekvivalenciaelv teljesülésére ad korlátot, ám a geológusok között erős a tábor a azonos összetételnek, amelyet pártolói a két égitest azonos történeti eredetére alapoznak. Ugyanakkor a Föld súlyos tömegében a gravitációs kötési energia részaránya 10^{-9} nagyságrendű. Ennek alapján viszont az Eötvös-paraméterre vonatkozó korlátból először sikerült korlátot találni az erős ekvivalenciaelv teljesülésének mértékére. A két fenti adat egyszerű kombinálásával a Lunar Laser Ranging teszttel 10^{-4} pontosságú bizonyítékra jutottak!

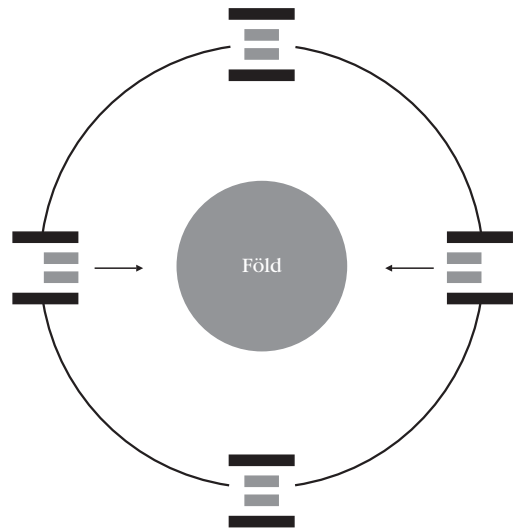
Amennyiben a szabadesés gyorsulásának megfigyelését nagyobb tömegű égitestekkel lehet elvégezni, az erős ekvivalenciaelv érvényességére is erősebb felső korlátot lehet találni. Ezt a mérést valósították meg négyéves megfigyelési munkával 2018 nyarára *M. A. Archibald* és munkatársai [15]. A 2014-ben felfedezett PSR J0337+1715 jelzésű hármas csillagrendszer egy szorosabban kötött neutroncsillag-fehér törpe kettőscsillagból (periódusidő: 1,6 nap), valamint azok gravitációs terében lazábban kötve mozgó második fehér törpéből áll (periódusidő: 327 nap). A két pálya majdnem tökéletesen egy síkba esik és külön-külön nagyon kis excentricitásúak. A mérés célja annak vizsgálata volt, hogy a kettős csillag két (nagyon erősen eltérő barionikus összetételű) tagja azonos gyorsulással esik-e a „magányos” fehér törpe felé? Ha a két objektum gyorsulása különbözne, akkor a hatéves megfigyelés során pályájuk excentricitásának meg kellett volna növekednie. A $\sim 2 \cdot 10^{-6}$ értékű korlát a gyenge ekvivalenciaelv szempontjából nem „világrekord”. Am a neutroncsillag gravitációs kötési energiája a teljes súlyos tömeg 20%-át is elérheti, így az eredmény az erős ekvivalenciaelv érvényességi korlátját két nagyságrenddel megjavítja. (A jelen szerzőhöz hasonlóan, nemspecialisták az igen tömör közlemény lényegét [16] segítségével foghatják fel.)

Szabadesési kísérletek mesterséges holdon

A MICROSCOPE (Micro-Satellite á traînée Compensée pour l’Observation du Principe d’Équivalence) francia műholdat 2016 tavaszán állították 710 km magasságú pályájára. Fedélzetén két tökéletesen azonos geometriájú berendezést helyeztek el. Mintatárgyai hengerek, belülről lyukasak, így a kisebb sugarú a nagyobb belsejében helyezhető el. Az egyik berendezésben azonos anyagból (90% Pt, 10% Rh) készült a külső és a belső henger is. Ez a referenciaberendezés. A másikkban a belső henger ugyanilyen, a külső viszont (90% Ti, 6% Al és 4% V) összetételű ötvözetből készült. A két hengert a Földön koncentrikusan helyezték el, a külsőt rögzítették, a belső viszont kapacitív elektrosztatikus erővel (tehát mechanikai érintés nélkül) tartható a helyén, ha valamely erők el kívánának mozdítani.

A mérés egyszerű elvét a 5. ábra mutatja. A Föld körüli pálya azon szakaszain, ahol a gravitációs vonzás lényegében a hengerek tengelye mentén hat, a kétféle anyagból készült hengereket tartalmazó berendezésben a belső henger elmozdulna a külsőhöz képest, ha a kétféle anyagra eltérő gravitációs gyorsulás hatna. Ezt ellensúlyozó erők ébrednek, amelyek nagyságának időbeli alakulását regisztrálják. Itt tehát a gravitációs erőt kompenzáló nemgravitációs erők összehasonlításából számítják az Eötvös-paramétert.

A gyenge ekvivalenciát sértő jel a keringési frekvencia kétszeresével jelentkezne (5. ábra). Megfelelő keringési idő választással az erőhatások időmenetének Fourier-spektrumában a napi periódusú zajhatásoktól elkülönült helyen várható a jel. A mikroszonda



5. ábra. A Föld körüli pályán minden fordulat során a belső henger kétszer tud elmozdulni a Föld felé, ha gyorsulása nagyobb, a Földdel ellentétesen, ha a rá ható erő kisebb, mint ami a külső hengerre hat. Az elmozdulást elektrosztatikus jellegű erők fellépése akadályozza. A kompenzáló erő időfüggését hosszú időtávon regisztrálva lehetséges a gyenge ekvivalenciaelvet sértő hatás intenzitásának pontos meghatározására.

a keringési síkjára merőleges tengely körül is megpörgethető, amelynek frekvenciája hozzáadódik (kivonódik) a keringési frekvenciához(ból).

2017 decemberében tették közzé az első 120 teljes fordulat során regisztrált erőhatási amplitúdósorozat feldolgozásának eredményét. Az időfüggés Fourier-transzformáltját képezve meghatározták a forgási frekvenciával modulált frekvenciaértékeknél mért spektrális erősség felső korlátját, amiből az Eötvös-hányados értékére

$$\eta(\text{Ti; Pt}) = [-1 \pm 9(\text{stat}) \pm 9(\text{syst})] \cdot 10^{-15}$$

adódik. Ez 10^{-14} -es korlátnak felel meg, ami újabb nagyságrenddel megjavítja a legjobb földi méréssel nyert korlátot [17]. A berendezés további egy évre tervezett működése alatt megnövekedő statisztikájával egy újabb nagyságrenddel remélik csökkenteni az Eötvös-hányadosra vonatkozó felső korlátot.

Jelenleg is dolgoznak az űrben még nagyobb, 10^{-17} -es pontossággal végrehajtható ellenőrzés fejlesztésén [18] (és folytatják a szükséges milliárd eurós finanszírozás elnyeréséért folytatott meggyőző „hadjáratot”).

A gyenge ekvivalencia sérülésének elméleti részecskefizikai vonatkozásai

Milyen határig van értelme az ekvivalenciaelv teljesülési pontossága ellenőrzésének? Alább *P. Fayet* cikke [19] nyomán a vizsgálódás elméleti részecskefizikai érdekességét szeretném vázolni.

A standard részecskefizikai elméleten túli alapvető kölcsönhatások között mind a húrelméletek, mind a szuperszimmetrikus elméletek elvezetnek egy úgynevezett „sötét foton” létezéséhez. Ez az erőter a mak-

roszkopikus anyag töltésseljellező mennyiségeinek (azaz a Q elektromos töltés, a B barionikus töltés és az L leptontöltés) valamilyen kombinációjához csatolódik. Az általa közvetített kölcsönhatás igen kis mértékben (ezt a kicsinységet alább számszerűen is jellemezni fogjuk) keveredik az elektromágneses kölcsönhatással, ezért érdemes az anyagnak a sötét fotonhoz való csatolódási erősségét az e elektromos egységtöltés arányában kifejezni:

$$Q_{\text{sötét}} = (\varepsilon_Q Q + \varepsilon_B B + \varepsilon_L L) e.$$

Az ε_i mennyiségek jellemzik az egyes töltésekhez való csatolás erősségét az elektromágneses csatolás erősségének arányában. A sötét foton a Föld és a próbatest között (a gravitációval egyszerre) Coulomb-típusú potenciált hoz létre (az azonos előjelű testek taszítják egymást):

$$V_{\text{sötét}} = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r} (\varepsilon_Q Q + \varepsilon_B B + \varepsilon_L L)_{\text{Föld}} \cdot (\varepsilon_Q Q + \varepsilon_B B + \varepsilon_L L)_{\text{próba}}.$$

A nagy hatótávolságból származó exponenciális tényező nem játszik szerepet az alábbi nagyságrendi elemzésben, ezért nem törődünk vele.

A fenti potenciálból származó gyorsulás a tömegvonzási gyorsulásra szuperponálódva éppen azért sérti a szabadesés univerzalitását, mert az az anyag fenti kombinációval jellemzett töltésállapotától függ. A teljes gyorsulás

$$g \rightarrow a_{\text{próba}} = (1 + \delta_{\text{próba}}) g$$

módon változik meg, ahol

$$\delta_{\text{próba}} = \frac{V_{\text{sötét}}}{V_{\text{grav}}}.$$

Az Eötvös-paraméterre világos módon fennáll az egyszerű kapcsolat:

$$\eta(A, B) = \delta_A - \delta_B.$$

Mivel a próbatestek semlegesek a sötét foton által közvetített erőhatásban az elektromos Q_A és Q_B töltéshez csatolódó rész nem játszik szerepet. Egyszerű bővítéssel a potenciálok hányadosát két proton kölcsönhatásának hányadosával lehet kifejezni:

$$\delta_A = - \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 G_N m_p^2} \left(\frac{m_p}{u} \right)^2 \cdot \frac{(\varepsilon_B B + \varepsilon_L L)_{\text{Föld}}}{m_{\text{Föld}}/u} \frac{(\varepsilon_B B + \varepsilon_L L)_A}{m_A/u},$$

ahol u az atomi tömegegység (egyezség szerint a ^{12}C mag tömege: $12 u$). A továbbiakban az m/u relatív

atomtömegeket A_r -rel jelöljük. Az első két tényező óriási számtényezőt ad:

$$\delta_A = -1,2536 \cdot 10^{36} \left(\varepsilon_B \frac{B}{A_r} + \varepsilon_L \frac{L}{A_r} \right)_{\text{Föld}} \left(\varepsilon_B \frac{B}{A_r} + \varepsilon_L \frac{L}{A_r} \right)_A.$$

A Föld anyagának összetételére modellt alkotva, az első tényezőben az ε keveredési együtthatók melletti számfaktorok megbecsülhetők, így az Eötvös-paraméterre

$$\eta(A, B) \approx -1,2546 \cdot 10^{36} (\varepsilon_B + 0,4866 \cdot \varepsilon_L) \cdot \left(\varepsilon_B \Delta \frac{B}{A_r} + \varepsilon_L \Delta \frac{L}{A_r} \right)$$

adódik, ahol Δ a két próbatest megfelelő adatainak különbségét jelöli. A MICROSCOPE kísérletben használt Pt- és Ti-ötvözetre Fayet a következő becslésre jut [19]:

$$\eta(\text{Ti, Pt}) \approx -1,2546 \cdot 10^{36} (\varepsilon_B + 0,4866 \cdot \varepsilon_L) \cdot (0,00079 \cdot \varepsilon_B + 0,05704 \cdot \varepsilon_L).$$

A legnépszerűbb elméletváltozatokban a sötét foton vagy tisztán a barionszámhoz, vagy tisztán a leptonszámhoz, vagy a $B-L$ különbséghez csatolódik. Utóbbi az atomos anyag esetében a neutronok sűrűségéhez való csatolódást jelenti. Mindegyik esetében az Eötvös-paraméternek az ekvivalenciaelvet sértő értékére adott korláttal a sötét foton és a standard erők közötti keveredés effektív paraméterére adódik korlát. A MICROSCOPE korlátból akár a bariontöltés révén, akár a leptontöltés révén nagyságrendileg az $\varepsilon \approx 10^{-24}$ nagyságrendű keveredési erősség adódik.

Van-e bármilyen esély, hogy ilyen hihetetlenül csekély keveredési intenzitás adódjék elméleti megfontolásból (vagy még ennél is kisebb, ha a mérési pontosság további javulásával újabb nagyságrendekkel csökkenne az Eötvös-paraméterre vonatkozó korlát)?

Fayet cikke a szuperszimmetrikus elméletek azon tulajdonságára mutat rá, amely szerint a standard és nemstandard kölcsönhatás közötti keveredést általában az elmélet két lényegesen eltérő jellemző energiaskálájának hányadosa határozza meg. A szuperszimmetrikus részek várt (remélt) tömegskálája $m_{\text{SUSY}} \approx 1-10 \text{ TeV}$, míg az elmélet egészére az átfogó egységes elmélet skálája jellemző: $\Lambda \approx 10^{12}-10^{14} \text{ TeV}$, ahol az összes elemi kölcsönhatás egyetlen egységes alapvető kölcsönhatásban egyesül. A keveredési ε paraméter a kettő hányadosának négyzetével arányos, ami éppen a jelenleg vizsgált tartományba esik!

A gyenge ekvivalenciasérülés skálájának megtalálása olyan eszköz a standard modellen túllépő részecskefizikai elméleti modellek ellenőrzésére, amely a gyorsító részecskeeltérő tartományán túl eső tartományokról is adhat információt.

Záró megjegyzés az Eötvös-mérés fizikatörténeti helyéről

Érdemes rámutatni, hogy az Eötvös-mérést kiemelkedő személyiségek sora kapcsolja a modern asztrofizika legnagyobb jelentőségű kísérleti vállalkozásaihoz. 1965-ben posztdoktori kutatóként Dicke irányításával dolgozott *Rainer Weiss*, aki 2017-ben a gravitációs hullámok felfedezéséért kapott Nobel-díjat. Érdemes hosszabban idézni a Peebles-szel folytatott interjújának egy jelen cikk témájához illeszkedő részét:

„Dicke Eötvös-kísérletének kulcs gondolata volt, hogy alacsony zajú szenzorok jeleit visszacsatolta a mechanikai berendezés (az inga) csillapítására és helyzetének meghatározására. A berendezés helyzetének rögzítése és azon – időben változó – erő használata a fizikai információ kiolvasására, amellyel azt helyzetében rögzítette, Dicke Eötvös-kísérletét követően sok nagy pontosságú mechanikai mérés kulcsmomentuma lett. A visszacsatolással elérte, hogy a rendszer a lineáris válasz tartományában maradt és az ügyes megvalósítással a szerkezet nemlinearitásával potenciálisan gerjeszthető normálmódusokat el tudta nyomni. Ezzel lecsökkentette a mérés fizikai információt tároló módusának zaját. A LIGO sok ezer ilyen visszacsatolást tartalmaz.”

E megjegyzés fényében elég természetes, hogy 1993-ban Viktor Braginszkij csoportja is csatlakozott a LIGO-kooperációhoz. 2016-os elhunytakor az orosz sajtó a gravitációs hullámok társfelfedezőjeként emlékezett meg róla. Az Eöt-Wash csoport torziós méréseknél fellépő zajok kiszűrésére konstruált eszközei/eljárásai természetes úton vezettek például az Advanced LIGO szeizmikus szigetelési stratégiájának kidolgozásában való részvételükhöz.

Az Eötvös-mérést a tudományos világ a nagy pontosságú kísérleti gravitációs fizika történetének kiindulópontjaként tartja számon. Ezt a vélekedést látványosan megerősíti az elmúlt fél évszázad Eötvös-típusú mérései és a ma legnagyobb figyelmet elnyerő gravitációs kutatási irányok közötti személyi folyamatosság is.

Irodalom

1. Mikola Sándor: Báró Eötvös Loránd tudós egyénisége, in: *Báró Eötvös Loránd Emlékkönyv*. A gr. Vigyázó-vagyoni jövedelmének felhasználásával kiadta a Magyar Tudományos Akadémia, 1930 (szerk. Fröhlich Izidor) 261–286.
2. Király Péter: A 100 éves Eötvös–Pekár–Fekete kísérletek és máig tartó hatásuk. *Fizikai Szemle* 57/1 (2007) 1–6.
3. G. Galilei műveiből és valós cselekedeteiből leszűrt tudománytörténeti jelentőségét összefogottan méltatja Simonyi Károly *A fizika kultúrtörténete* című könyvének 3.3 fejezete (199. oldal, 5. kiadás, Akadémiai Kiadó, Budapest, 2011)
4. I. Newton: *A Principiából és az Optikából, Levelek Bentleyhez.* (válogatta Heinrich László) TÉKA, 1981.
5. R. v. Eötvös: Über die Anziehung der Erde auf verschiedene Substanzen. *Mathematische und naturwissenschaftliche Berichte aus Ungarn* 8 (1889) 5–12.
6. R. v. Eötvös, D. Pekár, E. Fekete: Beiträge zum Gesetze der Proportionalität von Trägheit und Gravität. *Annalen der Physik* 68 (1922) 11.
7. P. J. E. Peebles: Robert Dicke and the naissance of experimental gravity physics. *Eur. Phys. J. H* 42 (2017) 177–259.
8. R. H. Dicke: The Experimental Basis of Einstein's Theory. In: *Proc. of 1957 Chapel Hill Conference on the Role of Gravitation in Physics*. (ed. B. DeWitt) 5–12.
9. P. G. Roll, R. Krotkov, R. H. Dicke: The equivalence of inertial and passive gravitational mass. *Ann. Phys.* 26 (1964) 442–517.
10. A. M. Nobili, A. Anselmi: Relevance of the weak equivalence principle and experiments to test it: lessons from the past and improvements expected in space. *Physics Letters A* 382 (2018) 2205–2218.
11. V. B. Braginsky, V. I. Panov: Verification of the equivalence of inertial and gravitational mass. *Sov. Phys. JETP* 34 (1972) 463–466.
12. E. J. Fischbach: The fifth force: a personal history. *Eur. Phys. J. H* 40 (2015) 385–467.
13. T. A. Wagner, S. Schlamminger, J. H. Gundlach, E. G. Adelberger: Torsion-balance tests of the weak equivalence principle. *Classical and Quantum Grav.* 29 (2012) 184002.
14. J. G. Williams, S. G. Turyshev, D. H. Boggs: Lunar laser ranging tests of the equivalence principle. *Classical and Quantum Gravity* 29 (2012) 184004.
15. M. A. Archibald, N. V. Gusinskaia, J. W. T. Hessels, A. T. Deller, D. L. Kaplan, D. R. Lorimer, R. S. Lynch, S. M. Ransom, I. H. Stairs: Universality of free fall from the orbital motion of a pulsar in a stellar triple system. *Nature* 559 (2018) 73–76.
16. C. M. Will: General relativity passes another test. *Nature* 559 (2018) 40–41.
17. P. Touboul et al.: MICROSCOPE Mission: First Results of a Space Test of the Equivalence Principle. *Phys. Rev. Lett.* 119 (2017) 231101.
18. A. M. Nobili, A. Anselmi: Testing the equivalence principle in space after the MICROSCOPE mission. *Phys. Rev. D* 98 (2018) 042002.
19. P. Fayet: MICROSCOPE limits for new long-range forces and implications for unified theories. *Phys. Rev. D* 97 (2018) 055039.

SZÁMÍTUNK RÁD, LÉGY A FIZIKA BARÁTJA!



Támogasd adód 1%-ával az Eötvös Társulatot!

Új adószámunk: 19815644-2-43

MIT TANULHATUNK A BIG DATÁBÓL, AVAGY HOGYAN VÁLASZTUNK KOMMUNIKÁCIÓS CSATORNÁT?

Török János,^{1,2} Kertész János^{1,3}

¹BME, Elméleti Fizika Tanszék

²MTA–BME Morfodinamika kutatócsoport

³Department of Network and Data Science, CEU

Az utóbbi időben a szociális viselkedés vizsgálata egyre inkább multidiszciplináris tudományággá vált. Az emberi kommunikáció és kapcsolat mind nagyobb hányada zajlik digitális rendszereken (telefon, internet), amelyekről rengeteg adat áll rendelkezésre. Az adatok analízisében a szociológusok mellett úttörő szerepet játszottak fizikusok, matematikusok és informatikusok is [1, 2], hiszen számos technikára volt szükség a gráfelméletől az adatbányászaton és a sok-ügynökös modellezésen keresztül a statisztikus megközelítésig.

A nagy adatokban rejlő lehetőségek alapos tudományos igényű és nyilvánosságot kapó megértése azért is fontos, hogy minél inkább elkerülhető legyen az ilyen jellegű tudás álságos felhasználása, amire a nagy nemzetközi céges sajnos hajlamosaknak látszanak (a közelmúltban lásd a Facebook és a Cambridge Analytica botrányát [3]). Azonban nagy kérdés, hogy egyes digitális szolgáltatások adataiból mennyire lehet megbecsülni a valódi társadalmi tulajdonságokat. Az alábbiakban ezzel a kérdéssel foglalkozunk.

Mielőtt konkrétan felvázolnánk a problémát, tekintsük át, hogyan lehet reprezentálni és modellezni a digitális szolgáltatásokon megjelenő emberi kapcsolatokat.

Az emberi kapcsolatokat legegyszerűbb modellje egy súlyozott gráf [4], ahol a csúcspontokban az egyének vannak, az élek a szociális kapcsolatot, az élsúlyok

pedig a kapcsolatok erősségét jellemzik. A szociális kapcsolatok egyik alapvető ábrázolási módja az úgynevezett egocentrikus hálózat, amely egy olyan gráf, ahol egy központi egyén (az ego), illetve ismerősei (az alterek) a gráf csúcsai, amelyek között az élek a szociális kapcsolatokat jelzik. Az *1.a ábrán* egy tipikus egocentrikus hálózatot mutatunk. Az ábrázoló programban az élek vonzó rugóként, a csúcspontok taszító pontonként vannak modellezve és így alakul ki a szemléltetett struktúra. Jól láthatók a jellegzetes közösségek, amelyek megfelelnek a valós életbeli csoportoknak, mint például munkahely, baráti társaság, rokonok stb. Ezért a kapcsolatokat nem lehet pusztán egyetlen számmal jellemezni, hiszen más jellegű egy szakmai barátság, mint egy rokoni kapcsolat. Ha csak egy típusú kapcsolatokat vizsgálunk (*1.a ábra*, felső sorok), akkor kirajzolódnak a megfelelő közösségek. Minden ilyen közösség egy réteget képez a társadalomban (például munkahelyi ismerettség hálózat, rokonság, sportolási kapcsolatok), és az ilyen rétegek együttese adja az emberek teljes szociális hálózatát. Az ilyen többretegű gráfot, ahol különböző rétegeken vannak élek, de a csúcsok minden szinten megfeleltethetők egymásnak – hiszen minden rétegben ugyanarról az emberről van szó – multiplex hálózatnak nevezzük.

A szociális kapcsolataink általános értelemben vett kommunikáció révén jutnak kifejezésre. Legközelebbi barátainkkal gyakori kapcsolatban vagyunk. Megfigyelhető, hogy amennyiben a rendszeres kommunikáció nehézségbe ütközik, akkor kapcsolatunk még a legjobb barátunkkal is elhalványodik (ez alól csak a rokonsági kapcsolat kivétel, ahol hosszú idő után is sokkal könnyebb felvenni a kapcsolatot). Belső igényünk tehát, hogy kapcsolatban legyünk egymással és erre ma már a személyes találkozáson kívül rengeteg lehetőségünk van: telefonálhatunk, küldhetünk sms-t, írhatunk e-mailt, tweetet, vagy azonnali üzenetet valamilyen internetes szociális hálózaton stb. Ezeket kommunikációs csatornáknak hívjuk.

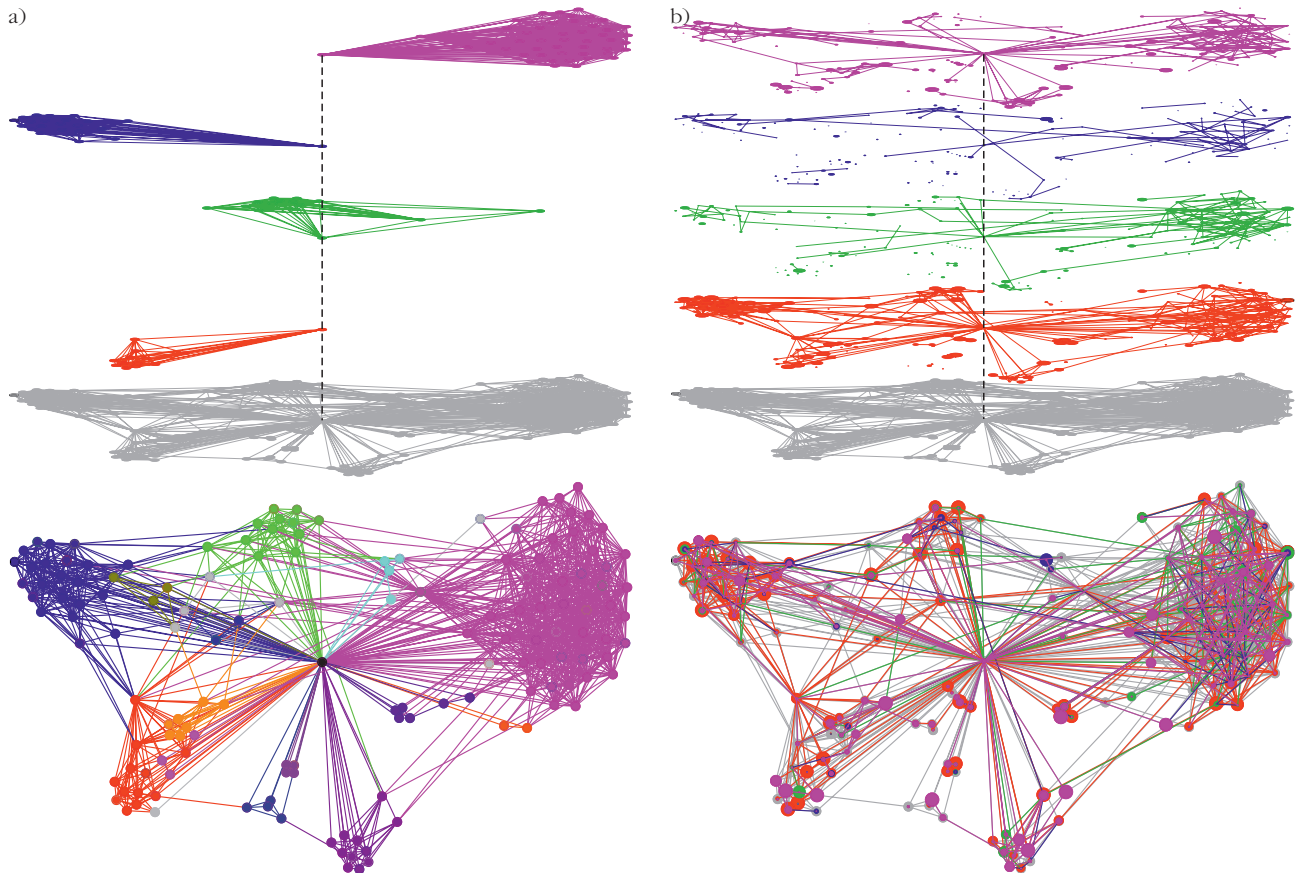
A kommunikációs csatornák kiválasztásánál az emberek sok szempontot mérlegelnek. Először is előfordul, hogy egy adott szolgáltatáshoz egyik ismerősünk nem fér hozzá (például nagyszülőnek nincs Instája), de nagyon fontos, hogy ki melyiket szereti és figyelni állandóan (például egy állandóan lehalkított telefonú gyermek hívogatása eléggé partatlan dolog, amit sok szülő tapasztalatból tud). Tehát rá vagyunk kényszerítve, hogy több kommunikációs csatornát használjunk. Kapcsolataink nem



Török János fizikus egyetemi tanulmányait az ELTE-n végezte, majd 2000-ben PhD fokozatot szerzett fizikából a BME-n. Jelenleg az MTA–BME Morfodinamika Kutatócsoport tagja és a BME Elméleti Fizika Tanszékének docense. Érdeklődési területe a szemcsés anyagok numerikus szimulációja, szemcsék alakváltozásának, továbbá a szociális hálózatok dinamikájának modellezése, illetve kommunikációhoz kapcsolódó „Big Data” elemzése.



Kertész János fizikus, az MTA rendes tagja, egyetemi tanár, a CEU Hálózat- és Adattudományi Tanszékének vezetője, a BME részfoglalkozású professzora. Kutatási területe a statisztikus fizika interdiszciplináris alkalmazásai és a számítógépes társadalomtudomány. Elsősorban a társadalom szerkezetére és működésére jellemző „Big Data” elemzésével és modellezésével foglalkozik.



1. ábra. Egy ember egocentrikus multiplex hálózatának szemléltetése. A felső rész a különböző rétegeket szemlélteti, az alsó ábra pedig ezek összességét. a) A különböző kapcsolattípusok szerint (rokonság, iskolatársak, munkatársak stb.), itt egy jól látható közösség tartozik egy típushoz. b) A különböző kommunikációs csatornákon megjelenő kapcsolatok szemléltetése.

csak az ismeretség típusa, hanem a kommunikáció módja szerint is többretegű.

Amikor egy-egy digitális szolgáltatás adatait vizsgáljuk, akkor ebből a többretegű hálózatból csak egy réteget látunk. Mivel, helyesen, az ilyen adatokhoz való hozzáférés még a kutatók számára is csak anonim adatokkal lehetséges, ezért a különböző adatbázisokat nem tudjuk összekötni, hogy megkapjuk az egyének teljes kommunikációs hálózatát.

A szociális kapcsolatok teljes rendszerét csak az összes csatorna együttes elemzése tudná pontosan felfedni. Nagy kérdés tehát, hogy a kommunikációs hálózatok egyetlen, rendelkezésre álló csatorna által lefedett része mennyire adja vissza a teljes szociális hálózat tulajdonságait. Az ezen a részleges, a multiplex egyetlen rétegére vonatkozó gráfon megmért adatok mennyiben és hogyan változnak meg a részletesség miatt?

Két adatbázissal fogunk foglalkozni: (i) az iWiW ismeretségi hálózattal és (ii) egy mobiltelefon-szolgáltató híváslistájával.

i) Az iWiW-et talán még mindenki ismeri, ez a szociális hálózat, amely 2002-ben indult és 2006-ban üstökösszerű fejlődésnek indult. Élettartamának nagy részében a három legnépszerűbb weboldal közé tartozott Magyarországon, sokak szerint az internet terjedésének egyik hajtóereje volt: 2006-tól 2010-ig az interneteléréssel rendelkező magyarok 2/3-a a szolgáltató

tás felhasználója volt. A rendelkezésre álló adatok a következők: a belépés dátuma, a kapcsolatok listája a létesítés dátumával és az utolsó belépés dátuma. Az adatok 2011 januárjáig állnak rendelkezésre, amikor a szolgáltatás népszerűsége már töredékére esett vissza (a felhasználók 2/3-a már nem volt aktív). Az iWiW-szolgáltatást 2014. június 30-án megszüntették.

ii) A másik adat egy nagy európai ország egyik jelentős, 30%-os lefedettségű mobilszolgáltatója. Egy teljes év hívási adatai állnak rendelkezésre (ki, kit, mikor, mennyi ideig hívott). A hívások alapján egy hálózat állítható össze, ahol a csúcsok a hívásokban részt vevő emberek, akik között akkor van él, ha hívták egymást telefonon. Noha a hívásokat mindig az egyik fél kezdeményezi, az élék irányítottságától eltekintünk, hiszen információ mindkét irányban folyik.

Két egyszerű, szociális szempontból is fontos mennyiséget vizsgálunk: a $P(k)$ fokszámeloszlást és a k fokszerű csúcsok szomszédainak $k_{nn}(k)$ várható fokszerűségét, ami az úgynevezett fokszerű-asszortativitással van kapcsolatban. A fokszerűség egy adott csúcs esetén a belőle kiinduló élék számát méri. A fokszerűeloszlás módusa azt mutatja meg, hogy leggyakrabban hány kapcsolata van egy embernek. Meglepő módon mind az iWiW-es, mind a telefonos adat esetében (és gyakorlatilag szinte minden internetes kommunikációs adat esetében is, például twitter, facebook stb.) a fokszerűeloszlás módusa $k = 1$ -nél van

(2. ábra felső sora), ami ellentmond a hétköznapi tapasztalatnak. Ez ugyanis azt jelentené, hogy az a legvalószínűbb, hogy valakinek csak egyetlen egy szociális kapcsolata van. Ezt az effektust az egyetlen kommunikációs csatorna felhasználásából származó torzításnak kell betudnunk.

Megvizsgáltuk, hogy mi történik, ha csak a tapasztalt felhasználókat vizsgáljuk. Őket az iWiW esetén úgy definiáltuk, hogy bizonyos időnél többet töltöttek a szolgáltatással, a telefonos adatoknál pedig azokat választottuk ki, aki egy bizonyos számnál többet telefonáltak az adott időszakban. A 2. ábrán látható, hogy ekkor már 1-nél nagyobb helyen lesz a görbék maximuma. Úgy gondoljuk, hogy azok – adott csatornán mért – kapcsolati hálózata, akik nagy energiát fektetnek e kommunikációs csatornába (hosszú idő alatt alaposan összeválogatják barátaikat egy szociális hálón, sokat telefonálva tartják a kapcsolatot ismerőseikkel) jobban hasonlít a valódi szociális hálózatukhoz, tehát a rajtuk mért mennyiségek jellemzői jobban hasonlítanak a valódi szociális hálózati adataihoz, mint ha minden felhasználót figyelembe vennénk. Az utóbbiak között sok olyan van, aki csak egyszer-egyszer használja az adott csatornát és társadalmi kommunikációja nagy részét máshol bonyolítja le.

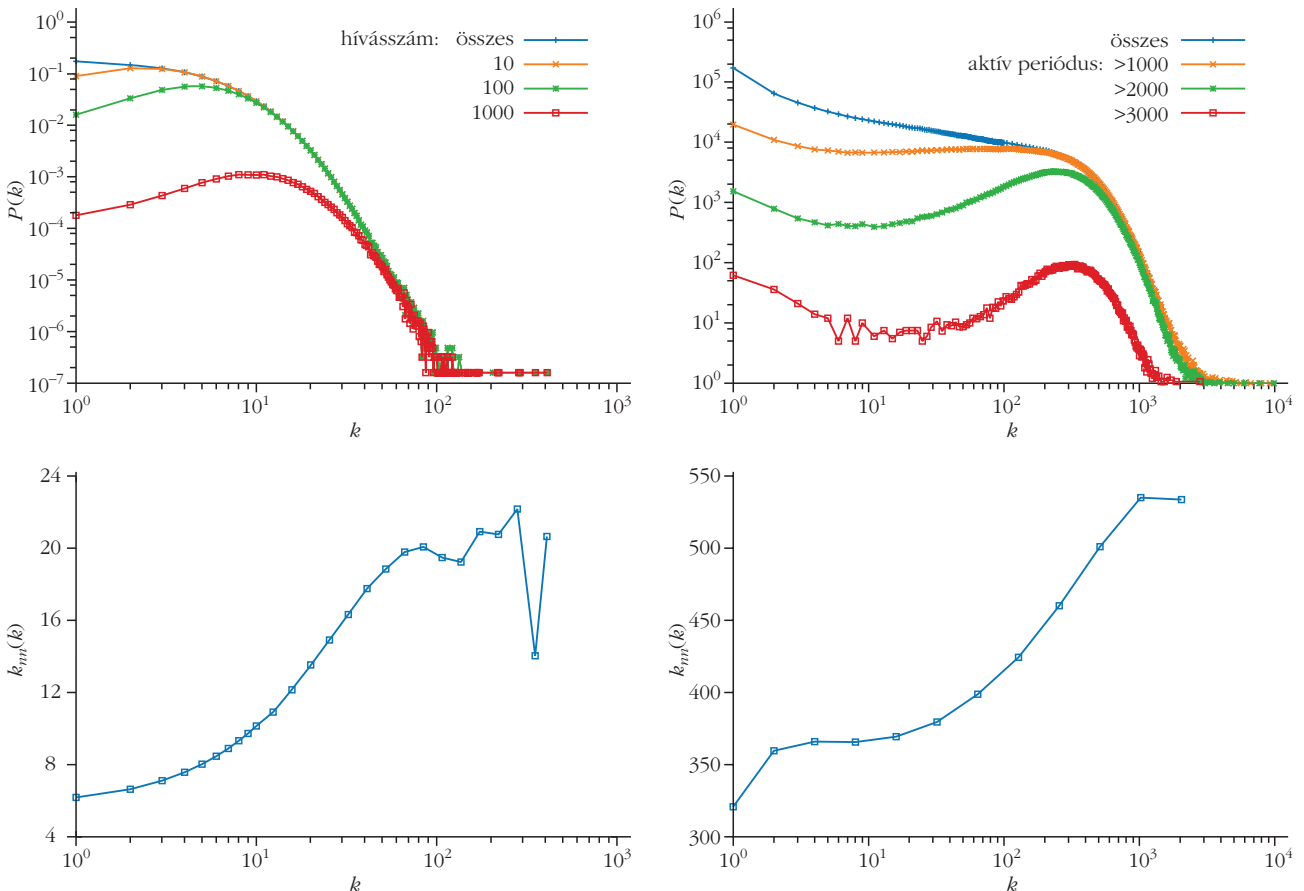
A fokszám-asszortativitás azt méri, hogy mennyire hajlamosak a nagy fokszámú csúcsok nagy fokszámú

csúcsokkal kapcsolódni. Ezt a legegyszerűbb a $k_{nn}(k)$ mennyiséggel, a k fokszámú csúcsok szomszédainak átlagos fokszámával mérni: ha monoton növekvő, akkor a hálózat asszortatív, ha csökkenő, akkor diszasszortatív. Szociális hálózatoktól azt várjuk, hogy asszortatívak, ami azt jelenti, hogy a nyitott, sok barátal rendelkező emberek előszeretettel kapcsolódnak hasonló, nyitott személyekhez. A 2. ábra alsó sorában látható adatok ezt a feltételezést támasztják alá, de kérdés, hogy mennyire bizonyító erejű egy ilyen ábra. Hiszen előfordulhat, hogy ez az effektus is, mint a fokszámeloszlás monotonitása, csak a mintavétel torzító hatásának következménye.

A probléma vizsgálatához modellezzük a csatornaválasztás mechanizmusát. Ezután – kiindulva a teljes multiplexre jellemző tulajdonságokból – megvizsgáljuk, hogy azok mennyiben torzulnak, ha csak egyetlen csatornát látunk.

Legyen adott egy egyén (i) és jellemezze $0 \leq f_i \leq 1$ affinitás azt, hogy i mennyire szereti a vizsgált kommunikációs csatornát. Az $f_i = 0$ azt jelenti, hogy nem fér hozzá a csatornához, az $f_i = 1$ pedig azt, hogy ha teheti, csak ezen kommunikál. Legyen i ismerőse j . Ha i és j kapcsolatba szeretne lépni egymással, akkor ki kell választaniuk egy kommunikációs csatornát. Azonban figyelembe kell venniük egymás affinitását is. Mert hiába szeret valaki e-mailt írni, ha a másik azt

2. ábra. Empirikus eredmények mobiltelefon- (bal oszlop) és az iWiW-adatokon (jobb oszlop). A felső sor a fokszámeloszlást mutatja. Az eredeti adat eloszlása kékkel, a tapasztaltabb felhasználókat (telefon esetén hívásszám, iWiW-nél aktivitási periódus-limit) rendre sárga, zöld, piros színnel jelöltük. Az alsó sorban az asszortativitás látható a teljes adataira.



csak nagyon ritkán olvassa. A kommunikációs csatornát tehát valamilyen $p(f_v, f_j)$ szimmetrikus valószínűséggel fogják választani. Ebből az is következik, hogy adott idő alatt egy kapcsolat $p(f_v, f_j)$ mennyiséggel arányos valószínűséggel jelenik meg a kommunikációs csatornán. Tehát a kommunikációs csatorna a valós kapcsolatokból mintavételez, ami azonban nem egyenletes, hanem az egyének affinitásától függ.

Modellünk tehát a következő: adott egy kommunikációs csatorna, az embereket egy affinitás jellemzi a csatorna irányában és a köztük lévő kapcsolatok $p(f_v, f_j)$ -vel arányos valószínűséggel jelennek meg a csatornán.

Megvizsgáljuk, hogy a fenti modell – a már említett két mennyiség tekintetében – miként változtatja meg az eredeti hálózat tulajdonságait.

Először is egy emberek közötti szociális hálózatot kell vennünk. Mivel ez nyilván nem ismert ezért két-féle modellt választottunk: (a) véletlen reguláris gráf, ahol minden csúcs fokszáma k_0 , de az élek véletlenül vannak behúzva a csúcsok között, (b) Erdős–Rényi-gráf, véletlenszerűen addig húzunk éleket az adott csúcshalmazú gráfba, amíg az átlagos foksám $\langle k \rangle$ nem lesz.

A vizsgált két hálózat minden tulajdonsága jól ismert. A véletlen reguláris gráf foksámeloszlása k_0 -nál Dirac-delta, $k_{mn}(k)$ pedig egyetlen pont. Az Erdős–Rényi-gráf (ER-gráf) foksám eloszlása Poisson-eloszlás, $k_{mn}(k)$ pedig konstans (nem asszortatív, de nem is diszasszortatív).

Emellett feltesszük, hogy az affinitások egy általános $P(f)$ eloszlásból származnak. Nyilvánvaló $P(f)$ monoton csökkenő, ami azt jelenti, hogy viszonylag kevés ember mutat túlradó lelkesedést egy kommunikációs csatorna iránt. Mi az exponenciális eloszlást választottuk:

$$P(f) = \frac{1}{f_0} \exp\left(-\frac{f}{f_0}\right), \quad (1)$$

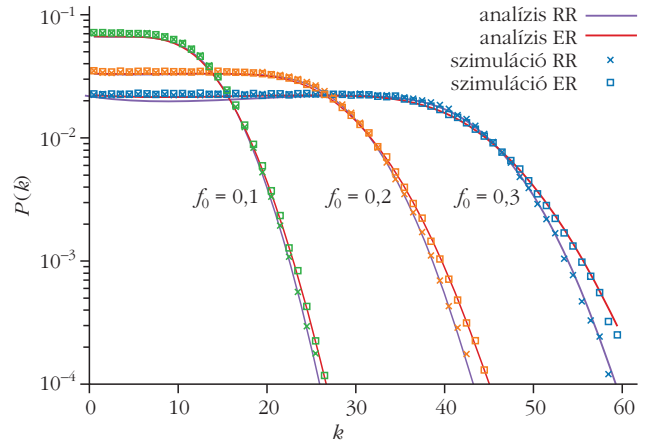
ahol f_0 az átlagos affinitás, ami egy kontrollparaméter. Az egyszerűség kedvéért, minden embernek az ismerőseitől független affinitást adunk a fenti eloszlásból.

Az utolsó kérdés a $p(f_v, f_j)$ függvény megválasztása. A kapcsolat létrejöttéhez – mint már említettük – az szükséges, hogy mindkét fél valamennyire használja ezt a csatornát. Bármelyik is idegenkedik tőle, inkább másik csatornát fognak választani, ezért a két affinitás közül a kisebbik bír fontosabb szereppel. Ezt legegyszerűbben egy minimumfüggvénnyel modellezhetjük:

$$p_{ij} \equiv p(f_v, f_j) = \min\{f_v, f_j, 1\}. \quad (2)$$

Az 1-et azért vettük a kifejezéshez, hogy a p_{ij} mennyiséget valószínűséggént tudjuk használni, amelynek értéke nem lehet nagyobb, mint 1.

A foksámeloszlást szerencsére analitikusan is ki lehet számolni [5]. A kapott foksámeloszlások mindig monoton csökkenők, még a véletlen reguláris gráf esetében is, amikor a kezdetben a foksámeloszlás egy Dirac-delta volt (minden csúcs foksáma k_0).



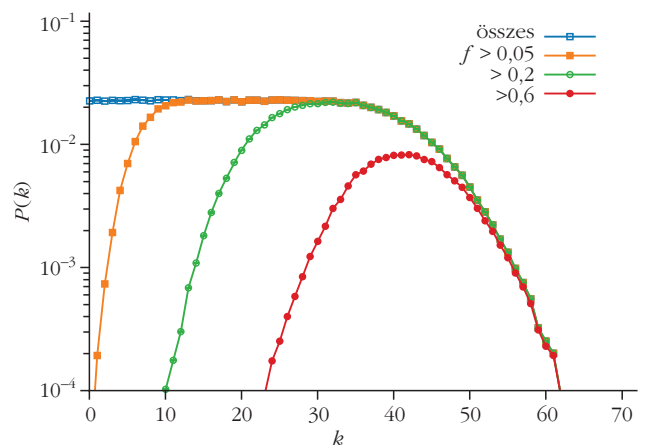
3. ábra. A szimulált kommunikációs csatornák foksámeloszlása. Az x a reguláris véletlen, a négyzet a ER-gráf kiindulási hálózatot mutatja, a folyamatos vonalak az analitikus eredmények. A három görbecsoport az affinitáseloszlás különböző f_0 paramétereire tartozik.

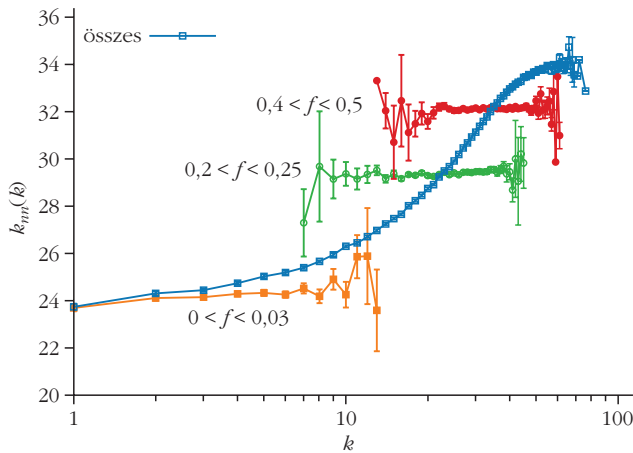
Ezt a 3. ábra szemlélteti, ahol mindkét kiindulási hálózatot megvizsgáltuk, és a mintavételezett foksámeloszlások – a kiindulási gráftól függetlenül – minden esetben nagyon hasonlóan néznek ki. Csak az affinitások f_0 paramétere van hatással az eredményekre, de a görbék monoton jellege megmarad. Ez azt jelenti, hogy a mintavételezési folyamatnak sokkal nagyobb hatása van az eredményekre, mint a kiindulási hálózatnak, és az empirikus adatokon látható monoton csökkenő foksámeloszlást is a mintavételezés okozhatja.

Megvizsgáltuk, hogy mi történik, ha csak a nagy affinitású nódusok foksámeloszlását vizsgáljuk meg. A 4. ábrán jól látható, hogy a foksámeloszlás maximuma újra véges értéknél lesz, mint ahogy az empirikus adatokon is látható. Ez azt sejteti, hogy a nagy affinitású felhasználók hálózata sokkal jobban hasonlít az eredetihez, mint a többi.

Vizsgáljuk meg az asszortativitásra jellemző $k_{mn}(k)$ -t! Itt az empirikus adatok is a társadalomról várható viselkedést mutattak. Már említettük, hogy a ER-hálózatnál a $k_{mn}(k)$ konstans, azonban a mintavé-

4. ábra. A szimulált kommunikációs csatornák foksámeloszlása $f_0 = 0,3$ és ER-gráf esetén. A kék görbe a teljes mintavételezett hálózat foksámeloszlását mutatja, a többi csak azon nódusokét, amelyek affinitása a megadott értéknél nagyobb.





5. ábra. Asszortativitásra jellemző $k_m(k)$ a mintavételezés után egy ER-gráfból kiindulva. A kék görbe a teljes mintavételezett hálózat asszortativitását mutatja, a többi csak azon nódusokét, amelyek affinitása a megadott tartományban van.

telezés után a hálózat asszortatív lesz (5. ábra). Érdekes módon még a görbe alakja is kifejezetten hasonlít az empirikus görbékre. Tehát ismét azt mondhatjuk, hogy az egyetlen kommunikációs csatorna adataiból látható asszortatív viselkedés ténye az eredeti szociális hálózatra nézve nem tekinthető bizonyítéknak. Itt is megvizsgáltuk, vajon mi történik, ha csak a nagy affinitású nódusokat vizsgáljuk, illetve csak azokat, amelyek affinitása egy kis tartományba esik. Ekkor visszakapjuk a ER-gráfra jellemző konstans affinitást.

Összefoglalva, azt vizsgáltuk, hogy mennyiben különbözik az egyetlen kommunikációs csatornán megfigyelhető tulajdonság a teljes szociális hálózatra jellemzőtől. Mivel az utóbbiról nincs elég adatunk, ezért a problémát fordítva vizsgáltuk. Alapvető és egyszerű feltevésekből kiindulva próbáltuk leírni az emberek viselkedését a kommunikációs csatornák használata során, és a teljes szociális hálózatot leegyszerűsítve modelleztük. Azt kaptuk, hogy az egyetlen

csatornára szűkített mintavételezés torzítja az eredeti hálózat tulajdonságait, mégpedig a nagyszámú egy-csatornás megfigyelés által szolgáltatott eredmények irányába. Ez a jelenség olyan erős lehet, hogy új tulajdonságok jelenhetnek meg (monotonitás a fokszámeloszlásban), illetve erősödhetnek fel (fetételezhetően az asszortativitás esetében). A torzítás arra vezethető vissza, hogy egy csatorna használatánál nagy súllyal szerepelnek olyanok, akiknek az nem fő kommunikációs eszközük, és így az ő hálózatuk csak töredékesen jelentkezik. Ezt igazolták azok az empirikus adatokon és a modellen is végzett mérések, amelyek az „érett” felhasználók esetében a torzítások csökkenését mutatták. Megjegyezzük, hogy itt csak a modell leegyszerűsített változatát ismertettük. Részletesebb vizsgálatok bebizonyították, hogy az említett torzítások függetlenek a modell részleteitől.

Az eredményeknek fontos tanulságuk van a kutatók és a felhasználók számára is. A kutatóknak az, hogy ha csak egyetlen csatorna információi állnak rendelkezésükre, akkor az eredmények a teljes szociális hálózat tulajdonságaira nézve félvezetők lehetnek, és a felhasználókat jobban közelíti, ha csupán a nagy affinitású („érett”) egyéneket veszik figyelembe. A felhasználóknak pedig tudniuk kell, hogy minél intenzívebben használ valaki egyfajta szolgáltatást, róla annál többet lehet tudni, hiszen kapcsolati hálójának annál nagyobb része válik elérhetővé.

Irodalom

1. Barabási A.-L.: *Villanások: A jövő kiszámítható.* (ford.: Kepes J.) Libri Könyvkiadó, Budapest (2016) ISBN 9789633105139.
2. Staar Gy.: Gráflimesz, könyvek és család. Beszélgetés Lovász László matematikussal. *Természet Világa* 145 (2014) 530–535.
3. *A cambridge analytica botrány.* dátum: 2018. május 29., https://index.hu/aktak/a_cambridge_analytica_botranyn
4. Barabási A.-L.: *Behálózva – A hálózatok új tudománya.* (ford.: Vicsek M.) Helikon Kiadó, Budapest (2013) ISBN 9789632272580.
5. J. Török, Y. Murase, H.-H. Jo, J. Kertész, K. Kaski: What Big Data tells: Sampling the social network by communication channels. *Physical Review E* 94 (2016) 052319.

SZERKEZETMEGHATÁROZÁS EGYETLEN, 100 FS-OS RÖNTGENIMPULZUSBÓL

Faigel Gyula

MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont, Szilárdtestfizikai Intézet

Az anyagok atomi, illetve molekuláris szintű szerkezetének ismerete nem csupán az anyagi tulajdonságok elméleti leírásához nélkülözhetetlen, de a modern technológiák (félvezető-, bio-, gyógyszeripari technológiák stb.) kifejlesztésében is alapvető jelentőségű. Ezért nem meglepő, hogy e területre napjainkban is jelentős erőforrásokat koncentrálnak. A szerkezetmeghatározás egyik legfontosabb eleme a sugárforrás. Ezek biztosítják a mérőnyalábot (ami

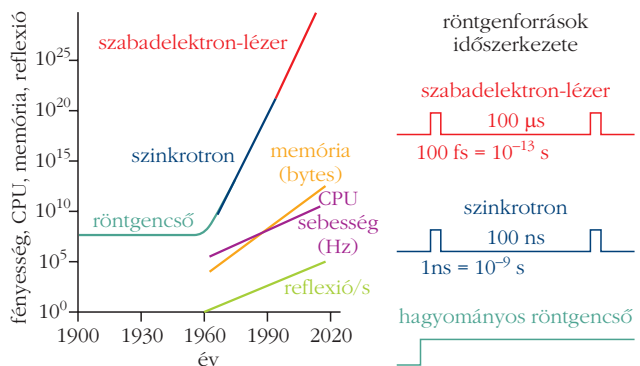
lehet elektron-, foton- vagy neutronnyaláb), amivel információt kaphatunk az anyagok mikroszerkezetéről. Bár a szerkezetmeghatározás alapelemeit több mint 100 éve felfedezték, és az alapvető módszereket megalkották, még ma is aktív kutatási terület az új szerkezetvizsgáló módszerek fejlesztése. Ehhez elsősorban az ad alapot, hogy a sugárforrások fejlődése teljesen új lehetőségeket nyit. A következőkben csak a röntgensugárforrásokkal foglalkozunk, bár megjé-

gyezzük, hogy az elektron- és neutronforrások is jelentős fejlődésen mentek keresztül. Az 1. ábra a röntgensugárforrások két legfontosabb paramétere, a fényesség és az időbeli lefutás változását mutatja az évek függvényében.

Látható, hogy az 50-es évek végén bekövetkező változás, a szinkrotron sugárforrások megjelenése, majd napjainkban a röntgen szabadelektron-lézerek (XFEL, X-ray Free Electron Laser) kifejlesztése, sok nagyságrendes (20 nagyságrend) fényességnövekedést eredményezett és a próbanyalábok időszerkezete a folytonosból a nagyon rövid impulzusok felé tolódott el.

A mérőnyalábok ilyen mértékű megváltozása teljesen új kísérleti elrendezések, sőt új elvekre épülő mérések kidolgozására ad lehetőséget. Ezek közül egyet mutatunk be részletesebben, amelyben a kutatók azt próbálták meg elérni, hogy egyetlen, nagyon rövid (100 fs , 10^{-13} másodperc hosszú) röntgenimpulzussal határozzák meg egy kis biológiai részecske szerkezetét. Mielőtt e mérés ismertetésére rátérnénk, röviden áttekintjük a hagyományos szerkezetmeghatározás menetét, hogy ezzel háttérrel (összehasonlítási alapot) adjunk az olvasónak.

Tradicionális módszerekkel az atomi szintű szerkezet meghatározása kristályokon lehetséges. Erre egykristály-, illetve pordiffrakciós méréseket használunk. Ezek lényege, hogy a periodikus rendben elhelyezkedő atomokról röntgensugarakat szórunk és a szórás kép térbeli eloszlásának elemzéséből következtethetünk a szerkezetre. A továbbiak szempontjából fontos kiemelni, hogy egy ilyen mérésnél a minta bemenő nyálábhoz való relatív orientációját változtatnunk kell, illetve a nagy szórt intenzitású irányok (tehát a detektálás iránya) is változnak. A gyakorlatban egy ilyen mérést úgy tudunk megvalósítani, hogy a minta és a detektor helyzetének függvényében sorban, egymás után vesszük fel az intenzitásokat. Egy-egy ilyen mérés hagyományos röntgenforrások esetén több órát, míg szinkrotron sugárforrások esetén néhány percet vesz igénybe. Mintánk ezalatt gyakran jelentős sugárkárosodást szenvedhet (ami esetleg lehetetlen is teszi a szerkezetmeghatározást). Minél kisebb a minta a sugárkárosodás mértéke annál nagyobb. Ugyanakkor a modern technológiák számára érdekes anyagokból olyan méretű egykristályokat előállítani, amelyeken a röntgendiffrakciós méréseket sikeresen el tudjuk végezni, gyakran nehéz. Számos esetben nem tudunk kristályt növesztetni, hiszen



1. ábra. A bal oldali grafikon a röntgenforrások fényességének időbeli változását mutatja az évek függvényében. Sokszor idézik a Moore-törvényt, amely a számítógépek teljesítménynövekedését írja le. Összehasonlításképpen ugyanezen grafikonon ábrázoltuk a számítógépek CPU-jának sebességváltozását, illetve a tipikus memória-méretet. Látható, hogy a röntgenforrások teljesítménye még gyorsabban növekedett, mint a számítógépeké. Ezeken túl egyetlen diffrakciós csúcs tipikus mérési idejét is feltüntettük. A jobb oldalon a különböző röntgenforrások jellegzetes időszerkezete látható.

egyetlen molekula vagy egyedi atomcsoport szerkezetét kellene meghatározni. Egy ilyen kis mintán a tradicionális, statikus diffrakciós mérést nem lehet sikeresen elvégezni. Ennek oka, hogy a rugalmatlan folyamatok valószínűsége általában nagyobb, mint a rugalmasoké. A rugalmatlan folyamatok eredményeként a mérendő anyag energiát vesz fel a mérőnyalábból, és ettől szerkezete megváltozik, a minta lényegében szétesik (szétrobban). Információt a rugalmas szórás ad a szerkezetről, de mielőtt még elég információt gyűjtenénk, a minta tönkremegy. Ezért nem meglepő, hogy az ilyen egyedi részecskékre vonatkozó szerkezetmeghatározás fel sem merült a szerkezetvizsgálat első 100 évében. A 2000-es évek elején születtek meg azon lehetőségek, illetve ötletek – először elvi szinten –, amelyek mára már néhány, a gyakorlatban végrehajtott kísérlethez vezettek. Az áttörést a szabadelektron-lézerek felfedezése, majd megépítésük jelentette. Tehát a lehetőséget a legújabb röntgensugárforrások a szabadelektron-lézerek (X-ray Free Electron Laser, XFEL) adták. Miért? Ahogy az első ábra mutatja, e források nagyon rövid (10^{-13} másodperc), ugyanakkor nagyon intenzív (10^{12} foton/impulzus) impulzusokban nyújtják a próbanyalábot. Ezt R. Neutze és társai javaslata alapján [1], úgy lehet kihasználni, hogy a rugalmas szórás kísérletet olyan gyorsan végezzük el, amely idő alatt az atomok nem tudnak számottevően elmozdulni. Persze a kísérlet végére a minta szétrobban, de addigra a rugalmasan szórt fotonok detektálását már régen befejeztük. Ez egyszerűen hangzik, de a gyakorlati kivitelezés sok technikai és elvi probléma megoldását tette szükségessé. Itt csak egy, az ismertetendő kísérlettel kapcsolatban releváns nehézséget emelünk ki. Viszszagondolva a tradicionális diffrakciós kísérletekről írottakra, világos, hogy a gyors méréseknél sem kerülhetjük el, hogy a mintáról különböző orientációkban vegyünk fel szórásképeket, ezek összességéből – elég bonyolult számolási eljárások után – kaphatjuk meg a szerkezetet. Azonban a gyors mérésnél a min-



Faigel Gyula fizikus, akadémikus, az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont Szilárdtestfizikai és Optikai Intézetének kutatóprofesszora. Kutatási területe a tradicionális röntgendiffrakció és röntgensugárzáson alapuló mérési eljárások fejlesztése. Ezen a területen nem csak a laboratóriumi röntgenforrásokon alapuló méréseket, hanem a szinkrotronoknál és röntgen szabadelektron-lézereknél végezhető technikák kifejlesztésében is részt vesz.

tánk egy adott állásban való szóráskepfelvétele után széttobban. Tehát ugyanarról a mintáról nem tudunk több ezer szóráskepet felvenni. Ezt úgy oldhatjuk meg, hogy sok millió ugyanolyan mintát készítünk és ezeket sorban egymás után lőjük be a mérőnyalábra. Például egy vírus esetén, ha tudunk ilyen „tenyésztést” csinálni, ez elvileg végrehajtható. A vírusokat oldatba vée, és azt egy nagyon vékony speciális fűvőkával a röntgennyalábra spriccelve elérhetjük, hogy a nagyon rövid impulzus idején is legyen néha egy-egy vírus a nyalábrban. Ilyen mintabevétel mellett azonban a vírus orientációja (a próbanyalábrhoz és a detektálási irányhoz viszonyított helyzet) ismeretlen, ami nagyban megnehezíti a kiértékelést. A kutatók speciális programokat fejlesztettek ki, amelyekkel a mért képekből mintegy visszafelé határozzák meg a minta méréskori orientációját. Ezek a kiértékelések nagyon számításgényesek és csak a mai legmodernebb számítógépekkel végezhetők. Tehát ilyen mérésekhez nemcsak modern röntgenforrásokra, hanem fejlett számítástechnikai háttérre is szükség van. Itt nem kívánjuk részletesen tárgyalni, de a harmadik fontos elem, ami még ilyen mérésekhez kell, a detektor. Sok millió dolláros projekteket indítottak megfelelő kétdimenziós, tehát egy felületen érzékeny, nagyon gyors detektorok kifejlesztésére.

Ha az eddig felsorolt három alapvető egység rendelkezésünkre áll, és már közel rutinszerűen tudunk a fent leírt módon szerkezetet meghatározni [2], akkor kezdetünk gondolkodni arról, lehetséges-e kikerülni azt a nehézséget, hogy sok millió azonos részecske növesztésével, s ezeken felvett sok ezer képből kapjuk meg a szerkezetet. Lehet-e egyetlen impulzusból is szerkezetet meghatározni. A következőkben egy erre irányuló érdekes próbálkozást mutatunk be.

Továbbvisszük azt az ötletet, hogy csak egy kis részecskét lővünk a nyalábrba és a rugalmas szórási képet széttobbanása előtt vesszük fel – a fentiekhez képest eddig semmi új nincs a mérésben. Azonban ezen túl egy második, úgynevezett referenciarészecskét adunk hozzá a szórási folyamathoz. E célból egy

egészen pici (néhány ezer atomos) közel gömb alakú részecskéket előállítani képes berendezést készítünk, és az így gyártott atomfűrtöket a vizsgálni kívánt vírussal együtt lőjük a próbanyalábrba. A kísérlet vázlatát a 2. ábra mutatja.

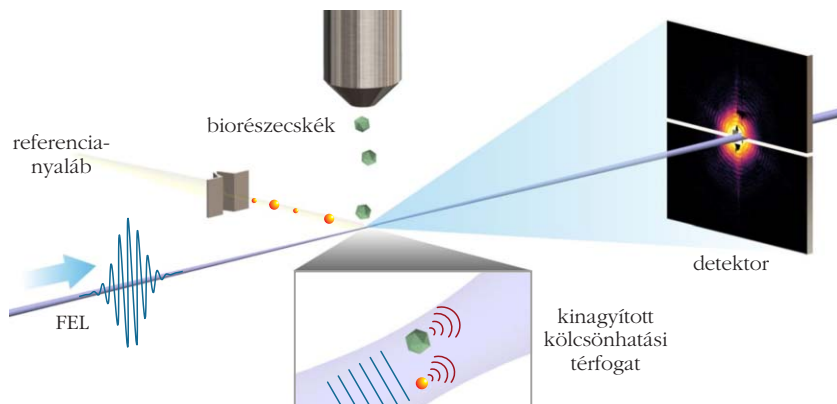
Miért lehet előnyös egy második részecske jelenléte? Az ötletet a holográfia adta. A holografikus leképezés lényege, hogy az ismeretlen tárgy által szórt nyalábrhoz egy ismert referencianyalábot keverünk. Ennek segítségével a mért interferenciaképből (annak intenzitásában) kódoljuk a szórt nyalábr fázisát, ami egy normál diffrakciós mérésben elvesz. Egy ilyen többletinformációval könnyebb a szerkezet rekonstrukciója, és egy kép is elég lehet a 3 dimenziós szerkezetmeghatározáshoz. Mérésünkben a belőtt ismert részecske által szórt sugárzás adja a referencianyalábot. Ez azt feltételezi, hogy ismerjük a referenciarészecske méretét, alakját és az ismeretlen mintához való relatív elhelyezkedését. A valóságban ezek egyike sem pontosan ismert. Még ha ezek ismertek lennének is, a tradicionális holografikus rekonstrukció végrehajthatóságához annak a feltételnek is teljesülnie kellene, hogy a minta által szórt nyalábr amplitúdója sokkal kisebb, mint a referencianyalábré. Ez a gyakorlatban nem áll fenn, hiszen referenciarészecskénknél a mintához képest kicsinek kell lennie, mert ennek mérete szabja meg a mérés térbeli felbontását. A fentiekből látható, hogy számos problémát kell megoldani ahhoz, hogy ez a mérés kiértékelhető legyen.

Kísérleti oldalról – többek között – azt, hogy két független részecskeforrásból egyszerre (10^{-15} másodperces pontossággal), egy nagyon kis térfogatba (kiseb, mint 1 fm^3) érkezzen a két részecske és a röntgenimpulzus. Ezen túl biztosítani kell, hogy a két szórt nyalábr interferenciájának eredményeképpen keletkező szóráskepet minél nagyobb térszögben és viszonylag nagy szögfelbontással (tehát igen sok pixelből álló kétdimenziós detektorral) rögzítsük. A nagy térszögre azért van szükség, hogy megfelelő 3D-s információt kaphassunk, a jó szögfelbontásra pedig azért, mert a referenciarészecske és a minta távolsága szabja meg a

mért intenzitás térbeli változásának tipikus frekvenciáját, mégpedig úgy, hogy a változás gyorsasága arányos a távolsággal. Mivel a gyakorlatban ez a távolság a részecskék méreténél sokkal nagyobb, ezért azok méretéből eredő tipikus térbeli frekvenciáknál sokkal nagyobb frekvenciájú változásokat is meg kell mérnünk. A számunkra érdekes részecskeméret (5–500 nm) és elérhető távolságok (10 fm nagyságrend) $10^4 \times 10^4$ pixeles detektorokat feltételeznek. Ezek jelenleg még nem állnak rendelkezésünkre.

Elméleti oldalról is számos probléma merül fel. Csak a legfontosabbakat említve: (i) hogyan pótoljuk a

2. ábra. Kétrészecske szórási kísérlet vázlata. A felső rész mutatja a mérési elrendezést. A balról érkező röntgennyalábrba lőjük a referenciarészecskét (vízszintes nyalábr) és a mérendő mintát (függőleges nyalábr). Jobb oldalon van a 2D helyzetérzékelő detektor. Az ábra alsó része a kinagyított kölcsönhatási térfogatot mutatja.



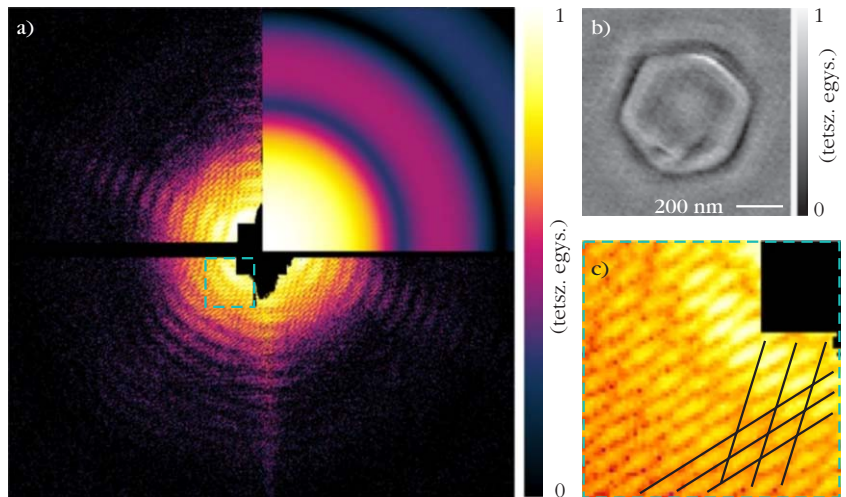
referenciárészecske nem ismert paramétereit; (ii) milyen módszert használjunk a térbeli kép megkapására, ha nem teljesül a tradicionális holografikus rekonstrukció feltétele (gyenge objektum, erős referenciahullám); (iii) hogyan kezeljük a kisdetektor-problémát (kiváltható-e, hogy a detektorunk csak $10^3 \times 10^3$ pixel, 100-szor kisebb mint amire szükség lenne)?

Látható, hogy sok probléma merül fel egy ilyen méréssel kapcsolatban. Azonban éppen ezért kell elkezdeni a kísérleteket, hogy tapasztalatot gyűjtsünk a problémák megoldásához.

A következőkben bemutatjuk, hogy mit láttunk az első ilyen mérés alkalmával [3]. A mért szórásképet a 3.a ábra mutatja.

A kapott kép megértéséhez modellszámolásokat végeztünk egy egyszerűsített rendszeren. Két kis gömb szórásképét számoltuk ki három elrendezés esetén. Ezt mutatja a 4. ábra.

A következő jellegzetességekre hívjuk fel a figyelmet: mindhárom kép egy közel hengerszimmetrikus, középről kifelé haladva oszcilláló intenzitású hátteret mutat. Ez alapvetően az egyrészecske-szórás kép. Erre rakódik a különböző geometriájú elrendezések hatása. A két egyforma részecske csak függőlegesen eltolva (4.a ábra) adja a legegyszerűbb képet, függőleges vonalak jelennek meg a képen. Ha az egyik részecske méretét megváltoztatjuk (4.b ábra), akkor az egyrészecske-szórás kép koncentrikus köreinek szerkezete változik, ami magával vonja a függőleges vonalrendszer változását is. Ha a két részecske nem csak függőlegesen, hanem a detektálás síkjára merőlegesen is el van tolva (4.c ábra), akkor a finom vonalrendszer egyenesből hajlottá válik. Ennek ismeretében, kvalitatívan érthetjük meg a mért szórásképet (3.a ábra). A kép csak közelít a hengerszimmetrikushoz, ezt mutatja a modellszámolás és mérés közötti hasonlóság az intenzitás középről kifelé való csökkenésével. A hengerszimmetriától való eltérés mutatja, hogy a részecske nem gömb alakú. Végül a kinagyított részen jól látható, hogy két finom vonalrendszer (gyors térbeli intenzitásoszcilláció) lép fel. Ez azt jelenti, hogy nem egy, hanem két referenciárészecskénk van. A részecskék elhelyezkedéséről és alakjáról pontosabb képet kapunk, ha vesszük a mérés 2D-s Fourier-transzformáltját. Megmutatható, hogy ez az elektronsűrűség vetületének autokorrelációs függvényét adja. Ezt mutatja az 5.a ábra. Ez az adott kísérleti feltételek mellett centroszimmetrikus és



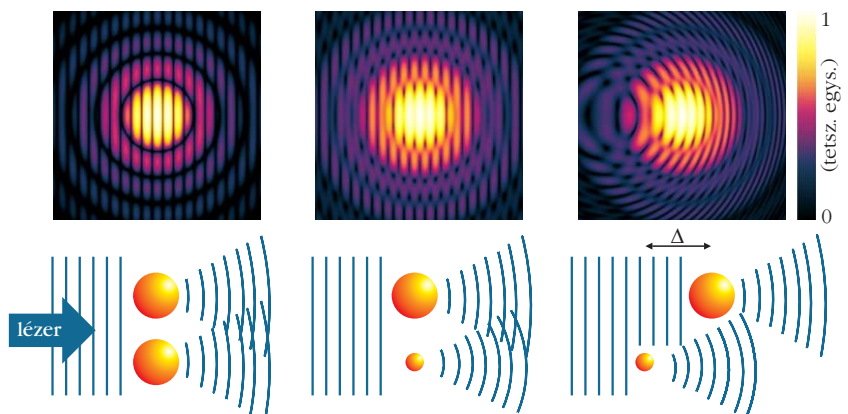
3. ábra. A bal oldali (a) ábra a mért szórási kép (a háttérlevonás és detektorérzékenységre való korrekció után). Az ábra jobb felső sarkában egy, a mintával körülbelül azonos nagyságú, gömbszerű részecske számolt intenzitáseloszlása fedti a mért képet. A jobb oldali alsó (c) ábra a mérés kinagyított részlete, míg a jobb oldali felső (b) ábra a minta rekonstruált 2D-s vetülete.

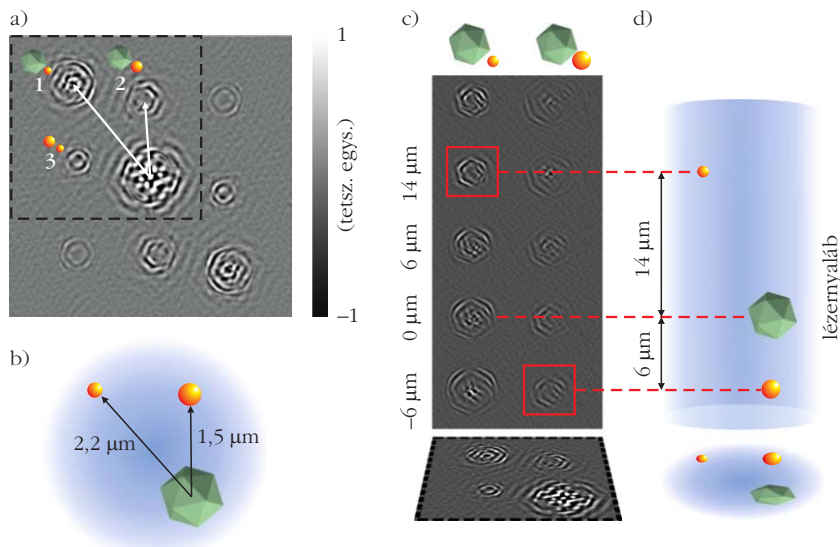
a bal oldali szaggatott vonallal bekeretezett rész mutatja, hogy melyik képrészlet minek felel meg. Az (1) jelölt rész a kis referenciárészecske és a minta korrelációs függvénye, a (2) rész a nagyobb referencia, a részecske és a minta korrelációs függvénye, a (3) rész pedig a két referenciárészecske korrelációs függvénye. Az 5.b ábra a három részecske vetületének egymáshoz képesti elhelyezkedését mutatja. A minta és a részecskék harmadik dimenzióban való helyzetét (a detektorsíkra merőleges távolságot), úgy kaphatjuk meg, hogy a mért képet egy, a 3. dimenzió szerinti távolságnak megfelelő fázisfaktorral megszorozva végezzük el a Fourier-transzformációt és a kapott eredményt így vizsgáljuk a távolság függvényében. Amikor eltaláljuk a referencia és minta közötti távolságot, akkor mintegy kiélesedik a kép, ezt mutatja az 5.c ábra. Az 5.d ábra pedig három részecske röntgennyalábbban elfoglalt helyzetét mutatja, amelyet az 5.c ábrából következtethetünk ki.



Összefoglalva látható, hogy a röntgen szabadelektoron-lézerek teljesen új utakat nyitnak a szerkezetkuta-

4. ábra. Két gömb alakú részecske szórási képe, a két gömb különböző nagysága és elhelyezkedése függvényében: (a) ábra, két egyforma gömb a detektor síkjától egyenlő távolságra, (b) ábra két különböző méretű gömb a detektor síkjától egyenlő távolságra, (c) ábra két különböző méretű gömb a detektor síkjától különböző távolságra.





5. ábra. (a) a részecskék elektronsűrűsége vetületének autokorrelációs függvénye, (b) a részecskék elhelyezkedése a röntgennyaláb keresztmetszetében, (c) a hosszirány különböző távolságaira a fázissal korrigált mérés Fourier-transzformáltja, (d) a részecskék elhelyezkedése a nyaláb hosszirányában.

tás területén. Erre az egy röntgenimpulzusban lévő nagyon sok foton és az impulzus nagyon rövid volta ad lehetőséget. A tradicionális diffrakciós mérések mellett megjelennek az egyedi, kis részecskéken (pél-

dául vírusokon) való szerkezetvizsgálati módszerek. Első lépésben az ilyen méréseket sorosan végezzük, azaz egymás után lövünk a nyalábba azonos mintákat és e mérések összességéből próbáljuk meghatározni a szerkezetet. A cikkben egy ennél még újabb próbálkozást mutattunk be, az egyetlen röntgenimpulzusból való szerkezetmeghatározást. Látható, hogy a jelenleg rendelkezésre álló technikai eszközökkel e mérések még nem adnak részletes 3D képet a mintáról, azonban az itt kidolgozott kiértékelési módszerek, illetve technikai eszközök kifejlesztése előre vetíti a sikeres mérés lehetőségét.

Irodalom

1. R. Neutze, R. Wouts, D. Van der Spoel, E. Weckert, J. Hajdu: Potential for biomolecular imaging with femtosecond X-ray pulses. *Nature* 406 (2000) 752–757.
2. M. M. Seibert et al.: Single mimivirus particles intercepted and imaged with an X-ray laser. *Nature* 470 (2011) 78–81.
3. T. Gorkhover et al.: Femtosecond X-ray Fourier holography imaging of free-flying nanoparticles. *Nature Photonics* 12 (2018) 150–153.

VÉLEMÉNYEK

ALVAJÁRUNK?

A lap hasábjain megjelent írások hatására újra elolvastam *Koestler Artúr* tudományról írt nagyszerű könyvét, az *Alvajárókat* [1]. Az alábbiak néhány szemponttal kiegészítik *Geszti Tamás* gondolatait és *Radnóti Katalin* remek ismertetőjét [2].

Koestler könyve kényelmetlen könyv a fizikusok és a fizikát szeretők számára. Az volt már megírásakor is és máig az. Azért kényelmetlen, mert Koestler tuda-

mánytörténetileg viszonylag alapos: megszámlolta *Kopernikusz* epiciklusait, elolvasta *Kepler* és *Galilei* leveleit és *Galilei* periratait is. Ezek a dokumentumok pedig nem egészen azt a képet mutatják, amit az egyetemes tudomány és kultúrtörténet ezen nagy embereiről tanultunk vagy gondoltunk. Koestler könyvében a tudomány hőseinek gyarlósága nagyon kézzelfogható.

A szerző szándéka persze nem a deheroizálás volt. Két dolgot vizsgált – és utána nem tudományos, hanem irodalmi eszközökkel épített koherens történetként mutatja be a válaszait. Első kérdése az volt, hogy szükségszerű volt-e a tudomány vallásmentesítése, amely *Galilei*nél kezdődött és a francia racionalistákkal végződött. Válasza az, hogy egyáltalán nem. Ha *Galilei* kezdetben nem haragítja magára a kopernikuszi rendszer iránt jóindulatú pápát és a teljes jezsuita rendet a kor legkiválóbb csillagászaival, akkor szerinte tudomány és vallás sokkal nagyobb barátságban kerül ki a kopernikuszi fordulatból. Meglátása szerint

Ván Péter

MTA Wigner FK, Részecske- és Magfizikai Intézet,
BME, Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék,
Montavid Termodinamikai Kutatócsoport



Ván Péter fizikus, az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont Részecske és Magfizikai Intézet Elméleti Fizikai Főosztályának és a BME Gépészmérnöki Kar Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszékének tudományos főmunkatársa. Kutatási területe a nemegyensúlyi termodinamika, illetve ehhez kapcsolódóan klasszikus kontinuumok, téridő, nehézion-fizika, gravitáció. Az utóbbi években ő koordinálja a Wigner FK Mátrai Gravitációs és Geofizikai Laboratóriumának kutatásait.

itt nem a „bigott” egyház volt a hunyó, hanem a zseniális vitakozó és tudománymenedzser Galilei, aki kigúnyolta a pápát és a korabeli élenjáró tudományt. Pedig azok csak annyit kértek tőle, hogy olyat állítson, amit be is tud bizonyítani. Galileinek ugyanis nem volt egyértelmű bizonyítéka arra, hogy a Földrendszer helyett Naprendszerben kell gondolkozni. Erre vonatkozóan élete végére dolgozta ki legjobb érvét, az árapályelméletet, az viszont hibás. Mindemellett pedig Galilei saját érdekeit – nem az igazságot – sok esetben gátlástalanul érvényesítette, egyáltalán nem volt egy rokonszenves egyéniség.

Ez pedig Koestler második vizsgált kérdéséhez kapcsolódik. Mi a tudós személyiségének szerepe a tudományban? Ebben az ügyben *Polányi Mihály*hoz, barátjához és eszmetársához csatlakozik, aki a tudományos módszer helyett a személyes aspektusok szerepére alapozta ismeretelméletét. Koestler könyve bizonyos értelemben e tudományfilozófiai gondolatkör történeti alátámasztása, vagy legalábbis reflexiója. Nem kellemes belegondolni, hogy esetleg az a fajta önzés, agresszivitás, excentricitás és megszállottság amely Kopernikust, Galileit, *Tycho Brachét* vagy Keplert jellemezte mennyire volt szükséges feltétele úttörő tudományos eredményeknek, vagy máig tartó hírnevüknek.

A magyar kiadáshoz tanulságos előszót író *Csányi Vilmos* a könyv legfontosabb gondolataként azt emeli ki, hogy a tudomány építőkövei a valóság modelljei. Ezért a tudományos igazság szükségszerűen relatív, mindig van érvényességi köre, még ha sokszor nem is ismerjük pontosan a határait. Ez a gondolat itt egyúttal egyfajta elhatárolódáshoz segíti az olvasót: ezt ma már jobban tudjuk, érdekes ez a történet, de nem fontos – gondolhatjuk. A fizika a lényeg, azt pedig mi már jobban ismerjük.

Ezt a könyvet szerintem minden tudományszerető embernek el kell olvasnia. Nem feltétlenül a súlyosan érdekes régi történetek, vagy az igazabb igazság miatt. A könyvben számomra az a megdöbbentő, hogy az emberibb történetek sokkal lelkesítőbbek és tanulságosabbak a ma fizikusa számára, mint a leegyszerűsített legendák. Elgondolkodtatók például az alábbi kérdések:

1) Azonnal az alkalmazhatóságot, a gyakorlati hasznát kell keresnünk tudományban?

„A káldeusok megfigyelései bámulatosan pontosak voltak; az év hosszát 0,001 százalékos hibával állapították meg, s a Nap és a Hold mozgására vonatkozó méréseik hibája csupán háromszorosa volt a mamutteleszkópokkal felszerelt tizenkilencedik századi csillagászok mérési pontatlanságának. E tekintetben övék volt tehát az Egzakt Tudomány; megfigyeléseik hitelesek voltak, és segítségükkel képesek voltak előre jelezni a csillagászati eseményeket – az elmélet működött.” Olvashatjuk a könyv 25. oldalán. A kopernikusi fordulatban vajmi kevés szerepe volt bármilyen alkalmazhatóságnak.

Ki hallott például *Isocrates* híres iskolájáról az ókori Athénban? Ez az iskola azt hirdette, hogy pontos gyakorlati ismereteket ad a jövő politikusainak, jogászai-

nak, építőmestereinek ezért érdemes ott tanulni. Nem foglalkozott olyan értelmetlen haszontalanságokkal, hogy mi a szépség, az igazság, vagy a helyes gondolkodás. Ezekről a város egy másik, rivális iskolájában lehetett tanulni. Ott a mestert *Platónnak* hívták... [4]

2) Mi is a tudományos teljesítmény, a hatás jó mérceje?

Kopernikusz kalandosan megjelent könyvét – *De Revolutionibus Orbium Coelestium* (Az égi pályák körforgásáról) – a kortársak elutasították, mert semmilyen alaposabb tudományos elemzést nem áll ki, olvashatatlan, kusza, hibás és ellentmondásos. Később is olvasatlan maradt: négyszáz év alatt 4-szer adták ki és első angol fordítása 1952-ben jelent meg. Ugyanakkor a *Ptolemaiosz Almagesztje* (Nagy Könyv) és a rendszerét ismertető másik három korabeli mű az 16. század végéig összesen száz kiadást ért meg. Ugyanis Kopernikusz rendszere nem heliocentrikus, hanem vákuumcentrikus: a bolygópályáknak még a síkja sem megy át a Napon. Az ep ciklusok számát nem csökkenti, hanem növeli. Mindez azért, mert sem gondolatilag, sem technikailag nem tudott elszakadni a körpályákban megtestesülő tökéletesség eszméjétől. Mégis, mindennek ellenére, övé volt az igazság, vagy legalábbis a nagyobbik része. Kik voltak akkoriban, akik ezt át tudták látni?

Tanulságos például egy *Osiander* nevű csillagász levele: „A könyvben az elméletek esetén nem hitről, és igazságról van szó, hanem a számítások megalapozottságáról, s egészen közömbös, hogy igazak-e vagy hamisak, ha a látható valóságot pontosan ábrázolják.” [1, 227. o.] Kopernikusz könyvének első kiadásához feltehetően ő írta az előszót, amelyben azt fejtegeti, hogy mennyire valószínűtlenek a könyvben kifejtett hipotézisek és mennyire hihetetlenek a kapott számítások eredményei.

Nekünk már könnyű. Mi már TUDJUK, hogy a bolygók ellipszispályákon keringenek, hátrább tessékeltük, és megváltoztattuk a szépség és a tökéletesség hajdani eszméit. De vajon tudásunk mely része igaz? Miről ismerjük fel, hogyan döntjük el egyáltalán, hogy mi fontos? Pedig minden tudományok közül talán a fizikában a legkönnyebb a dolgunk. Elgondolkozhatunk arról is, hogy vajon miféle hatáshoz vagy hivatkozottsághoz van ennek köze?

3) Milyen személyes feltételei vannak a fontos tudományos eredményeknek? Melyik képességünket fejlesszük, mire törekedjünk?

Talán a nagy ötlet a fontos? Kopernikusz eszméit a régi görögök is tudták és Kopernikusz is tudta, hogy a görögök tudták...

Vagy marketing és gyakorlati érzék, erőforrás és pénz? A hiú, féltékeny és önelégült Galilei, aki tökélyre fejlesztette a vitakozást és megalkotta a tudományos nyelvet, és ellenfelei nevetségessé tételét fontosabbnak tartotta a kutatásnál? Amikor holland minta alapján elkészítette saját távcsövét, néhány héten belül már a velencei szenátusnak a Szent Márk toronyból mutogatta, és utána levélben fejtegette, hogy milyen nagy szolgálatot tenne a városnak a tá-

madó hadihajók gyors észlelésében, ... a hálás szenátus pedig megduplázta Galilei fizetését.

Talán a minél részletesebb szaktudás és pontos vízió? A hatalmas tudású Kepler vérbeli misztikus, gondolatait a szférák zenéje motiválta és rejtély, hogy fő művéből, a *Harmonia Mundiból* (*A világ harmóniái*) Newton hogyan hámozta ki a Mars pályájának adatait...

Mindebből kié lesz végül a dicsőség? Tudni kell, hogy Newton első törvényét az egyenesvonalú egyenletes mozgásról feltehetően Descartes fogalmazta meg először és Galileinek semmiképpen nincs köze hozzá, ő azt állította, hogy a testek természetük szerint köröskörösen mozognak.

Valahogy az a lelkesítő, hogy a tudománytörténet legnagyobb génuszai egyáltalán nem csillagokkalivilágított sugárúton haladtak a számukra elrendeltetett örökkévaló dicsőség és elismerés felé. Pontosan nem tudom megmondani, miért is lelkesít ez. Talán azért, mert akkor mindenki számára van esély: a gondolati akadályok, az ellipszispályák meglátása sokszor a véletlen, a megfelelő előismeretek kombinációján és a nyitott elmén múlik. Vagy talán azért, mert azt mutatja, hogy a mai nagy elméleteink, modelljeink sem biztos, hogy tökéletesek – javítgatjuk, toldozgatjuk őket egyre újabb körökkel, körös-körül. Csak a középpontot kell meglátni valahogy...

Az *Alvajárók* megosztó könyv. Kétféle szélsőséges elfogultsággal olvasva is értelmes. Egyrészt hihetjük

azt, hogy tanulunk a múltból és manapság, az ipari tudomány és a tiszta módszertan által termelt veretes igazságok korában nem kell tartanunk a kézművestermékek hibáitól. Másrészt azt is kiolvashatjuk belőle, hogy az epiciklusokhoz hasonló méretes zsákutcák léte a mai tudományban sem kérdés, folyamatosan termeljük őket, és ráadásul látásunk és módszerünk sincs ez ellen.

Természetesen Koestler második kérdésének gyakorlati hasznosítása is érdekelhet bennünket. Ifjú tudósként gondolkodhatunk azon, hogy fontos tudományos eredmények eléréséhez milyenné kell válnunk, mi a jó személyes stratégia. Ez esetben ne feledjük, hogy Koestler tanulsága csak egy nem túl fontos alapálláspont, csak egy kezdeti feltétel lehet bármely életpályához. Nem szabad figyelmen kívül hagynunk, hogy vannak a fizikától független, általánosabb igazságok:

„Nem az jut legmesszebbre az úton, aki a leggyorsabb vagy a legszívósabb, hanem aki nem hagyja abba a járást.” – ahogy egyik kedvenc mesekönyvem írta... [5].

Irodalom

1. Athur Koestler: *Alvajárók*. (ford. Makovecz Benjamin) Európa, Budapest 1996 (eredeti címe: *The Sleepwalkers*, 1959)
2. Geszti Tamás: Galileiről, fél évszázaddal Koestler után. *Fizikai Szemle* 56/12 (2016) 431.; Radnóti Katalin: Arthur Koestler: *Alvajárók*. *Fizikai Szemle* 57/3 (2017) 105–107.
3. Polányi Mihály: *Személyes tudás*. Atlantisz, Budapest, 1994.
4. Carlo Rovelli: *Physics Needs Philosophy. Philosophy Needs Physics*. *Foundations of Physics* 48 (2018) 481–491.
5. Jane Goldenlane: *Napnak fénye*. Delta Vision, Budapest, 2015.

A FIZIKA TANÍTÁSA

MIÉRT TUDJA KIMUTATNI A LIGO A GRAVITÁCIÓS HULLÁMOT?

Bokor Nándor
BME Fizika Tanszék

A tréfás istenség és a táguló Univerzum

Képzeljünk el egy játékos kedvű istenséget, aki kívülről figyeli világunkat, és elhatározza, hogy megtréfál bennünket: egyszer csak az egész emberi világ méretét – az összes objektumot és a köztük levő távolságokat – varázsütésre százszorosára tágitja. (Szigorúan véve nem idézhető elő olyan pillanatszerű változás, amely az egész világon mindenhol abszolút értelemben egyidejűleg következik be, hiszen az egyidejűségnek nincsen abszolút jelentése, de most ne hagyjuk, hogy ez megzavarja a töprengésünket.) Észrevennénk-e világunk hirtelen méretnövekedését, ha a hossz mérésére csak hagyományos műszerek – méterrudak, vonalzők, mérőszalagok – állnának rendelkezésre? Úgy tűnik, hogy nem vennénk észre, hiszen

mérőeszközeink is a világ egészével együtt arányosan változtatnák (az istenség nézőpontjából) méretüket. Külső, isteni nézőpont híján nem szereznénk tudomást arról, hogy itt bármi történt.

Az Univerzum, isteni tréfától függetlenül, *ténylegesen* tágul. Ezt a tágulást éppen azért tudjuk értelmezni és kimutatni, mert nem minden méret növekszik. Ami tágul, az a mérőeszközeinkben távolságetalonként használt hosszegységhez *képest* teszi. Csillagászati mértékű távolságok mérése technológiai, sőt fogalmi nehézségekkel is jár, hiszen ilyenkor egymás mellé fektetett méterrudakat már nem használhatunk, és nem magától értetődő, hogy egyáltalán mit érthetünk távolság alatt [1], de ha eltekintünk az ilyen fogalmi problémáktól, akkor leegyszerűsítve azt mondhatjuk, hogy a tapasztalatok szerint, „métrerúdjaink-

hoz képest” nem növekszik például a Naprendszer vagy a galaxisok mérete, növekszik viszont a galaxisok egymás közötti átlagos távolsága, és hasonló ütemben növekszik az Univerzumot kitöltő kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás (Cosmic Microwave Background – CMB) karakterisztikus hullámhossza. Az 1. ábra vázlatosan mutatja a galaxisok méretére és távolságára, illetve a CMB-re vonatkozó tapasztalatokat.

Fontos észrevenni, hogy a CMB elektromágneses hullámát értelmellen lenne „mértérűdként” használni 2-2 galaxis távolságának mérésére. Ha távolságukat úgy jellemeznénk, hogy leszámolnánk, hány hullámhossznyi CMB fény „fér be” közéjük, akkor úgy járnánk, mint akiket megréft az első bekezdésben szereplő istenség. Az adott galaxisok közé befért hullámhosszak száma – mint az 1. ábrán látható – a tágulás közben nem változik.

Hosszváltozás mérése Michelson-interferométerrel sík téridőben

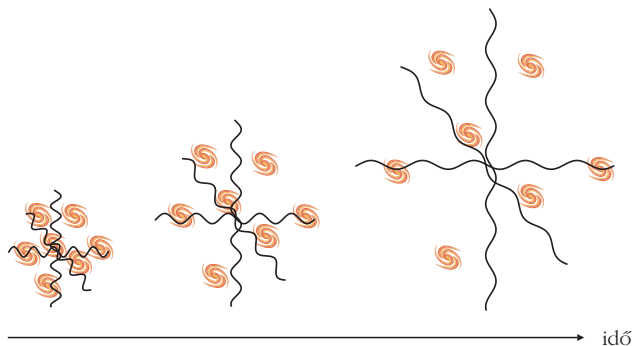
Miért vall kudarcot a kozmikus háttérsugárzás a méterrúd szerepében? Alapvetően nem a CMB fény jellegével van a baj. Fényhullámokkal igenis lehet távolságváltozást mérni. Nézzük például, hogyan tudunk (kisebb, laboratóriumi léptékű) hosszváltozást kimutatni egy lézeres Michelson-interferométer segítségével. A gondolatkísérlet sík téridőben zajlik.

A 2. ábra a Michelson-interferométer vázlatos rajza. Az L lézer hullámhosszát a jobb áttekinthetőség kedvéért – nem realizisztikus módon – olyan nagynak választottam, hogy a nyalábosztó (beamsplitter – BS) és az x és y karokban elhelyezkedő tükrök (M_x és M_y) közé csupán 4 hullámhossznyi fényhullám fér. Szintén a jobb áttekinthetőséget szolgálja, hogy az ábrán a tükrök egyszerűen csak visszafordítják a fényhullámot (eltelkintettem attól, hogy a tükrökön és a nyalábosztón reflexiókor fázisugrást szenved a fény). A két kar egyenlő hosszúnak választottam, ekkor az S ernyőn erősítő interferencia figyelhető meg. Az ábrán két merev rúd is látható, ellenőrzésképpen ezekkel is lemérhetjük a karok hosszát. (A merev rúd definíció

Köszönetemet fejezem ki Horváth Anna harmadéves fizikus hallgatónak (BME TTK) az oktatásban nagyon jól használható Matlab-program elkészítéséért, amely egy gravitációs hullám által megbolygatott Michelson-interferométer két karjában terjedő fényhullámok, illetve interferenciaképük időbeli viselkedését szemlélteti [4].



Bokor Nándor egyetemi docens a BME-n szerzett villamosmérnök-diplomát 1993-ban, majd ugyanott fizikából PhD fokozatot 1999-ben. Munkájában – az optika számos területén végzett kutatásai mellett – legszívesebben a fizika, azon belül kiemelten a relativitáselmélet oktatásának pedagógiai kérdéseivel foglalkozik. Ez utóbbi témában számos publikációja jelent meg a *Fizikai Szemle*ben, valamint a *Physics Education* és a *European Journal of Physics* folyóiratokban.

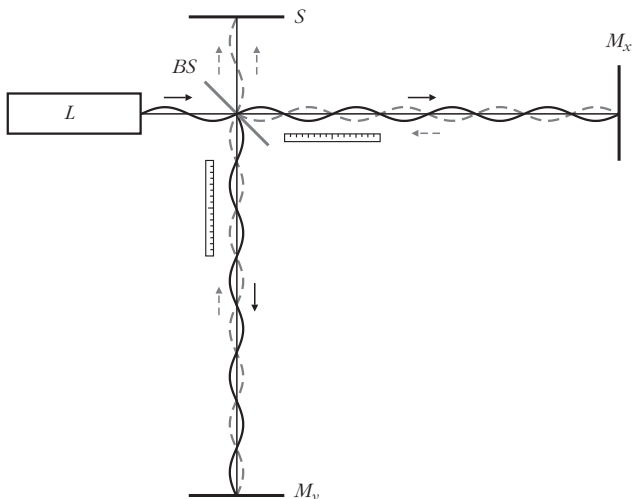


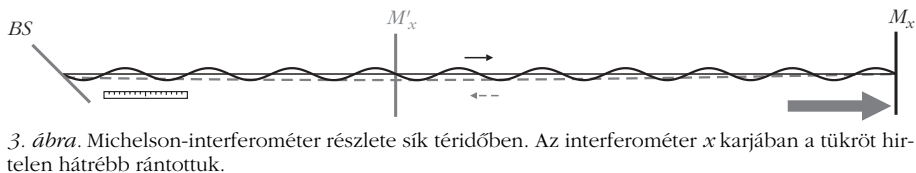
1. ábra. A táguló Univerzum vázlatos ábrázolása. A galaxisok távolsága és a kozmikus háttérsugárzás (CMB) hullámhossza nő. Távolságméréshez a CMB fényhullámát nem használhatjuk hossz-etalonként.

szerint olyan test, amelynek a részecskéi közötti nagy kohéziós erő ellenáll bármilyen külső hatásnak, amely a rudat összenyomná vagy széthúzná.)

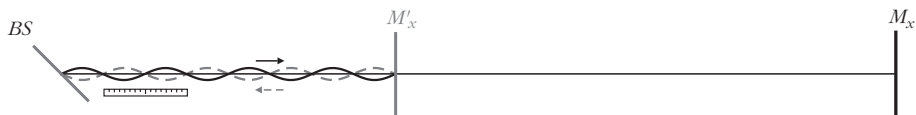
Képzeljük most el, hogy az interferométer egyik karjának hosszát hirtelen megnöveljük. (Azért választottam ezt a példát, mert az ilyen lépésfüggvényyszerűen hirtelen változás – matematikai egyszerűsége miatt – hasznos lesz majd, amikor a gravitációs hullám problémáját fogom elemezni [2].) „Hirtelen” változás alatt érthetjük például azt, hogy az M_x tükröt a lehető leggyorsabban hátrébb rántjuk. Tegyük fel, hogy a tükrő tetszőlegesen nagy gyorsulásokat is kibír, és fénysebességhez közeli sebességgel hátrébb tudjuk rántani. A hátramozdított tükrő megállítása utáni pillanatot mutatja a 3. ábra. Az ábrán a konkrét szám adatok kedvéért $v = 12/13 c$ sebességgel húztam el a tükröt, és a kart 2,5-szeresére nyújtottam. A nyalábosztó felől a tükrő felé haladó hullám – amely mindvégig gyorsabban haladt jobbra, mint a tükrő – változatlan hullámhosszal tölti ki a nyalábosztó és a tükrő közötti térrészt. A szaggatott vonallal jelölt visszavert hullám a tükrő mozgása alatt Doppler-eltolódást szenvedett, hullámhossza az ábrán látható módon jelentősen (25-szörösére) megnyúlt. Ezt a rövid ideig tartó Doppler-szakaszt leszámítva a kart oda-

2. ábra. Michelson-interferométer.





3. ábra. Michelson-interferométer részlete sík téridőben. Az interferométer x karjában a tükröt hirtelen hátrébb rántottuk.



4. ábra. Michelson-interferométer részlete sík téridőben. Az interferométer x karjának a hosszát lépésfüggvényyszerűen megnöveltük.

vissza irányban az eredeti hullámhosszú fény tölti ki. A kar hossza most már nem 4, hanem 10 hullámhossznyi. Ezt akár a merev mérőrúddal is lemérhetjük, de úgy is, hogy leszámoljuk, mennyi hullám fér most be a nyálábosztó és a tükrö közé. (Praktikus esetben az interferenciakép változásának nyomonkövetésével következtetünk a tükrök elmozdulására.)

Van lehetőségünk arra is, hogy az interferométer x karját igazán pillanatszerűen, valóban lépésfüggvény szerint növeljük meg. Ez úgy történhet, hogy az eltervezett távolabbi helyre előre odakészítünk egy másik, M'_x tükröt, és az eredeti tükröt az adott pillanatban hirtelen merőlegesen kirántjuk a helyéről. Az M_x tükrö kirántása utáni pillanatot mutatja a 4. ábra.

Az M_x és M'_x közötti térrész most üres, mert oda a jobbra haladó hullámnak még nem volt ideje behatolni. Az ernyő detektorjelét elemezve azt tapasztaljuk, hogy lesz egy nagyon rövid időszakasz, amíg az interferenciakép eltűnik, majd hirtelen újra megjelenik, de az új interferenciakép már a megváltozott x karhossznak felel meg.

Ha valahogyan megoldható lenne, hogy ne csak az interferenciaképet lássuk, hanem közvetlenül az egyes fénycsoportokat is, akkor csak a nyálábosztó felől érkező fényre lenne szükségünk. Elég lenne egyszerűen leszámolni, hány λ -nyi hullám fér rá az adott távolságra. Mivel ezen fény hullámhosszát nem „bolygattuk meg”, éppen olyan jó hosszatalon, mint egy mérőrúd.

A gravitációs hullám

A gravitációs hullám a „téridő lüktetése”, olyan téridőgörbület, amely a forrásától kiindulva fénysebességgel terjed, és az útjába eső testekben árapály-feszültségeket hoz létre (megnyújtja, összenyomja őket). Első közvetlen észlelésére 2015-ben került sor a LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) rendszer két, egymástól körülbelül 3000 km távolságra levő Michelson-interferométerével, a forrás pedig két többszörös Nap-tömegű fekete lyuk egymás körül keringése, majd egyesülése volt. A tudományos eredmény két szempontból is óriási jelentőségű: egyrészt ez volt az első olyan kísérlet, amely nem gyenge térben, hanem fekete lyukak közelében, tehát erősen görbült téridőtartományban

lezajló folyamatokra kvantitativan tesztelte az általános relativitáselmélet pontosságát, másrészt – és ez talán még jelentősebb – a LIGO és más, hasonló megfigyelőeszközök a szokványos optikai, rádió- és egyéb távcsövekhez képest egészen másfajta, eddig hozzáférhetetlen információkat fognak szolgáltatni a csillagászati objektumokkal lezajló folyamatokról.

A LIGO elvi alapja, egyszerűsített megfogalmazásban: ha egy olyan lézeres interferométert építünk, amelynek tükröi nincsenek az apparátushoz lerögzítve, hanem szabad tömegpontként, erőmentesen lebegnek a térben, akkor ezek a tükrök „követik a téridő lüktetését”. Ha például egy gravitációs hullám halad át a berendezésen, akkor a tükrök elmozdulnak, ezzel megváltozik az interferométer karjainak hossza, és ezt a hosszváltozást az interferométer kitért fény segítségével (az interferenciakép változását követve) ki tudjuk mutatni.

Megjegyzések

1. Ha precíz akarunk lenni, az előző bekezdés nem a LIGO, hanem a LISA (Laser Interferometer Space Antenna) működési elvét fogalmazza meg, amelynek tükröi – és az egész interferométer – valóban szabadon lebegve keringenek majd a Nap körül a világűrben. A LIGO a Földön nyugszik, tehát a tükröit muszáj felfüggeszteni (ha elvágna a felfüggesztő huzalt, akkor nekicsapódnának a talajnak). Azonban a LIGO munkatársai a felfüggesztés gondos megtervezésével elérték, hogy a tükrök mozgása az *interferométer síkjában* szabadnak, kényszermentesnek tekinthető. Tehát, ha a gravitációs hullám ebben a síkban „tágítja, illetve húzza össze a teret”, akkor ezt a tértágulást-szűkülést a tükrök követni tudják.

2. Két bekezdéssel feljebb készakarva nem foglaltam gondosan. Mit jelent az, hogy a tükrök „elmozdulnak” (mihez képest mozognak el?), milyen értelemben változik az interferométer-karok „hossza”? Végül: hogyan tudnánk éppen fénycsoportot használni e „hosszváltozás” kimutatására? Az elnagyolt fogalmazással az volt a célom, hogy kicsit elbizonytalanítsam, és ezzel a cikk címében feltett kérdés felé tereljem az olvasót.

Hasonlóság a táguló Univerzum és a gravitációs hullám között

Néhány zavarba ejtő hasonlóságot fedezhetünk fel a táguló Univerzum (1. ábra) és a gravitációs hullám által megbolygatott Michelson-interferométer között. Nézzük meg kicsit részletesebben mindkét jelenséget! A táguló Univerzumot a Friedman–Robertson–Walker-metrika írja le:

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + a^2(t)(dx^2 + dy^2 + dz^2). \quad (1)$$

(A metrika a téridő geometriáját leíró egyenlet. A bal oldalán álló ds fizikailag is mérhető mennyiség, két közeli esemény „téridőbeli távolsága”, az úgynevezett téridő-intervallum. A téridőt bekoordinátázzuk, azaz az eseményeknek koordinátaértékeket adunk. Az egyenlet jobb oldalán szereplő koordinátadifferenciálok ezen önkényes koordináta-rendszer-választás eredményei. A koordinátadifferenciálok együtthatói az úgynevezett metrikus tenzor elemei, ezekből meg lehet határozni a téridő görbültségét az adott eseményben.)

Az Univerzum tágulása közben a galaxisok szabad „tömegpontoknak” tekinthetők, amelyek erőmentes, geodetikus világvonalat követnek. (Ugyanazt a szerepet töltik be, mint a gravitációs hullám által megbolygatott interferométerben a szabadon lebegő tükrök.) Az (1) metrika jobb oldalán szereplő (x, y, z, t) koordináta-rendszert úgy választottuk meg, hogy a szabadon lebegő tömegpontnak tekintett galaxisok $x = \text{áll.}$, $y = \text{áll.}$, $z = \text{áll.}$ koordinátákkal rendelkeznek, azaz az (x, y, z) koordináta-rendszerben leírva nyugalomban vannak, egy adott galaxis „karórája” (sajátideje) pedig a galaxis t koordinátáját mutatja. A jobb oldalon szereplő $a(t)$ az Univerzum tágulását leíró tényező; az egyenlet szerint ez mondja meg, hogy például adott $t = t_0$ esetén mekkora Δs tényleges (ideálisan merevnek képzelt méterrudakkal elvben lemérhető) távolság van két olyan galaxis között, amelyek azonos y és z koordinátájúak, de x koordinátájuk különbözik:

$$\Delta s = a(t_0) \Delta x. \quad (2)$$

Vessük össze az (1) Friedman–Robertson–Walker-metrikát egy olyan gravitációs hullám metrikájával, amely z irányban terjed, az x és y irányú hatása pedig egymással ellentétes. (A gravitációs hullámok legegyszerűbb változata az úgynevezett kvadrupólsugárzás, ami azt jelenti, hogy a gravitációs hullám áthaladása során soha nem növekedhet meg az x kar hossza anélkül, hogy az y kar hossza ezzel együtt ne csökkenjen. A 3. ábrán a sík téridőbeli analógia úgy lenne teljes, ha a Michelson-interferométer M_x tükrének gyors elhúzásával együtt az M_y tükröt gyorsan betoltam volna a nyalábosztó felé. A 4. ábrán pedig az M_x tükröz hirtelen kirántásával együtt az y karba hirtelen be kellett volna tennem egy M'_y tükröt, közelebb a nyalábosztóhoz, mint ahol az M_y tükröz van. Az egyszerűség és a jobb áttekinthetőség kedvéért ezeket az y irányú változásokat le hagytam a 3., 4. ábrákról. Végiggondolásukat az olvasóra bízom.) Az ilyen, úgynevezett + polarizációjú gravitációs hullám metrikája az (x, y) síkban az alábbi egyenlet:

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + [1 + h(t)] dx^2 + [1 - h(t)] dy^2. \quad (3)$$

A (3) metrika csak közelítőleg helyes: csak $h(t) \ll 1$ feltétel mellett elégíti ki közelítőleg az Einstein-

egyenletet. Ezt a feltételt a hátralevő ábráimon – az ábrák jobb áttekinthetősége érdekében – durván megszegem.

A (3) egyenlet jobb oldalán szereplő (x, y, t) koordináta-rendszert úgy választottuk meg, hogy a szabadon lebegő, egymáshoz képest a hullám elhaladása előtt nyugalomban levő tömegpontok – mint amilyenek például a szabadon lebegő LISA interferométer tükröi, lézere vagy nyalábosztója lesz – $x = \text{áll.}$, $y = \text{áll.}$ koordinátákkal rendelkeznek, egy adott interferométer-tükör „karórája” (sajátideje) pedig a tükrözrel történő események t koordinátáját mutatja. A szabadon lebegő tömegpontok mozgását leíró természeti törvényből, az úgynevezett Maximális Öregedés Elvéből megmutatható [3], hogy az interferométer tükröi a gravitációs hullám áthaladása közben is mindvégig rögzített (x, y) koordinátákkal rendelkeznek. Amikor $h(t) > 0$, akkor a gravitációs hullám a nyalábosztótól „hátrébb húzza” az M_x tükröt, az M_y tükröt pedig „közelebb tolja” hozzá. A gravitációs hullám a tényleges fizikai távolságokat befolyásolja. Például a nyalábosztó és az M_x tükröz közötti Δs_x méterrúdtávolságot, amit egy ideálisan merev méterrúddal ki lehetne mutatni közöttük adott $t = t_0$ -ban (vagyis amikor a BS és az M_x karórája is t_0 -t mutat), úgy kapjuk meg, hogy a (3) egyenletből meghatározzuk az

$$(x_{BS}, y_{BS}, ct_0)$$

és az

$$(x_{Mx}, y_{Mx}, ct_0) = (x_{BS} + \Delta x, y_{BS}, ct_0)$$

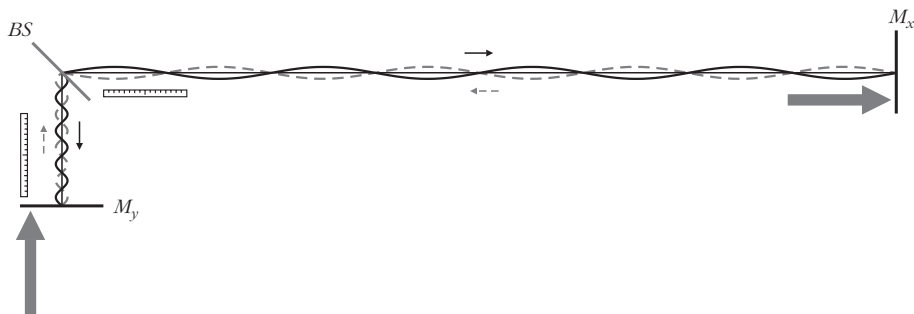
koordinátájú események közötti téridő-intervallumot:

$$\Delta s_x = \sqrt{1 + h(t_0)} \Delta x. \quad (4)$$

Hasonlóképpen kapható meg a nyalábosztó és az M_y tükröz közötti Δs_y méterrúdtávolság:

$$\Delta s_y = \sqrt{1 - h(t_0)} \Delta y. \quad (5)$$

(Analog módon kaptuk meg a galaxisok távolságát a (2) egyenletben.) A (4)–(5) egyenletek alapján adottan tűnik tehát a gravitációs hullámok elvileg legegyszerűbb detektálási módszere: a téridő lüktetése a szabadon lebegő tömegpontokat egymáshoz képest „odébb löki”, és nincs más dolgunk, mint ezen távolságingadozásokat merev rudakkal kimérni. A LIGO és a LISA működése azonban nem ezen az elven alapul. Nem nehéz megérteni, miért. Igazán nagy téridőgörbületet létrehozó, kataklizmatikus események szerencsére nem zajlanak a Naprendszer közelében, és mire egy ilyen eseményből kiinduló gravitációs hullám ideér, erőssége nagyon lecsökken. A Földet érő gravitációs hullámokban a (4)–(5) egyenletekben szereplő h nagyságrendjére, és az ezzel járó relatív hosszváltozásra tipikusan $\sim 10^{-20}$ -nál nagyobb érték nem várható. Ekkora relatív hosszváltozást hagyományos mechanikai mérősz-



5. ábra. Michelson-interferométer szabadon lebegő tükrökkel és nyalábosztóval. Az interferométer x és y karját egy lépésfüggvényszerű gravitációs hullám kitágította, illetve összehúzta. A fényhullámot nem használhatjuk hosszszelvényként a távolságméréshez.

az interferométer tükréit). És ami a kozmikus háttérsugárzás elektromágneses hullámával történik az Univerzum tágulása közben, *pontosan ugyanaz történik az interferométert kitöltő fényhullámokkal egy gravitációs hullám áthaladásakor*: a fény hullámhossza „leköveti” a tér tágulását, összehúzódását. Ezt a jelenséget szemlélteti az 5. ábra, amely azt mutatja, mi történik, amikor a Michelson-

közzel – például merev méterrudakkal – reménytelen kimutatni. (Történeti megjegyzés: tökéletesen alaktartó test nem létezik; egy valóságos rúd észlelhető mechanikai rezgésbe jönne, ha elég nagy intenzitású gravitációs hullám haladna át rajta. Az 1960-as években *Joseph Weber* erre az elvre alapozva olyan detektort épített, amely egy tömör alumíniumhenger mechanikai rezgéseiből mutatta volna ki a lüktető árapályfeszültségeket. A mérőeszköz azonban nem volt elég érzékeny ahhoz, hogy meggyőző bizonyítékot adjon a gravitációs hullámok létére.) Sokkal érzékenyebb és pontosabb távolságmérő műszerek a lézeres interferométerek, amelyek – *rendkívül* gondos tervezéssel – képessé tehetők akár ilyen elképesztően kicsi, $\sim 10^{-20}$ nagyságrendű relatív távolságváltozás kimutatására is. A 3. és 4. ábrán már láttuk, hogy fényhullámokkal *lehet* távolságváltozást mérni, ez semmilyen elvi nehézségbe nem ütközik, legalábbis sík téridőben. A gravitációs hullám azonban *meggömbíti a téridőt*. Lehet-e bízni abban, hogy egy fényhullámokra alapuló távolságmérési módszer itt is működhet?

Amitől zavarba jövünk

Az Univerzum tágulása egészen másfajta távolságnövekedés, mint a 3., 4. ábrán szereplő gondolat kísérletek. A galaxisok nem „térben távolodnak” egymástól, hanem a „tér tágul közöttük”. Azt, hogy ez nem csupán játék a szavakkal, onnan láthatjuk, hogy az Univerzumot kitöltő CMB hullámhossza is arányosan nő a tágulással (lásd az 1. ábrát). Nincs olyan fizikai hatás, amely egy adott térrészben terjedő vákuumbeli elektromágneses hullámot – mindenfajta kölcsönhatás nélkül – a térben „szét tudna nyújtani”. Muszáj tehát úgy fogalmaznunk, hogy itt maga a tér nyúlik meg. Mint láttuk, a CMB fényhullámaival ezért sem tudnánk kimutatni a galaxisok távolságnövekedését.

Ez azonban látszólag működésképtelenné teszi az olyan interferometrikus elvre épülő detektorokat is, mint a LIGO. Amilyen értelemben ugyanis a galaxisok egymástól távolodnak, pontosan ugyanolyan értelemben löki egymástól „közelebb-távolabb” egy gravitációs hullám a szabad tömegpontokat (például

interferométer karjait egy gravitációs hullám pillanat-szerűen x irányban kinyújtja, y irányban pedig összenyomja.

Mielőtt továbbmennék, néhány megjegyzés: mint korábban utaltam rá, a pedagógiai egyszerűség kedvéért [2] feltételezem, hogy az interferométeren egy lépésfüggvénnyel leírható gravitációs hullám haladt át, tehát a karok hossza végtelenül gyorsan változik. Bár nem tudunk olyan természeti folyamatról, amely lépésfüggvényszerű gravitációshullám-impulzust keltene, az ilyen hirtelen impulzus önmagában nem mond ellent a tömegpontok véges határsebességére vonatkozó természeti törvénynek: itt nem a *térben* mennek odébb a tükrök végtelen nagy sebességgel, hanem a *tér tágulása* megy végbe végtelen nagy „sebességgel”. (Hasonlóképpen az Univerzum tágulása közben sincs elvi korlát a tér deformációjának ütemére, így a galaxisok távolodási „sebességére” sem.) Az 5. ábrán szintén pedagógiai okból, az áttekinthetőség kedvéért óriási mértékben (2,5-szeresére) növeltem, illetve csökkentettem a karok hosszát. Ez a számszerű példa semmilyen szempontból sem realizisztikus. Ilyen óriási intenzitású gravitációs hullám olyan árapályfeszültségeket keltene a mérőberendezésben, amelyet a lézer, a nyalábosztó és a tükrök erősen megsejnylenék. Az 5. ábrán a méterrudak is egészen mást éreznek, mint a 3., 4. ábrákon. Ott nem éreztek semmit, hiszen csak a tükröket rángattuk, őket nem bántottuk. Itt a gravitációs hullám áthaladásakor hatalmas árapályfeszültségeknek voltak kitéve, de feltesszük, hogy az őket összetartó kohéziós erők ellenálltak ezen árapályfeszültségeknek, így a rudak hossza nem változott.

A 2. és 5. ábrák összevetésével látható, hogy az ideálisan merev méterrudakkal kimutatható lenne a karok hosszváltozása, a fényhullám viszont – úgy tűnik – itt pontosan ugyanúgy kudarcot vall a mérő-rúd szerepében, mint a CMB fényhulláma az 1. ábrán. Mindkét kar továbbra is 4λ hosszú maradt, és ennek megfelelően a nyalábosztón találkozó két viszsza-vert fényhullám fáziskülönbségében sem történt változás. *Akkor hogyan tudjuk az interferométerrel mégis kimutatni a gravitációs hullám jelenlétét? Mennyiben tud többet a LIGO interferométerét kitöltő fényhullám, mint az Univerzumunkat kitöltő CMB fényhulláma?*

Megoldás: a lézer

Az 5. ábra egy pillanatfelvétel. Azt a pillanatot ábrázolja, amikor a gravitációshullám-impulzus éppen áthaladt a berendezésben. Az élet azonban nem áll meg: azon fénycsugarak, amelyek a tértágulás-szűkülés pillanatában éppen a tükrök között tartózkodtak, a kimerevített pillanatkép után továbbhaladnak útjukon, miközben a lézer folyamatosan adagolja az interferométerbe az „utánpótlást”.

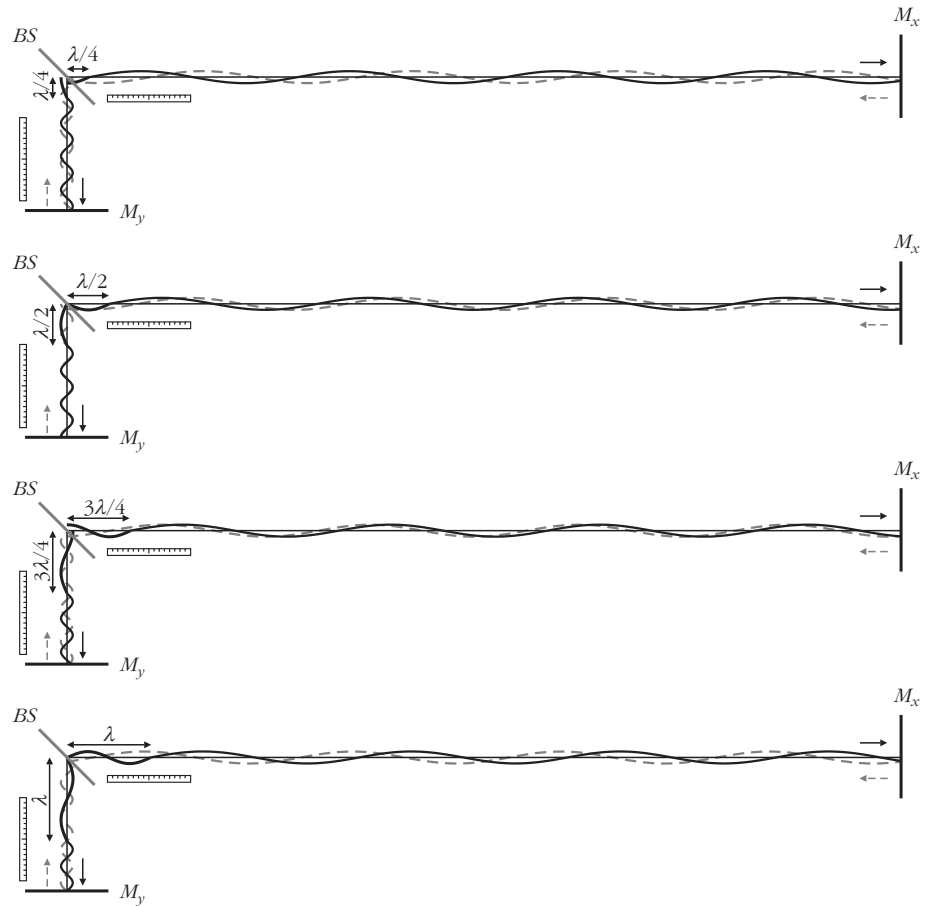
Két lényeges pont:

1. A (3) metrika jobb oldalán a dt^2 -es tag konstans együtthatójából látható, hogy azon tömegpontok „karóráját”, amelyek az (x, y) koordináta-rendszerben nyugszanak, tehát amelyekre $dx = 0$ és $dy = 0$ – ilyennek tekinthető a lézer is –, a gravitációs hullám nem befolyásolja. A lézer tehát időben változatlan frekvenciával bocsátja ki a fénycsugarakat.

2. A fény sebessége az 5. ábrán látható, x irányban kitágult, y irányban összehúzóult térben továbbra is minden irányban c . Ennek belátásához tekintsünk például egy fényimpulzust, amely x irányban halad a kitágult interferométer-kar mentén. A fényimpulzus repülés közben haladjon el két egymáshoz közeli, rögzített x koordinátájú szabadon lebegő (intelligens) kő mellett, amelyek elhatározzák, hogy megméri a fényjel sebességét. A (4) egyenletről látjuk, hogy ha a két kő x koordinátájának eltérése dx , akkor a köztük levő, méterrúddal lemérhető távolság $ds_x = (1+h)^{1/2} dx$. A két kő ugyanakkor karórával is fel van szerelve, amelyek – mint láttuk – a t koordinátát mutatják. A gravitációs hullám eredetileg sík téridőbe érkezett, amelyben a két kő órája szinkronizálva volt. Mivel a gravitációs hullám a kövek karóráit nem befolyásolja (lásd feljebb), a kövek a kitágult térben is jogosan hasonlítják össze a saját órájukon kijelzett értéket a társukéval. Összpontosítsunk arra a két eseményre, amikor a fény az egyik, illetve a másik kő mellett elhaladt. Az első eseménykor az első kő karórája t_0 -t mutatott, a második eseménykor a másodiké $t_0 + dt$ -t. A fényimpulzus sebességét ezután a kövek a sebesség = távolság/idő képletből határozzák meg:

$$v_{\text{fény}} = \frac{ds_x}{dt} = \sqrt{1+h(t_0)} \frac{dx}{dt} = c, \quad (6)$$

ahol az utolsó lépésben felhasználtam a (3) metrikus egyenletet, amelynek bal oldalára most zérust kell

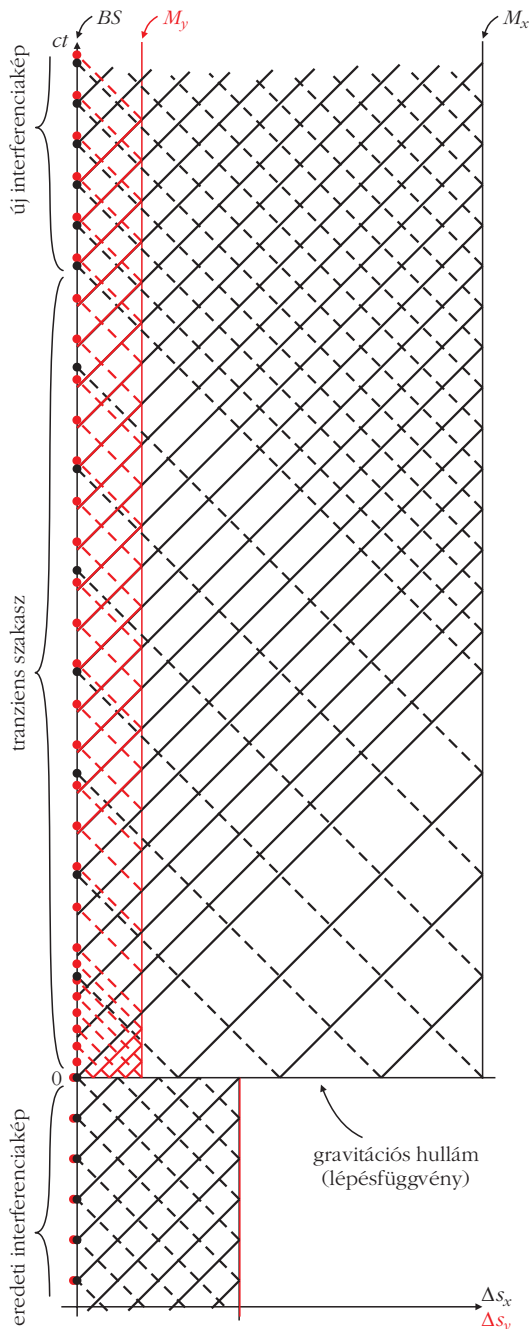


6. ábra. A megváltozott karhosszúságú interferométert (amelyben a fénycsugarak is kitágultak-összenyomódtak) a lézer a nyálábosztó felől kezdi feltölteni az eredeti hullámhosszúságú fényvel.

írni, hiszen a két eseményt fényszerű (null-) téridő-intervallum választja el egymástól.

Az előzőekből következik, hogy a lézer a gravitációs hullámimpulzus elhaladása után az *eredeti* λ hullámhosszúságú fényvel kezdi el feltölteni az interferométer mindkét karját. Ez követhető nyomon a 6.a–d ábrákon, amelyek a $T/4$, $T/2$, $3T/4$ és T időpontokban mutatják az interferométert (T a lézer periódus-ideje, és az egyszerűség kedvéért a lézert képzeletben közvetlenül a nyálábosztó elé tettem).

Ha folytatnánk a 6. ábrasorozatot, azt látnánk, hogy kitágult-összenyomódott fénycsugarak előbb-utóbb teljesen „kiürülnek” a rendszerből. Amikor ez megtörténik, az ernyő már a megváltozott tükrőtávolságoknak megfelelő interferenciaképet fogja mutatni. A 7. ábra téridődiagramon követi végig a jelenséget. A vízszintes tengelyen a tükrök és a nyálábosztó közötti fizikai távolságot tüntettem fel. A tengely az x és y irányokat „egymásra hajtogatva”, eltérő színnel ábrázolja. A lépésfüggvényyszerű gravitációs hullám $t = 0$ -ban érkezik, és hirtelen megváltoztatja a tükrök távolságát a nyálábosztótól. A tükrök felé haladó és azokról visszavert fényt most folytonos, illetve szaggatott világvonalak ábrázolják, amelyek dőlésszöge nem változik, mert a fény sebességét – mint fent láttuk – a gravitációs hullám nem befolyásolta. A nyálábosztó felől a világvonalak szabályos (saját)időközönként,



7. ábra. Téridődiagram-összefoglaló a 2., 5., 6. ábrákról.

periódusidőnként érkeznek. (Az egyszerűség kedvéért a lézert ismét közvetlenül a nyalábosztó mögé tettem.) Az időben egymást követő világvonalak megfeleltethetők például egy szinusz hullám egymást követő hullámhegyeinek. Az M_x és M_y tükrökről visszavert fénycsugarak a nyalábosztón találkoznak. A függőleges tengelyen nyomon követhető, hogyan változik a két visszavert fénycsugár közötti fáziskülönbség. Az ábrán jelölt „tranzien szaksz” közben vannak az interferométeren belül olyan fénycsugarak, amelyeket a gravitációs hullám megnyújtott, illetve összenyomott. Miután ezek a deformált hullámok kiürültek az interferométerből, az előálló állandósult fáziskülönbség már az új távolságoknak felel meg.

A lépésfüggvény szerű gravitációs hullám példája kizárólag pedagógiai célt szolgált, mert viszonylag egyszerű követni, ilyen esetben mi történik a fénycsugarakkal. Egy *periodikus* gravitációs hullám első közelítésben egy olyan négyszöggelként írható le, amit ilyen lépésfüggvényekből építhetnénk fel. A folyamat végiggondolása ekkor semmivel sem lenne nehezebb, feltéve hogy a fényinterferenciában tapasztalható tranziensek mindig lezajlanak az újabb lépésfüggvény érkezése előtt, vagyis ha teljesül a

$$\frac{2s}{c} \ll \frac{1}{f_G}$$

feltétel, ahol s a karok átlagos hossza, f_G pedig a gravitációs hullám frekvenciája. Ekkor az interferenciakép intenzitásának ingadozása jó közelítéssel egyszerűen leköveti a gravitációs hullám jelalakját. Ha olyan gravitációs hullámot elemeznénk a fenti módszerrel, mint a LIGO által először észlelt, egyre gyorsuló frekvenciájú és növekvő erősségű oda-vissza löktetés (chirp) volt, akkor egy-egy t időpillanatban a karok mentén a fénycsugarak alakja különböző hullámhosszak egymásutánjából álló, bonyolultabb rajzolatot mutatna. (A LIGO-interferométerek karhossza $s = 4$ km, a 2015 szeptemberében észlelt jel pedig egy $f_G \sim 35\text{--}250$ Hz frekvenciafelfutású chirppel volt, tehát még ekkor is teljesült a tranziensekre vonatkozó fenti feltétel.)

Összefoglalva tehát úgy fogalmazhatjuk meg a LIGO interferométerében használt fénycsugarak és a CMB közötti alapvető különbséget – részben hullám-, részben fotonképet használva –, hogy míg a CMB az Univerzum korai történetének egy bizonyos pontján keletkezett, és azóta nem nyúlt hozzá senki (azóta nem adódtak hozzá új fotonok), a LIGO lézere folyamatosan adagolja az interferométerbe az újabb hullámokat (folyamatosan „gyártja” az újabb fotonokat). A CMB-fotonok frekvenciája az Univerzum tágulása miatt folyamatosan csökken. A gravitációs hullám által szállított téridő-deformációk a LIGO interferométerében is csökkentik-növelik a fotonok frekvenciáját, de csak azokat, amelyek éppen a tükrök között repülnek. A lézercsugár mindig az eredeti frekvenciájú fotonokkal pótolja őket. Jó tehát megszabadulni attól a mentális képtől, hogy az interferométer karhosszait a fénycsugarakkal, mint hosszaléval mérjük. Helyesebb úgy fogalmazni, hogy a mérésben a rögzített frekvenciával működő *lézert* használjuk *óraetalonként*, és végső soron a két karról visszaérkező fénycsugarak *időkülönbségének* változásait követjük.

Irodalom

1. Bokor N.: A távolságról és a sebességről, a Hubble-törvény kapcsán. *Fizikai Szemle* 64/7–8 (2014) 218–221.
2. P. R. Saulson: If light waves are stretched by gravitational waves, how can we use light as a ruler to detect gravitational waves? *Am. J. Phys.* 65/6 (1997) 501–505.
3. <http://www.eftaylor.com/exploringblackholes> – Chapter 16: Gravitational Waves.
4. A Matlab-program hozzáférhető a <http://fizipedia.bme.hu/images/1/11/GravithullamMatlab2.docx> linken.

SAFECAST-PROJEKT MEGVALÓSÍTÁSA AZ ISASZEGI GÁBOR DÉNES GIMNÁZIUM ÉS SZAKGIMNÁZIUMBAN

Garamhegyi Gábor

Isaszegi Gábor Dénes Óvoda, Általános Iskola,

Gimnázium és Szakgimnázium

ELTE Fizika Doktori Iskola, Fizika Tanítása Program

Egy *Mengyelejev*től származó mondás szerint: „A tudomány akkor kezdődik, amikor elkezdünk mérni, pontos tudomány mérés nélkül nem lehetséges.” Ez egyben a fizikaórák mottója is, hiszen minden órán hangsúlyozzuk: a fizika mérhető és számszerűsíthető mennyiségekkel foglalkozik. Ugyanakkor jól ismertek a fizikatanítás hosszan elhúzódó (nem is mindig új keletű) gyermekbetegségei: a szertárak puritánsága, az igazán korszerű, a diákok figyelmét felkeltő (a kor jelenlegi technológiai színvonalát reprezentáló) mérőeszközök, és persze a kellő motiváltság hiánya. Egy hiteles adatokat szolgáltató sugázmérő eszköz pedig ugyancsak ritka kincsnek számít. A reális társadalmi igény azonban – és az új tanterv korszerűsítési céljai is ebbe az irányba mutatnak – az, hogy a tanított ismereteket minél jobban kössük gyakorlati, az élet által felvetett problémákhoz és a megélt élményekhez. Mérjünk, számszerűsítsunk, ismerjük meg a hétköznapi életet.

Ígéretes alternatív megoldás lehet egy, az országhatárokon messze túlívelő nemzetközi projektbe, a Safecast-projektbe való bekapcsolódás. Ez ötvözi: a problémafelvető, élményalapú, saját megélt tapasztalaton nyugvó, tanórai kereteken és ismereteken átnyúló projekt alapú, tudományos igényű tanítást, amellyel olyan diákok is bevonhatók a megismerési folyamatba, akik tanórai keretekben alig mutatnak érdeklődést a fizika, vagy egyáltalán a természeti környezetük iránt.

A résztvevő diákok ráadásul környezetük olyan részével kerülnek (számukra is érdekes) kapcsolatba, amely érzékszerveikkel nem érzékelhető. Hozzájárulnak továbbá a világ és egyben saját környezetük radioaktív tudományos térképének felméréséhez, amellyel a maguk és az egész társadalom számára hasznos ismereteket szereznek, és új adatokat állítanak elő a további kutatásokhoz. Érdekes időtöltés közben konkrét kutatómunkát végezhetnek.

A tanulmány elkészítését a Magyar Tudományos Akadémia Tantárgypedagógiai Kutatási Programja Támogatta.



Garamhegyi Gábor okleveles villamosmérnök, fizikatanár. 1978-ban a Szolnoki Repülő Műszaki Főiskolán fedélzeti rádiótechnikai üzemmérnöki, 1994-ben a Budapesti Műszaki Egyetemen villamosmérnöki és 2004-ben a Pécsi Tudományegyetemen fizikatanár végzettséget szerzett. 15 éve az Isaszegi Gábor Dénes Középiskola fizikatanára. 2010 óta az ELTE Fizika Tanítása Doktori Program doktorandusza. Kutatási témája: „Sugárzások humán térben”, témavezetője: *Horváth Ákos*, ELTE Atomfizikai Tanszék.

A diákok a Safecast-projekt keretében önállóan, saját kezűleg (tanár által mentoráltan) építik meg, szerelik össze a radioaktív sugárzás hiteles mérését, elektronikus naplózását, majd rendszeres megfigyelését lehetővé tévő detektoregységet, a Safecast bGeige Nano mobil mérőrendszert. Az eszköz elkészültével, szinte korlátok nélkül lakóterben, szabadban, kirándulás közben, vagy akár aktívan sportolva végezhetik méréseiket, amelyeket a kor követelményeinek megfelelően, akár mobiltelefonnal feltölthetnek a világhálóra. Megoszthatják, megvitathatják egymással adataikat, mérési tapasztalataikat.

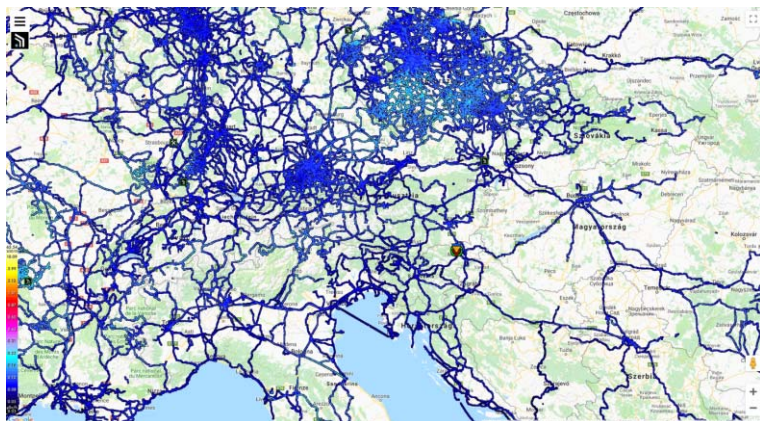
A Safecast-projekt

A projektet az a nem új keletű (Római Klub 1968) felismerés hozta létre, amelyet a közös gondviselés és az emberiség jövőjéért érzett felelősség motivál és köt össze. A felismerés újragondolását 2011. március 11-i japán Fukushima Daiichi atomerőmű-katasztrófa generálta. Ez a világ második legsúlyosabb – INES (International Nuclear Event Scale) skálán 7-es fokozatú – nukleáris eseménye volt, amely azt jelenti, hogy „radioaktív anyag kiterjedt egészségügyi és környezeti hatásokkal járó kibocsátása történt a környezetbe, amely szükségessé teszi tervezett és kiterjesztett óvintézkedések bevezetését”.¹

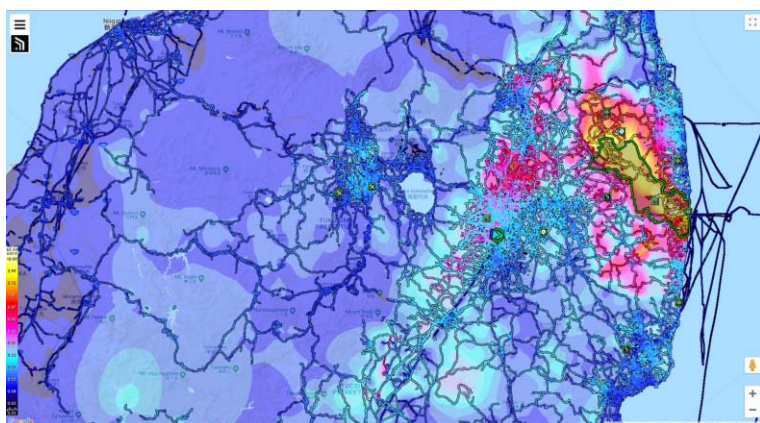
A Safecast-projekt elindítói (*Sean Bonner*, *Pieter Franken*, *Joi Ito*) ekkor egy olyan önkéntes, befogadó, nyílt nemzetközi közösség létrehozását határozták el, amelyhez bárki, tehát szakemberek, tudósok, diákok, fejlesztők, egyszóval önkéntesek csatlakozhatnak. Az állami, hivatalos szervezetektől függetlenül, elfogulatlanul, a tudományos kutatások módszertanának megfelelően mérhetnek, gyűjthetnek a környezeti ionizáló sugárzásokkal (radioaktív sugárzásokkal) kapcsolatos megbízható, hiteles adatokat. A mért adatokat pedig (ellenőrzés után „jóváhagyva”) egy mindenki számára nyilvános elérésű, térképpel is támogatott adatbázisba rendezik. Így a tudományos kutatások és az érdeklődők számára is könnyen elérhető és értelmezhető, a tudományos kutatások nemzetközi standardjának megfelelő adatbázis jön létre.

A mért adatok áttekintését nagyban segíti, hogy azokat ellenőrzés és jóváhagyás után egy nagyítható-kicsinyíthető, interaktív térképen, az interneten online láthatóvá tesszik. Ezzel a megoldással egyedülálló

¹ Országos Atomenergia Hivatal 1.48.sz. útmutató.



1. ábra. Európai régió.



2. ábra. Japán részlet, jobbra Fukushima látható.

módon válik szemléletessé a Föld (a projektben részt vevő önkéntesek által) egyre pontosabbá váló globális radioaktív térképe (<https://safecast.org/tilemap>), amelynek létrehozása önmagában is komoly, nemzetközi tudományos vállalkozásként értékelhető.

A térkép (1. és 2. ábra) bal oldalán $\mu\text{Sv/h}$ mértegységben van feltüntetve a mért gamma-sugárzás dózisegyenérték adatskálája. A színskóddal jelölt értékek a térképen jól láthatók, így könnyedén összevethetők például lakókönyezetünk sugárzási adatai Csernobilével, Fukushimáéval, vagy az Országos Meteorológiai Szolgálat által üzemeltetett, Országos Sugárfigyelő, Jelző és Ellenőrző Rendszer hazánkra vonatkozó, közzétett értékeivel. A Safecast-projekt által – világviszonylatban – már több

3. ábra. A „palacsinta” detektor.



mint 50 millió hely adatai kerültek feltöltésre, és – az önkénteseknek köszönhetően – ez folyamatosan bővül. A civil monitorozók általában mobil eszközökkel, pillanatnyi értékeket mérnek, de a különös érdeklődésre számot tartó helyszíneken már fix készülékekkel is mérnek. Ezek telepítéséhez engedélyre van szükség. Segítségükkel viszont nyomon követhetők a sugárzások időbeli változásai. Az adatgyűjtésekben természetesen kiemelt hangsúlyt kap az atomerőművek környezetének, és általában az ipari környezet civil monitorozása.

A Safecast-projekt a napjainkban már tudományos kutatásokban is egyre terjedő „crowdsourcing” modellt használja. Ennek lényege, hogy a kutatásokba tömegesen vonják be a „civil tudomány” képviselőit, mint az adott feladatra felkészült vagy felkészített, a szükséges alapismeretekkel rendelkező vagy azokat elsajátított, de nem professzionális szakembereket.

A projekthez a sugázmérők új generációját fejlesztették ki – az International Medcom és a Tokyo Hackerspace segítségével – a bGeige és bGeige Nano mobil eszközöket, valamint a Stationcast fix telepítésű eszközt. A detektor mindegyik eszköz esetén egy Geiger–Müller-számlálóső, amit a működtető áramkörön kívül elláttak a jelenlegi technológiai színvonalat biztosító

GPS, bluetooth, wifi, microSD-kártya, digitális kijelző stb. kiegészítőkkel. A standard felszereltség mellett még számos opcionális kiegészítővel rendelkezhetsz a rendszer.

A projektben résztvevők köre egyre bővül, már rendszeres nemzetközi Safecast-konferenciákat is rendeznek. A tudományos ismeretek ilyen módon történő elsajátítása, átadása és közvetítése ezen a folyamatosan bővülő hálózaton egyre növekvő számú diákot ér el, és fordít a tudomány felé.

A bGeige Nano mobil detektor leírása

A hardver lelke egy LND 7317 típusú 500 V üzemi feszültséggel működő Geiger–Müller-számlálóső, amelyet jellegzetes alakja miatt „palacsinta detektornak” neveznek (3. ábra). A detektor érzékeli az alfa-, béta-, gamma-sugárzást, és Cs^{137} -re előkalibrált. A kalibrálás a készülék használata során nem változik. A mért értékek egymással és hasonló készülékek adataival megbízhatóan összehasonlíthatók.

A detektor működését biztosító és azt intelligensé tevő főbb áramkörök: egy 8 MHz-es órajellel működő, és önálló időzítő áramkörrel ellátott 14 digitális és 8 analóg bemenettel rendelkező mikrokontroll (FIO), egy digitális kijelző panel (OLED), 8 MB-os microSD-kártyát működtető memóriaregység (OpenLog), GPS-

panel és egy verziószámától függő 1200 mAh vagy 2000 mAh kapacitású 3,7 V feszültségű lítium-polimer akkumulátor (4. ábra). Az egység egy mikrohangszórót is tartalmaz, amellyel észlelésekkor a már megszokottá vált, jellegzetes „kattogó hang” hallhatóvá tehető. Opcionálisan kerülhet beépítésre, akár utólag is, egy bluetooth-egység, amely lehetővé teszi a vezeték nélküli csatlakozást hasonló funkcióval ellátott készülékekkel, mobil telefonnal, amennyiben a szükséges alkalmazás a telefonon fut. A mobil készülék – az akkumulátortól függően – 3-5 óra töltési idővel mintegy 35-40 óra folyamatos üzemre képes. Töltéskor – a teljes feltöltődésig – egy sárga színű jelzőfény világít. Az OLED-kijelző a készülék bekapcsolásakor százaléklambban jeleníti meg az akkumulátor töltöttségi. Az összeszerelt egységek végül egy erős, külső rögzítésre is alkalmas vízálló, de nem vízhatlan, átlátszó műanyag tokba (Pelikan) kerülnek, amely így a külső helyszíni mérésekre is kiválóan alkalmas.

Az eszköz 5 másodperces időközökkel mér, egy perces időtartamra akkumulálja az adatokat és a digitális kijelzőn – az üzemmódnak megfelelően – CPM (counter per minute), illetve $\mu\text{Sv/h}$ (mikrosievert/óra) és Bq/m^2 (becquerel/ m^2) értékek 5 másodpercenként frissülnek. A CPM és $\mu\text{Sv/h}$ értékek közötti konverzió automatikus, gyári kalibráció alapján. Amennyiben a GPS-vétel zavartalan, úgy a kijelzőn látható az egység által egyidejűleg befogott GPS-műholdak száma is.

A detektor méréshatára 350 000 CPM, illetve 1000 $\mu\text{Sv/h}$. A detektor < 5%-os pontossága a hasonló jellegű mérőeszközökkel összehasonlítva igen jónak mondható.

A mért adatok a microSD-kártyára, a GPS-vevők adatátvitelére egyebek mellett használt NMEA 0183 protokoll szerint (National Marine Electronics Association szabvány) ASCII karakterláncot tartalmazó szöveges fájlban kerülnek tárolásra.

Egy ilyen karakterláncra példa a 30091230.log nevű fájl néhány sora, amely már saját mérési eredményünket tartalmazza. A naplófájlok a # karakter utáni egy vagy több megjegyzéssel kezdődnek, majd ezeket a mérési adatokat időbélyeggel és földrajzi adatokkal ellátott \$ jellel kezdődő, *-gal végződő vesszőkkel szegmentált karakter-sorozat követi az alábbiak szerint: # NEW LOG# format=1.3.4nano# deadtime=on \$BNRDD,3009,2017-12-30T12:01:11Z,16,2,16,V,4732.8372,N,01923.3773,E,199.40,A,9,88*65

Jelentése: új logfájl az 1.3.4 verziójú firmware-rel ellátott nano készülékről, \$ jeltől *-ig az 1. táblázat szerint értelmezve.



4. ábra. A főegységek helye beültetés előtt, az ellenállások, kondenzátorok, LED-ek, kapcsolók stb. már beforrasztásra kerültek.

Az adatnaplófájl (30091230.log) neve a mérőegység azonosítójából (3009), és a naplóindítás hónap, nap (12. hó, 30. nap) áll össze. „Helytakarékoságból” sajnos a naplófájl dátuma egységesen 01/01/2000, de ez nem jelent megszorítást, hiszen a fájlban lévő karakter-sorozatban lévő időbélyeg másodperc pontosságú.

A bGeigie Nano mobil detektor iskolai beszerzése

A mobil sugárázsmérő eszköz három formában kerülhet birtokunkba:

1. Kit (alkatrész-készletként, tehát mi szereljük össze) bluetooth nélkül, 550 USD.

1. táblázat		
Az NMEA protokoll szerinti karaktersorozat értelmezése		
mező	leírás	példa
fejléc	eszközmodell	BNRDD
eszközzazonosító	eszköz sorozatszáma	3009
dátum	ISO-8601 szerinti dátumforma, GMT	2017-12-30T12:01:11Z
sugárzás 1 perc	GM-cső utolsó egy percben jelzett impulzusainak száma	16
sugárzás 5 másodperc	GM-cső utolsó 5 másodpercében jelzett impulzusainak száma	2
számlálás összesen	indítás óta rögzített összes impulzus száma	16
érvényességjelző	„A” 1 perces futás nem nulla, „V” nulla	V
szélességi kör	GPS-adat	4732.8372
féltéke	„N” észak, „S” dél	N
hosszúsági kör	GPS-adat	01923.3773
kelet, nyugat	„W” nyugat, „E” kelet	E
magasság	GPS-adat méterben	199,40
GPS érvényesség	„A” érvényes, „V” érvénytelen	A
műholdak száma	GPS által használt műholdak száma	9
pontosság	vízszintes helyzet relatív pontossága	88
ellenőrző összeg	ellenőrző összeg, az átvitel ellenőrzéséhez	65

2. Kit (alkatrészekszetként, tehát mi szereljük össze) bluetooth modullal szállítva, 600 USD.

3. Összeszerelt állapotban 1500 USD.

Ehhez némi szállítási költség adódik, ami Los Angeles – Isaszeg viszonylatban (elsőbbségi szállítmányként, repülőgéppel szállítva) 55,92 USD volt. Amivel sajnos még számolni kell, az a vámjárás költsége, a számla végösszegének mintegy 27%-a (magánszemély vámtatása esetén). Tapasztalat híján mi belefutottunk. A végösszeg így 211 300.- Ft lett, ami természetesen árfolyamfüggő.

A <https://shop.kithub.cc> honlapon található internetes „tudományos” webáruház, minden rész kérdésben eligazít. A megrendelést követően szinte azonnal visszaigazolást küldtek. A weblap természetesen kártyás fizetési módot ajánl elsőként, de például iskolánk átutalással fizetett. E-mailben küldték meg a nem európai bankközi átutalásokhoz szükséges banki adatokat (számlaszám, bank neve, címe, swift kód) és a számlát. Az adatok birtokában az iskola (erre feljogosított) számítógépével, minden nehézség nélkül intéztük az átutalást. A megrendeléssel szinte egy időben egy kapcsolattartó (*Tara Tiger*) a megrendelés e-mail-címére a projekttel, a szállítmány nyomkövetésével kapcsolatos tájékoztató anyagokat küldött. Ezek oktató videókra, a projekt sikerét biztosító, letöltendő dokumentumokra is felhívták a figyelmet, mint forrástási technológiai ismeretek, összeszerelési és üzemeltetési kézikönyv stb.

Az átutalást követő egy héten belül a szállítmány megérkezett egy 25×17×7 cm nagyságú kartondobozban, amely minden alkatrészt külön-külön csomagolva tartalmazott.

A detektor összeszerelése, mint iskolai fizikaszakköri projekt

A Safecast iskolai projektünk – mint az eddigiek is – problémafölvétellel, projektindító előadásokkal kezdődött, ahol a sugárzásokkal kapcsolatos előzetes ismereteink, illetve a már tanult ismeretek kerültek (osztályonként, fizikaóra keretében) felelevenítésre. Hangsúlyozva a személyes érintettségünket környeze-

tünkkel kapcsolatban. Kiemelve, hogy a sugárzásokkal kapcsolatos negatív attitűdök ismerethiányokra, tévhitre vezethetők vissza, és a helyes szemlélet csak megbízható, hiteles mérési adatok korrekt elemzésével alapozható meg. Ezek a témák, illetve szemlélet nagyon sok éppen tanítandó, vagy tanított témakörrel összekapcsolható. Ilyenek például:

- kölcsönhatások,
- mag- és részecskefizikai alapismeretek,
- dozimetriai ismeretek, mértékegység skálák,
- energia, energiaskálák,
- egyenáramú körök,
- radioaktivitás,
- kockázat, rizikó fogalmak és értelmezésük,
- detektorok,
- mérés technikai alapismeretek,
- technológiai alapismeretek,
- anyagismeret,

csak néhányat említve a szerteágazó lehetőségekből. A hivatkozások, utalások kiterjeszthetők voltak más tantárgyak körében tanult fogalmakra, jelenségekre. Itt (nem részletezve) elsősorban kémia, biológia, földrajz, informatika tárgyú ismeretekre gondolhatunk. Ezzel is erősítve és hangsúlyozva a környezetfizika interdiszciplináris jellegét.

A projektindító előadások nem titkolt célja volt a leendő közreműködők, eszközépítők kiválasztása, és megnyerése a feladatra.

A mérőrendszer (detektor) összeszerelése (megfelelő mentortanár segítségével) akár 7–8. osztályosokkal is eredményes lehet, az alapvető, illetve kiegészítő jellegű elektrotechnikai ismeretek a helyszínen megadhatók. Ilyen például a digitális multiméter használata (mérési funkció, méréshatárváltások szükségessége), alkatrészek felismerése és azonosítása az összeszerelési (kapcsolási) rajzzal, dióda- és tranzisztorlábak azonosítása és annak szükségessége stb.

Mi végül eszközépítőnek két 11. osztályos tanulót választottunk ki, akik – elmondásuk szerint – rendelkeztek alapvető forrástási ismeretekkel.

Az eszközigény is minimális volt: forrástópáka (lehetőleg szabályozható hőfokú, körülbelül 300 °C), forrástóon (gyantás), csípőfogó, csavarhúzókészlet (precíziós, órás, a kis méretek miatt), esetleg nagy

5. ábra. Elméleti felkészülés.



6. ábra. Alkatrész-beültetés forrástással.



fémcsipesz. Helyszínül egy standard osztálytermet választottunk, ahol a diákok forrasztási ismereteit egy régi (elavult) számítógép-alaplap néhány alkatrészének ki, majd ismételt beforrasztásával ellenőriztük, illetve elevenítettük föl.

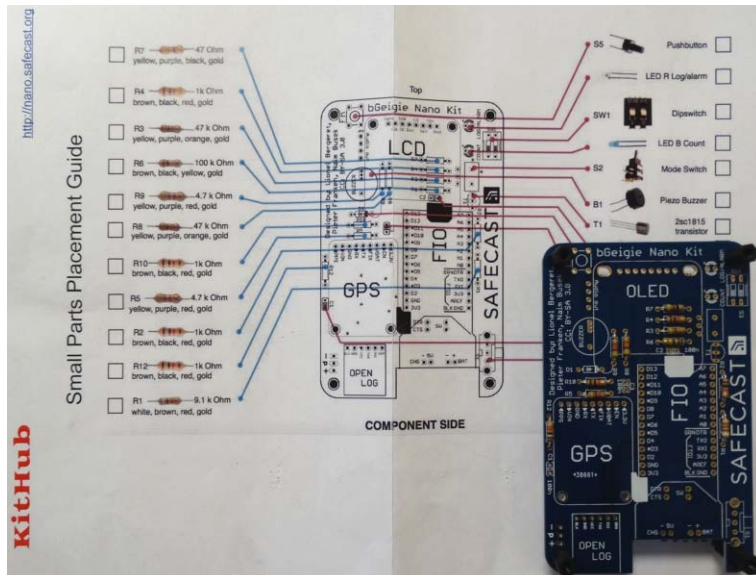
Ezután az *Összeszerelési kézikönyv* tanulmányozása, egy „alkatrészismereti gyorsalpoló” a mentortanár részéről, majd az alkatrészbeültetési vázlat kellően elmélyült megismerése következett (5. és 6. ábra).

Az összeszerelési útmutatót a <https://github.com/Safecast/bGeigieNanoKit/wiki/Assembly-Manual> honlap tartalmazta. Itt látható az alaplap beültetési rajza, ezt a szállítmányt tartalmazó csomagolásban nyomtatva is mellékeltek.

Az beültetési rajz (7. ábra) a diákok alkatrész-ismereti felkészítésének alapja lehet. Például a felhasználás során mit kell ismerni, tudni egy ohmos ellenállásról: színkóddal jelölt nominális érték, tűrés %-ban, mint a nominális értéktől való $\pm$ eltérés maximális értéke, az ellenállás által maximálisan disszipálható teljesítmény értéke wattban stb. A színkód konkrét megfejtését mi (didaktikai okokból) egy multiméteres ellenállásméréssel helyettesítettük. Így a diákok élményszerűen tapasztalhatták meg az ellenállások valódi értékének eltérését a nominális értéktől, egyben alapvető mérési tapasztalatot szereztek a multiméter használatával. (Mérési funkció, méréshatár-beállítás stb.) A multiméter felhasználható még később, a LED diódák helyes polaritásmeghatározására, egyéb jelölési szabványok megismerése mellett, vagy annak ellenőrzésére.

Az egyszerűbb kezelést igénylő alkatrészektől a bonyolultabbak felé haladva, amely elvet egyébként az említett *Összeszerelési útmutató* is követ, körülbelül 6 órai munkával elkészült, és nem kis meglepetésre már első bekapcsoláskor működőképes lett az eszközünk (8. ábra).

A mentortanár segítségére leginkább akkor volt (a fentiekén kívül) szükség, amikor a szállított alkatrészek néhány példánya, kivitele (az állandó fejleszté-



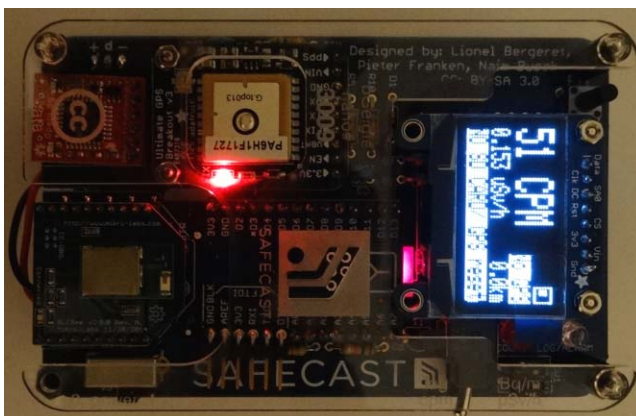
7. ábra. Beültetési rajz az alaplappal és néhány már beforrasztott ellenállással.

sek miatt) kissé eltért a *Szerelési kézikönyvben* szereplő (hasonló funkciót betöltő) alkatrészektől.

A 9. ábrán a teljesen összeszerelt, és már a Pelikan szállítódobozba zárt, naplózó üzemben működő mobil mérőegység látható. A kijelző éppen 42 CPM pillanatnyi értéket mutat, amit alul $0,126 \mu\text{Sv/h}$ -ra konvertálva jelenít meg. Jobb oldalt 5 GPS műhold „befogását” jelzi, és 157 m tengerszint feletti magasságot mért. A piros „hosszúkás” világító LED az egység akkumulátorról való üzemet jelzi (töltéskor sárga fénnel világít). Alul, bal oldalt egy kék világító pontnak látszó LED a microSD-kártyára írást mutatja. Az aktuális időbélyeg (dátum, időpont) leolvasását a képről a doboz megerősítése teszi nehezkesé. A doboz oldalán jól láthatók az egység mobil eszközhöz (terepjáró, drón stb.) rögzítését lehetővé és biztonságossá tevő hevederhelyek és egy karabiner. A dobozhoz való karbonszálas hevedert az egységcsomag tartalmazza.

A mérőeszköz összeszerelésekor az ideális diáklétszám egy fő lenne. Ilyenkor minden egyes lépést „át kell látnia”, és „át kell élnie” a konstruktőrnek. Például az ellenállásokon lévő színes csíkok, mint szín-

8. ábra. Alkatrészek még az asztalon, és a már működő kijelző egység tok nélkül.





9. ábra. Az összeszerelt, betokozott detektor.

kód azonosítását, és a helyes felismerés élményszerű ellenőrzését multiméter alkalmazásával. A hagyományos forrasztásos technológia is az alkotás egyedülálló átélését rejtí magában. Természetesen egyidejűen – egy mentor segítségével – több detektor is összeállítható lenne. Három-négy fő/detektor esetén a feladatok kis szervezéssel, az igazi alkotás élményét nyújtva megoszthatók.

A detektor üzemeltetése, adatfeltöltés és -letöltés

A <https://github.com/Safecast/bGeigieNanoKit/wiki/Operations-Manual> honlapról a detektor *Üzemeltetési kézikönyve* letölthető. A legfontosabb kérdésben kelő részletességgel eligazít.

A detektornak két üzemmódja van, amelyek egy kapcsolóval választhatók: kijelző, naplózó. Kijelző üzemmódban (9. ábra) a mért adatokat nem rögzíti a microSD-kártyán. Naplózó üzemmódban a készülék bekapcsolása után a már leírt NMEA 0183 protokoll szerinti karakterláncba írva (adatnaplófájl) rögzíti a detektált értékeket.

Az első, microSD-kártya nélküli (ezt csak egyszer kell így elvégezni) bekapcsolást követően alaphelyzetbe állítja a GPS-rendszert, majd kikapcsolás után a kártyát behelyezve és újra bekapcsolva a készüléket, a detektor üzemkész, a mérések megkezdhetők.

A mérési adatok, a microSD-kártyára írt adatnaplófájl nemzetközi Safecast-rendszerbe (adatbázisba) történő feltöltéséhez előbb regisztrálni kell egy Safecast-

applikációba, API-ba, amely <https://api.safecast.org> weboldalon érhető el. A regisztráció, és az API-ba történt bejelentkezés után sok lehetőség nyílik meg előttünk. Felhasználókra kereshetünk rá, az összes, adatbázisba feltöltött mérési adat különböző szűrési lehetőséggel letölthető, további feldolgozás, kutatás számára. A mérő detektorok adataira is rákereshetünk, és természetesen feltölthetjük saját adatainkat. Korábban feltöltött saját adataink is visszakereshetők. Ezek a lehetőségek a tanórai (tudományos) felhasználások kimeríthetetlen tárházát biztosítják számunkra. Például informatikaórán a táblázat- és adatbázis-kezelő szoftverek „éles” adatokkal tölthetők fel, a szűrési és egyéb funkciók gyakoroltatása céljából. Fizikaszakción (esetleg -órán) pedig a már megismert szoftve-ekkel a valódi mérési adatok analizálhatók, megadott szempontok szerint ábrázolhatók, így élményszerűvé, látványossá (adott esetben láthatóvá) téve az adatokban rejlő összefüggéseket.

Az adatfeltöltés a Safecast API-n keresztül a feltöltendő naplófájl nevének megadásával kezdődik, majd a naplófájl a mérésünkre vonatkozó metaadatokkal kell ellátni: város, ország, mérő személy megadása, milyen településekre terjedt ki a mérés, milyen magasságban volt a szenzor a földfelszínhez képest, milyen típusú volt a mérés. A mérési típusok lehetnek: „Drive” (autóra, hajóra, biciklire, mozgó személyre rögzített eszköz), „Surface” (valamely közeli felületnél történő, felszíni alfa-, bétaaktivitásmérés), és „Cosmic” (valamely légi eszközhöz rögzített eszköz, repülőgép, léggömb, rakéta). A metaadatokban még a mérés egyéb körülményeire utaló információk, eső, hó, köd stb. is rögzíthetők. A detektor orientációját is meg kell adni: le, föl, jobbra, balra, előre, hátra irányult mérés közben. Az adatfeltöltés folyamata 6 lépcsős: feltöltés – folyamatkezdés – metaadatok hozzárendelése – küldés – jóváhagyás – on-line térképen történő megjelenés. Az utolsó két lépcsőt már az API rendszergazdák végzik. Tapasztalatunk szerint, a feltöltött adatok egy-két napon belül megjelentek az on-line térképen, és erről visszaigazoló üzenetet kaptunk. A feltöltéshez – alapesetben – ki kell venni az SD-kártyát, behelyezni a kártyaolvasóba és beolvasatni az API-ba. A beolvasás folyamatát egyszerűsítene a beépített bluetooth. Itt azonban néhány „meglepetéssel” találkoztunk, ami a projekt nemzetközi voltaival, és a széles alkatrész- és szoftver (firmware) beszállítói körrel, a nyílt fejlesztői filozófiával van összefüggésben. Például: a nekünk szállított kínai bluetooth-egység nem hajlandó együttműködni minden, a kézikönyvben ajánlott, a jelenlegi mobiltelefonokon futó, iOS, Android operációs rendszerhez írt applikációval. (A közelünkben nem találunk iPhone, Samsung készüléket, amellyel működött volna a bluetooth modul, csak egy Huawei típusút.) A „lökünk” gyógyír lett a kiterjedt levelezőlisták gondos olvasgatása, ahol sok hasonló panasszal találkoztunk (<https://groups.google.com/forum/#forum/safecast-devices>), ez egyben kitűnő nyelvyakadási lehetőség volt.

Első mérési tapasztalatok

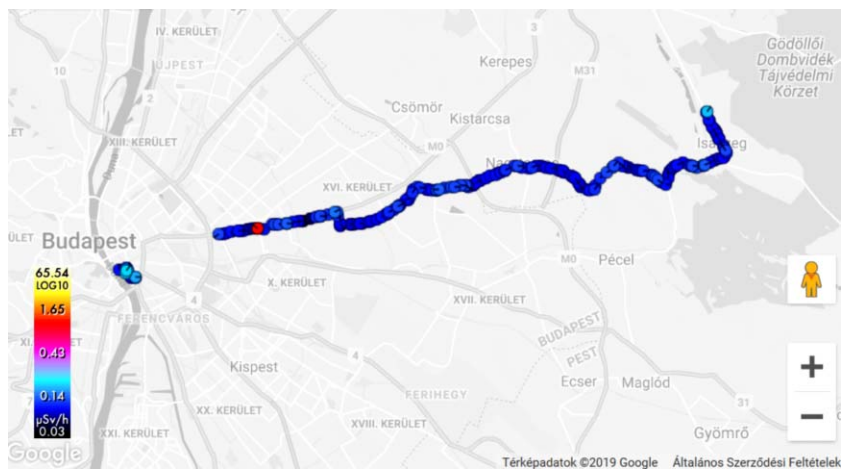
Igazi élményt jelentett, amikor megláttuk az on-line világtérképen saját mérési eredményeinket, amelyek Isaszegről indulva hagytak most már örök nyomot és értékelhető adatokat a világ számára. Igazi kuriózum volt az első piros pont (10. ábra) megpillantása „humán környezetben”, amely már „jelzés értékű”, kiemelkedő sugárdózist mutatott a Magyarországon jellemző természetes éves sugárdózis-értékeket (2,4 mSv) figyelembe véve. Az on-line térképen a pont fölé pozicionálva a kurzort, egy felugró ablak mutatja a mérőponton mért részletes adatokat: 1,08 $\mu\text{Sv/h}$, CPM 360, 2017.12.18 13:20:23 (UTC), 106 m magasság stb. A detektor jelzőszintje, ahol már a készülékben lévő „piros LED” is jelez 350 CPM. Az adatponton mért értéket éves dózisterhelésre átszámítva: 9,46 mSv-t kapunk, amely majdnem négyszerese a „normálisnak”.

Most nyer valódi értelmet a projekt, most töltődik föl igazi tartalommal! Mi is a normális dózisérték, hogyan értelmezzük a mért értékünket? Az Országos Katasztrófavédelmi Főigazgatóság által üzemeltetett jelzőrendszer riasztási szintje: 0,5 mSv! Egy mellkas CT 5,8 mSv terhelés. Az éves dóziskorlát a sugárveszélyes helyen dolgozók számára 20 mSv.

Rengeteg tanulság már az első, még csak „kísérleti jellegű” méréssorozat feldolgozásánál: „egy mérés nem mérés” elv indokoltsága, kontrollmérés szükségessége, egy pillanatnyi anomália nem jelent közvetlen veszélyt, mekkora is a mért érték rizikófaktorát stb. Ezek valódi elemzésére itt most nincs mód kitérni. Azóta már több mint 50 ezer adatponton mértünk és sehol nem tapasztaltunk ilyen értéket.

A projekt továbbfejlesztésének lehetőségei, irányai

Rövid távú terveink: tervezett méréssorozatok végrehajtása atomerőmű látogatáskor, illetve a Mátrában és a Velencei-hegységben. A mért adatok összevetése különböző talajokkal, kőzetekkel. Kereskedelmi forgalomban lévő építőanyagok aktivitásának mérése. Safecast Nyári Tábor tervezése: eszközépítés, mérés. Isaszeg teljes radioaktivitás-térképének elkészítése. Különböző szempontok



10. ábra. On-line térkép a piros adatponttal.

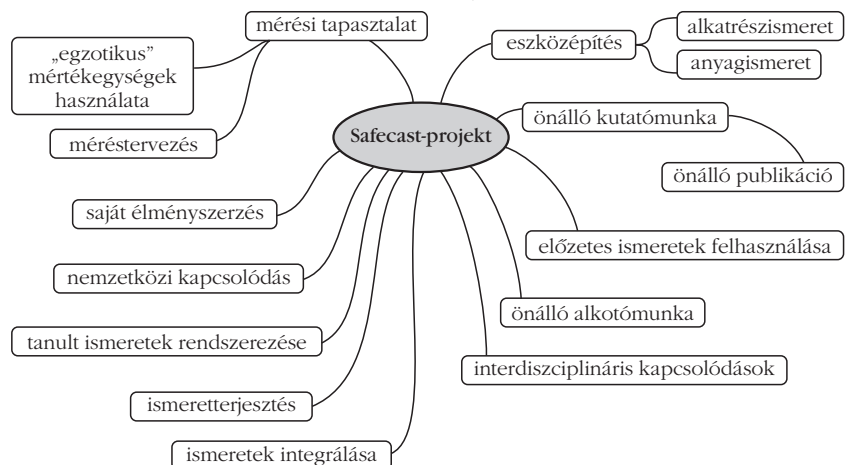
szerinti adatletöltések a Safecast-adatbázisból, és diákoknak irányított adatelemzések szakkörön, nyári fizikátábor keretében. A közvetlen tapasztalatok folyamatos beépítése az aktuálisan tanított tananyagrészekbe. Diákpublikációs tevékenység (11. ábra).

Hosszú távú terveink: Magyarország radioaktivitás-térképének összeállítása. A projekt országos méretűvé fejlesztése.

Irodalom

1. <https://shop.kithub.cc/>
2. <https://github.com/Safecast/bGeigieNanoKit/wiki/Assembly-Manual>
3. <https://groups.google.com/forum/#!forum/safecast-devices>
4. <https://github.com/Safecast/bGeigieNanoKit/wiki/Operations-Manual>
5. <http://www.katasztrofavedelem.hu/>
6. [http://www.haea.gov.hu/web/v3/oahportal.nsf/aca1c323eb58e62dc1257be9002cd900/\\$file/1.48v3.pdf](http://www.haea.gov.hu/web/v3/oahportal.nsf/aca1c323eb58e62dc1257be9002cd900/$file/1.48v3.pdf)
7. Bódisz Dénes: *Atommagsugárzások mérés technikái*. Typotex Kiadó, Budapest, 2006.

11. ábra. A Safecast-projekt felépítése.



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-postacím: elft@elft.hu

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

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

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

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

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

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

JELÖLÉSI/PÁLYÁZÁSI FELHÍVÁS az Eötvös Loránd Fizikai Társulat kitüntető érmeire, valamint felsőoktatási és tudományos díjaira

Az ELFT Díjbizottsága jelöléseket, illetve pályázatot vár a Társulat 2019. évi kitüntető érmeire, valamint felsőoktatási és tudományos díjaira. Kérjük a Társulat szakcsoportjait, területi csoportjait és valamennyi tagunkat, hogy a kitüntetésre érdemes kollégákat és tudományos eredményeiket bemutató javaslataikat legkésőbb **2019. március 19-ig** szíveskedjenek eljuttatni a Társulat titkárságára (1092 Budapest, Ráday utca 18. földszint 3., elft@elft.hu). A tudományos díjakat a kutatók saját kezdeményezésükre is megpályázhatják.

A Társulati díjakra a jelölések/pályázatok benyújtására szolgáló adatlapok letölthetők az ELFT honlapjának díjszekciójából (<http://elft.hu/tarsulatrold/dijak>), ahol egyben az elbírálási eljárás részleteire vonatkozó ismertetés is megtalálható. Kérjük, hogy a jelölések megfogalmazásában vegyék figyelembe az ismertető információit. Az ismertetés minden díjat hozzákapcsol legalább egy szakcsoport kutatási területéhez, amely szakcsoport ajánlásának beszerzése ajánlatos, de nem kötelező. A tudományos díjak elnyerésének nem előfeltétele a társulati tagság.

A mellékletek nagy részének elegendő a nyilvános (speciális esetben a Díjbizottság tagjaira korlátozott) adatbázisokból történő elérhetőségének megadása.

A társulati kitüntetéseket, valamint a tudományos és felsőoktatási díjakat 2019. augusztus 21-én a Sopronban tartandó Magyar Fizikus Vándorgyűlés megnyitóján ünnepélyesen osztjuk ki.

Társulati kitüntetések

Eötvös Loránd Fizikai Társulat Érem adományozható a Társulat azon tagjának, aki a fizika területén hosszú időn keresztül folytatott kutatási, alkalmazási vagy oktatási tevékenységet, valamint a Társulatban kifejtett munkásságával kiemelkedően hozzájárult a fizika hazai fejlődéséhez.

Prométheusz éremmel – „A fizikai gondolkodás terjesztéséért” – tüntethető ki az, aki a fizikai műveltség terjesztéséhez országos hatással hozzájárult.

Eötvös Plakett elnevezésű emléktárgy adományozható annak a társulati tagnak, aki hosszú időn keresztül aktív társadalmi munkával járul hozzá a Társulat egészének vagy valamelyik csoportjának, szakcsoportjának eredményes működéséhez; olyan személynek, aki társadalmi munkában vagy egyéb módon rendkívüli mértékben nyújt segítséget a Társulat céljai



tűzéseinek megvalósításához; neves külföldi vendégnek a Társulat valamely rendezvényén tartott előadása alkalmából.

A két éremre a Társulat Elnöksége tesz javaslatot a Küldöttgyűlés felé, a plakettekről az Elnökség dönt és arról a Küldöttgyűlést tájékoztatja.

Tudományos díjak

A Társulati Díjak különböző időszakokra kiterjedő, a kiválóság eltérő jegyeit hordozó eredményeket ismernek el. Ezeket két fő kategóriába soroljuk.

Életműdíjak

Hosszabb időszakban egyenletesen magas színvonalon, számos tématerületen megnyilvánuló tevékenységet kívánnak elismerni az alábbi, „Életműdíj” kategóriába sorolt társulati díjak:

Bozóky László-díj – „A sugárfizika és a környezet-tudomány területén hosszú időn át végzett magas színvonalú munkásságért, nemzetközi érdeklődést kiváltó eredményekért”;

Bródy Imre-díj – „Magas színvonalú elvi megfontolásokkal a fizika alkalmazásai területén hosszú időn át végzett színvonalas munkásságért, nemzetközi érdeklődést kiváltó eredményekért”;

Selényi Pál-díj – „Az alapvető jelenségek kísérleti vizsgálatában, továbbá azokon alapuló technikai eszközök nagy eredetiségű fejlesztésében hosszú időn át végzett magas színvonalú munkásságért, nemzetközi érdeklődést kiváltó eredményekért”.

PhD fokozat után – MTA-doktori cím előtt díj

Pályájuk induló szakaszán, egységes témakörben, több éven át önállóan folytatott projektben, kiemelkedő nemzetközi visszhangot kiváltott eredményt elért kutatók elismerésére szolgálnak az alábbi, „PhD fokozat után – MTA doktora cím előtti díj” kategóriába sorolt társulati díjak:

Budó Agoston-díj – „Az optika és a molekulafizika területén, elsősorban kísérleti vizsgálatokban elért, jelentős nemzetközi visszhangot kiváltó kiemelkedő eredményért”;

Detre László-díj – „A csillagászatban, valamint bolygónkkal és annak kozmikus környezetével foglalkozó fizikai kutatások területén elért, jelentős nemzetközi visszhangot kiváltó kiemelkedő eredményért”;

Gombás Pál-díj – „A kvantumelmélet atom- és molekulafizikai alkalmazásában, továbbá a statisztikus fizikában végzett elméleti kutatásokkal elért, jelentős nemzetközi visszhangot kiváltó, kiemelkedő eredményért”;

Gyulai Zoltán-díj – „A szilárdtestek és a kondenzált anyag fizikájának kísérleti módszerekkel történő kutatásában elért, jelentős nemzetközi visszhangot kiváltó, kiemelkedő eredményért”;

Jánossy Lajos-díj – „A nagyenergiás fizika (kozmos sugárzás, részecskefizika és nehézion-fizika) kísérleti kutatása és a kísérleti eredmények fenomenológikus értelmezése területén elért, jelentős nemzetközi visszhangot kiváltó, kiemelkedő eredményért”;

Novobátzky Károly-díj – „Az elméleti fizikai kutatásokban elért, jelentős nemzetközi visszhangot kiváltó, kiemelkedő eredményért”;

Schmid Rezső-díj – „Az anyag molekuláris szintű szerkezetét felderítő, jelentős nemzetközi visszhangot kiváltó, kiemelkedő eredményért”;

Szalay Sándor-díj – „Az atom- és atommagfizikában, illetve ezek interdiszciplináris alkalmazási területén elért, jelentős nemzetközi figyelmet kiváltó, kiemelkedő eredményért”;

Szigeti György-díj – „A lumineszcencia és félvezető kutatásokban elért, jelentős nemzetközi visszhangot kiváltó, kiemelkedő eredményért”.

A tudományos díjakból évente összesen legfeljebb hat adományozható, odaítélésük a Társulat Díjbizottságának javaslata alapján az Elnökség hatáskörébe tartozik.

Oktatási díj

Marx György felsőoktatási díj – „A fizika felsőfokú (egyetemi és főiskolai) oktatásában és a tanárképzésben sok évtizedes kiemelkedő alkotó- és nevelőmunkáért”.

Groma István
főtitkár

Kamarás Katalin
a Díjbizottság elnöke

Leybold

ECODRY plus



Száraz, csendes
szivattyú nagy szívó
teljesítménnyel

LEYSPEC



RGA maradékgáz
analizátor

PHOENIX Quadro



Megbízható
tömörségvizsgáló gép
új generációja

UNIVEX



Egyedi vákuum kamrák
minden fajta
alkalmazáshoz

KON-TRADE KFT. 2040 Budaörs, Gyár u. 2.
Telefon: +36 (23) 503-880 • Fax: +36 (23) 503-896 • Email: info@kon-trade.hu



ISSN 0015325-7

