

fizikai szemle



2020/1

Tájékoztató az Eötvös Loránd Fizikai Társulat 2020. évi tagdíjairól

Tisztelt Társulati Tagjaink!

Mindenekelőtt szeretném tolmácsolni a **Társulat Elnökségének üdvözlétét, karácsonyi és újévi jókívánságait** a Társulat tagjainak, a fizika barátainak és a **Fizikai Szemle** valamennyi olvasójának. A Társulat és a **Fizikai Szemle** 2020. évben is változatlan erővel kívánja megvalósítani mindazokat a feladatokat, amelyek betöltésére Alapszabályában vállalkozott.

Kérem, hogy **a 2020. évre vonatkozó tagdíj**ukat, melynek összege **a 2019. évihez képest nem változott**,¹ az alábbiak figyelembevételével szíveskedjenek befizetni.

Ha Ön a Társulatunk **rendes tagja** és

- a **Fizikai Szemle** számaikat **elektronikus formában** kéri, akkor a 2020. évi tagdíja **8400 Ft**.
- a **Fizikai Szemle** számaikat **papíralapú terjesztéssel** kéri, akkor a 2020. évi tagdíja **9000 Ft**.

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

- a **Fizikai Szemle** számaikat **elektronikus formában** kéri, akkor 2020. évi tagdíja **800 Ft** alaptagdíj + **4600 Ft** kiegészítő tagdíj, azaz összesen **5400 Ft**.
- a **Fizikai Szemle** számaikat **papíralapú terjesztéssel** kéri, akkor 2020. évi tagdíja **800 Ft** alaptagdíj + **5200 Ft** kiegészítő tagdíj, azaz összesen **6000 Ft**.

Az alap- és kiegészítő tagdíjat együtt kérjük befizetni.

Ha Ön **nyugdíjas**ként **rendes tagja** a Társulatnak és

- a **Fizikai Szemle** számaikat **elektronikus formában** kéri, akkor 2020. évi tagdíja **3400 Ft**.
- a **Fizikai Szemle** számaikat **papíralapú terjesztéssel** kéri, akkor 2020. 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 tekintsek magukat nyugdíjasnak.

Ha Ön **rendes tagként az Ijúsági Tagozatnak is tagja** vagy a Társulat **ifjúsági tagja**, azaz felsőoktatási intézmény munkaviszonnyal nem rendelkező hallgatója vagy középiskolai tanuló és

- a **Fizikai Szemle** számaikat **elektronikus formában** kéri, akkor **nem kell tagdíjat fizetnie**,
- a **Fizikai Szemle** számaikat **papíralapú terjesztéssel** kéri, akkor kedvezményes tagdíja **4000 Ft**.

A fiataloknak szóló **kedvezmény érvényesítéséhez** szükség van arra, hogy a tag **felsőoktatási hallgatói jogviszonyáról** minden évben **nyilatkozatot adjon le** a Társulat titkárságának (elft@elft.hu).

¹ 2020 januárjától a **Fizikai Szemle** egyes számainak ára 1000 Ft-ra, míg a nyári duplaszámé 2000 Ft-ra változik.

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 2020. 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 az Eötvös Társulat 2019-ben **916 346 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 főtitkára



2020. JANUÁR

A *Fizikai Szemle* 70. évfolyamának első számával köszöntjük Olvasóinkat.

A háromévenként megrendezett Magyar Fizikus Vándorgyűlések a hazai fizikus közélet kiemelkedő eseményei, ahol a fizika különböző területein dolgozó fizikusoknak alkalmuk van személyes találkozásokra és egymás tevékenységének megismerésére. A 2019 augusztusában Sopronban megrendezett, igen sikeres XXX. Magyar Fizikus Vándorgyűlésről a 2019/10 számunkban olvashattak beszámolót. A Vándorgyűlés szervezőinek, az Eötvös Loránd Fizikai Társulat vezetőinek és a *Fizikai Szemle* szerkesztőinek közös célja, hogy a Vándorgyűlésen elhangzott előadások közül a szakmai közérdeklődésre leginkább számot tartók szerkesztett formában folyóiratunkban is megjelenjenek. Így a most induló évfolyam egyes számaiban Olvasóink hónapról hónapra találkozhatnak majd olyan cikkekkkel, amelyeket szerzőik a soproni Vándorgyűlésen elhangzott előadásuk alapján írtak meg és bocsátottak lapunk rendelkezésére. Jelen számunkban ezt a sorozatot *Mezei Ferenc* cikkével indítjuk, amelyből jól érthetően megismerhetjük a különböző gyakorlati és kutatási célokra egyre előnyösebben és gazdaságosabban használható neutronnyalábok előállítási lehetőségeit és az alkalmazások széles körét.

E lapszámunkban egy másik cikksorozat is indul, amellyel a tudományos diákköri tevékenységre szeretnénk ráirányítani Olvasóink figyelmét. A tudományos diákkörök keretében végezhető munkába nyilvánvalóan a tanulmányaik iránt leginkább érdeklődő hallgatók kapcsolódnak be, érdeklődésüknek és elképzelt előmenetelüknek leginkább megfelelő kutatási területekhez, és ezeken a területeken aktív és eredményes tevékenységet folytató témavezetőkhez csatlakozva. A diákköri munkák eredményeiről a hallgatók tudományos diákköri (TDK) dolgozatot írhatnak, amivel indulhatnak a szakterületüknek megfelelő intézményi, majd országos szintű TDK konferenciákon (OTDK), ahol munkájuk eredményeit rövid előadásban is bemutatják. E megmérettetéseken a tapasztalt kutatókból álló szakmai zsűri a benyújtott dolgozat és a konferencián bemutatott prezentáció alapján helyezéseket és díjakat ítélnek oda az általuk legjobbnak választott résztvevőknek, de ha valahol, akkor itt érvényes igazán a „nem a helyezés, hanem a részvétel a fontos” elv. A 2019. évi, XXXIV. Országos Tudományos Diákköri Konferencia szekcióinak üléseit 2019. március 21. és április 26. között 7 városban rendezték meg 16 tudományterületi szekcióban. A konferenciasorozat keretében 492 tagozatban 4118 pályamunkát mutattak be a hallgatók. Az OTDK Fizika, Földtudományok és Matematika Szekciója 2019. április 23–26. között az Eszterházy Károly Egyetem Természettudományi Karán került megrendezésre. A szekció 33 tagozatában 259 pályamunkát mutattak be, az 1–3. helyezettek száma 87 volt. Évfolyamnyitó számunkban a fizika területén született munkák közül az egyik első helyezett, *Asztalos Bogdán Szavak jelentésváltozásának vizsgálata a statisztikus fizika eszközeivel* című cikkét jelentetjük meg. Az érdekes írás meggyőzően bizonyítja, hogy a fizikában megismert módszerek a nyelv vizsgálatára is eredményesen alkalmazhatók. Következő számainkban további OTDK nyertesek írásait is tervezzük közölni.


Lendvai János
főszerkesztő

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

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

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat havonta megjelenő folyóirata.

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

Főszerkesztő:

Lendvai János

Szerkesztőbizottság:

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:

A „Szelek tornya” Athénban. Részleteket lásd a 26. oldali lábjegyzetben. Forrás: https://www.flickr.com/photos/mritz_p/8561303475

TARTALOM

Lendvai János: 2020. január 1
Lévai Péter, Papp Gábor: „A fizika szép” – Búcsú Németh Judittól 3
Személyes hangvételű megemlékezés Németh Judit halálának első évfordulója alkalmából

Mezei Ferenc: Fejlődő perspektívák a neutronnyalábok széleskörű használatában 6

A különböző célokra használható neutronforrások és a neutronnyalábok sokoldalú alkalmazási lehetőségeinek bemutatása

Kovács Tamás: Kiterjedt égitestek körüli gyűrűrendszerek dinamikája 10
Egy törpebolygó gyűrűrendszerének dinamikai modellje

Asztalos Bogdán: Szavak jelentésváltozásának vizsgálata a statisztikus fizika eszközeivel 15

A gépi tanuláson alapuló eljárásokat statisztikus fizikai szemlélettel kombinálva az ezeket leírásához túl bonyolult komplex rendszerek viselkedéséről is tehetünk kvantitatív megállapításokat

VÉLEMÉNYEK

Wojnarovich Ferenc: Tudástermelés a posztdiszciplináris korban 20
A modern kor „tudományosság”-képe, az azt érő posztmodern támadások és az „igazság utáni korszak” veszélyei

A FIZIKA TANÍTÁSA

Stonawski Tamás, Kiss Tamás: A klepszidrák fizikája 25
A folyadékkifolyáson alapuló időmérésre használható edények alakjára vonatkozó megfontolások ismertetése

Vantsó Erzsébet: Tetten ért tudomány: a szupravezetés jelenségének felfedezése, 1911 29

Kamerlingh-Onnes 1911-ben, az első Solvay-konferencián a szupravezetés felfedezéséről tartott előadását és a jelenség elméleti magyarázatának fejlődését mutatja be a cikk

Farkas Zsuzsanna, Torma Gábor: Látványos légnyomásmérés a Szegedi Tudományegyetemen 34

A 11 m magas vízes Torricelli-csővel széles hőmérséklet-tartományban elvégzett mérések, az eszköz validálása, a mérések pontossága és a hibaforrások elemzése

HÍREK – ESEMÉNYEK

Tájékoztató az Eötvös Loránd Fizikai Társulat 2020. évi tagdíjairól 1

Jelölési/pályázási felhívás az Eötvös Loránd Fizikai Társulat kitüntetettjéire, valamint felsőoktatási és tudományos díjaira 36

J. Lendvai: January 2020

P. Lévai, G. Papp: “Physics is beautiful” – Commemorating Judit Németh

F. Mezei: Developing perspectives in wide range application of neutron beams

T. Kovács: The dynamics of ring systems around extended planets

B. Asztalos: Investigation of the meaning changes of words by statistical physical methods

OPINIONS

F. Wojnarovich: Knowledge production in the post-disciplinary age

TEACHING PHYSICS

T. Stonawski, T. Kiss: Physics of hour glasses

E. Vantsó: Science in action: Discovering the phenomenon of superconductivity, 1911

Zs. Farkas, G. Torma: Spectacular air pressure measurement at the University of Szeged

EVENTS

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

megjelenését támogatják:



»A FIZIKA SZÉP« – BÚCSÚ NÉMETH JUDITTÓL

2019. január 15-én, 86 éves korában elhunyt *Németh Judit*. Egy legenda távozott el közülünk. Évek óta betegeskedett, lassan hunyt ki benne a gyertyaláng, ami egykoron inkább máglyára hasonlított, s aki közelébe került, az vagy felmelegedett, vagy megégette magát. Hogy ez a máglya miként lobbant fel, majd miként égett és világított Judit életének nagy részében, azt kortársai tudnák igazán elmondani. De nyolcvanhat év hosszú idő, a kortársak nagy része már eltávozott. Ezért nézzék el nekünk, hogy tanítványként igyekszünk erre a lángra visszaemlékezni. Azt, hogy Judit hogyan izzott fel, életrajzából könnyen megérthetjük. Szerencsére több újságban fennmaradtak nyilatkozatai, történetei életének korai szakaszáról, amelyek ma is elgondolkoztató és tanulságos olvasmányok.



foto: Kármán Tamás, 2005

Németh Judit élete

Németh Judit 1932. október 15-én született Budapesten. Édesapja *Németh László* író, tanár volt, kinek ajánlása és támogatása eredményeként érdeklődése középiskolás korában a természettudományok felé fordult. A háborús évek alatt Budapesten, majd Hódmezővásárhelyen tanult, jórészt magántanulóként. „A matematika-fizika tanulás nekem szórakozás volt” – nyilatkozta néhány évvel ezelőtt. Ezért jelentkezett 1950-ben az Eötvös Loránd Tudományegyetem frissen indult fizikus szakára, ahová sikeres felvételi vizsgát tett. Diplomáját 1955-ben szerezte meg. Végzés után az ELTE-n folytatta gyakornokként, majd egy évig a Központi Fizikai Kutató Intézet Atomfizika Osztályán kutatott.

Ez a mondat nagyon diplomatikusan hangzik, de nagyon sok történelmet, személyes tragédiát, sok-sok küzdelmet takar. *Dörnyei József*, Judit férje, intellektuális és lelki társa, részt vett az 56-os eseményekben, ami természetesen nem maradhatott büntetlenül. Jós-kának és a családnak is bűnhődni kellett. Erről az időszakról nagyon keveset hallottunk Judittól, még akkor is, amikor egy-egy baráti beszélgetés során rákérdeztünk. Annyi azért kiderült, hogy Judit egyenes derékkal, méltósággal és persze daccal viselte az 56 utáni nehézségeket. A csillebérci remeteség szerencsére nem sokáig tartott, egy év múlva tisztázódott, hogy tőle mégsem kellene féltetni az ifjúságot, s így rövidesen ismét folytathatta az ELTE Elméleti Fizika Tanszékén az oktató és kutató munkáját.

Tudományos érdeklődése középpontjában mindig a magfizika legújabb kérdései álltak, amely később kiegészült a csillagok belső folyamatait leíró magfizikai jelenségekkel. 1965-ben védte meg kandidátusi értekezését. Ezután sikeresen elnyert egy egyéves ösztöndíjat az Egyesült Államok-beli Cornell Egyetemre, ahol az 1967-ben Nobel-díjjal elismert *Hans Bethével* dolgozhatott. Közös közleményük a maganyag elméleti leírásáról 1968-ban jelent meg a *Nuclear Physicsben*. A 60-as évek végén Németh Judit volt az Egyesült Államokban a legismertebb Magyarországon élő magyar fizikus. Hans Bethét még többször meglátogatta az USA-ban és Bethe is kétszer járt Magyarországon. Bethénél ismerte meg *Gerald Edward „Gerry” Brownt*, aki Stony Brookban lett vezető professzor. Vele szintén évekig tartotta a szakmai kapcsolatot.

Hazatérése után Németh Judit folytatta az oktató-kutató tevékenységét az ELTE-n. 1972-ben elméleti magfizikai eredményeiért elnyerte a fizikai tudományok doktora fokozatot. Ezt követően rövidesen egyetemi tanárnak nevezték ki az ELTE TTK Elméleti Fizikai Tanszékére, ahonnan 2002-ben vonult nyugdíjba. Professzor emeritaként ezután is tanított, egész 2015-ig, végig követve kedvenc területe, a nukleáris asztrofizika legújabb eredményeit. Az egyetemi katedrán eltöltött 60 sikeres évét tankönyvek, tanulmányok, valamint nemzetközi és hazai tudományos karriert befutott tanítványok fémjelzik.

Tudományos érdeklődése középpontjában az atommagok belsejében található, maganyagnak nevezett, erősen kölcsönható soknukleon-rendszer vizsgálata állt. Világszínvonalon tanulmányozta a maganyag

tulajdonságait, modellezte az ütközéses gerjesztések során mutatott viselkedését. Ezzel meghatározó módon hozzájárult a magyar nehézion-fizikai kutatások megalapításához, szorosan együttműködve *Zimányi Józseffel* és *Lovas Istvánnal*. Az extrém nagysűrűségű maganyag vizsgálata elvezette a neutroncsillagok sikeres tanulmányozásához, s jelentősen hozzájárult a hazai asztrofizikai kutatások nemzetközi színvonalra emeléséhez. Tudományos kutatásainak eredményei a legrangosabb nemzetközi folyóiratokban, közel hetven tudományos publikációban jelent meg.

Munkásságát 1987-ben Akadémiai Díjjal ismerték el. Az MTA levelező tagjává 1998-ban, rendes tagjává 2004-ben választották. Vendégkutatóként több évet töltött rangos franciaországi, németországi és amerikai egyetemeken. A 80-as évektől rendszeresen szervezett hazai workshopokat, külföldi résztvevőket is vonzó nemzetközi konferenciákat. Ezek között is kiemelkedett a Balatonföldre és Tihanyban rendezett Balaton Workshop sorozat, amelyre nagyon sok külföldi kolléga látogatott el, s amely a fiatalabb generációnak is kiváló lehetőséget nyújtott eredményeik bemutatására. A kvarkanyagról rendezett 2005-ös budapesti világkonferencia (Quark Matter 2005) egyik főszervezője volt. Ezek az események jelentős mértékben hozzájárultak a fiatalabb korosztály pályájának sikeres elindításához, a nehézion-fizikai kutatásokba bekapcsolódó diákok karrierjének egyengetéséhez.

Németh Judit óriási szerepet vállalt a 90-es években az akkorra kritikus helyzetbe került magyar fizikusutánpótlás nevelésében. Oktatói munkájának egyik legnagyobb hatású eredménye a Bolyai Kollégium sikeres megalapítása volt, amely intézményt *Horváth Zalánnal* együtt, 1994–96-ban indították el. Judit volt a folyamat motorja, számtalan megbeszélésen győzte meg az embereket a cél támogatásáról, anyagi forrásokat szerzett. Sikeresen elnyerték az akkori rektor és dékán támogatását a Bolyai Kollégium létrehozásához, amely a későbbi igazgatók vezetése mellett az ELTE legkiválóbb diákjainak otthonává, karrierjének kiinduló pontjává válhatott. Németh Judit 2007-ig a Bolyai Kollégium Baráti Körének elnöke volt.

Judit társasági lény volt, rendszeresen szervezett szakmai műhelyeket, de kisebb társaságoknak vacsorákat magánál, nyáron a sajkodi, majd leányfalui nyaralóban nagyobb találkozókat. Ezekre mindig meghívta a fiatal hallgatókat, munkatársakat, és bemutatta őket a szakmájuk csúcán levő magyar és külföldi kutatóknak. Ilyen találkozókból nagyon sok fiatal számára születtek külföldi meghívások, állások.

A diákutánpótlás javításával párhuzamosan a fizikus közösség szervezetebbé tételében is jelentős szerepet vállalt. A 80-as és 90-es években több Fizikus Vándorgyűlés megszervezését irányította, majd az ezredfordulón az Eötvös Loránd Fizikai Társulat alelnöke lett. 2003–2005 között az ELFT elnökeként szervezte a Társulat munkáját. Hazai és nemzetközi kapcsolatait kihasználva igyekezett az ELFT rendezvényeit izgalmasabbá, láthatóbbá tenni, ezzel növelve a Társulat vonzerejét a fiatalok számára. 2006–2007 so-



Testvéreivel, szüleivel és fiával (ő maga jobbra hátul) 1957-ben. (Forrás: www.nemethlaszlo.eu)

rán a *Fizikai Szemle* főszerkesztői feladatát vállalta, majd 2008-tól az Eötvös Társulat tagsága tiszteletbeli elnökké választotta.

Egy 2005-ös, a *Természet Világa* lapnak adott interjúban így vallott a fizikáról: „A fizika ma népszerűtlen. Azt szeretnénk érzékeltetni a középiskolában, az egyetemen és a nagyközönséggel, hogy a fizika mindenütt ott van, minden más tudományban is megtalálható. A kémikusok – a tapasztalatok alapján – felállították a periódusos rendszert, de a fizikusok segítségével magyarázták meg. A számítógéptől kezdve a biológiáig, az orvostudományig mindenhol használják a fizikát. Azt szeretnénk elfogadtatni, hogy a fizika szép.”

Németh Judit nem csak kiváló fizikus és oktató volt, hanem olyan személyiség is, aki az élet számtalan területén irányt mutatott tanítványainak, kollégáinak. Mindenre nyitott személyisége, a szülői házból hozott humán műveltsége, elképesztő irodalmi, képzőművészeti, zenei jártassága példaként szolgált környezetére számára.

Lévai Péter személyes visszaemlékezése

Engedjék meg, hogy egyik meghatározó személyes emlékemet itt visszaidézzem, s én ezzel búcsúzzak Judittól. Az ELTE-n negyedéves koromban nála készítettem tudományos diákköri munkámat. Szeptemberben kezdtem a programozást, nagy lendülettel vettem bele magam a rendkívül érdekes munkába, egyre mélyebbre ástam magam a maganyag viselkedésének modellezésébe, egyre szebben tudtam ábrázolni a számítógépből kikerült adathalmazt. Nagyon élveztem a „kutatómunkát”, Judit útmutatását, a sok-sok tanulás után intellektuális örömet okozott, hogy saját kezűleg számolok ki olyasmit, amit előttem senki nem tett még meg. Teltek a hónapok, közeledett az április, a TDK-dolgozat beadási határideje. Ahogy egyre mélyebbre ástam magamat a nagyenergiás magfizikába, úgy vált világossá, hogy milyen keveset tudok, mennyire vékony jégen is járok. Nagyon sokat foglalkoztam a számolásokkal és a dolgozat elkészítésével is, de szörnyű lassan haladtam. A beadás előtti 72 órában folyamatosan dolgoztam, írtam, számoltam,

rajzoltam, két éjszakát nem aludtam. Végül sikerült összeraknom és határidőre benyújtanom a dolgozatot úgy, hogy az utolsó 3 napban Judit is folyamatosan kommentálhatta, majd a beadás előtt átolvashatta.

A beadás után néhány nappal tartott TDK-konferenciára ezek után már könnyű volt elkészíteni a bemutató fóliákat (nagy részüket kézzel rajzoltam, akkoriban még gyerekcipőben járt a „vizualizáció”, csak a szuperszámítógépek mellett léteztek megjelenítő szoftverek). Előadásommal és dolgozatommal itt I. díjat nyertem. Nagyon örültem, madarat lehetett volna fogatni velem. Megkerestem Juditot az irodájában, s büszkén meséltem a történeteket. Látszott rajtam, hogy nagyon szeretném, ha a dicséretével tenné fel Judit a pontot a napra. Ami valahogy a következőképpen meg is történt: „Péter, amit az elmúlt hónapokban csinált, az eléggé kétségbeesítő volt számomra. Talán ott, a beadás előtti 3 napban, ott mutatott elfogadható teljesítményt. Örülök, hogy jól sikerült az előadása.” Ezek a mondatok mélyen belém égtek. Akkor kaptam betekintést, hogy miként is vélekedik Judit a minőségről, miként is van az ő zsinórmértéke kalibrálva, amivel megmérettetünk – s mennyire nehéz lesz ezen a pályán a „kiválóan megfelelt” minősítést megkapni. Pályám során mindig előttem lebegtek hivatkozott szavai. Ez az üzenet mozgatott, s segített abban, hogy most akadémikusként, kutatóintézeti főigazgatóként abban a megtiszteltetésben lehet részem, hogy visszaemlékezhetek egy nagyszerű ember, egy kiváló tudós, egy igazi példakép életére és munkásságára.

Papp Gábor személyes visszaemlékezése

Már általános iskolától érdekelt az elméleti magfizika, így az egyetemen Judithoz kerültem diplomamunkára. Nagyon meglepődtem, amikor észrevettem, hogy számára a fizika „játék” volt: nemcsak szoros szakterületének eredményeit követte nyomon, az új ötleteket saját kezűleg írta be számítógépes programokba, és élvezettel figyelte, hogy a különböző beállítások milyen eredményt adtak. Mivel a számítógépidő nem volt bőségben Magyarországon, a futtatásokat külföldi látogatásai során végezte. Személyes kapcsolatait felhasználva doktoranduszként engem is „beajánlott” kollégáinál, és így kerültem ki különböző helyekre Németországban, majd szereztem meg első két posztdoktori állásomat is Darmstadtban és Heidelbergben.

Első feladatomban sem tipikus magfizika volt, az ötletet Judit a fizika másik területéről vette, hogy vajon a magokban megfigyelhető-e a „viszkózus ujjasodás”-nak nevezett jelenség, ami például akkor lép fel, amikor mézbe vizet nyomunk: a víz „ujjak” mentén nyomul a mézbe. Saját kedvenc területe is határterület volt, a magfizika és az asztrofizika kombinációja, ami az anyag legkisebb és legnagyobb struktúráit egyesíti.

Világpolgár volt, akárhova mentünk, mindenütt otthon érezte magát, és régi barátként üdvözölték. Temeztésén nagyon találóan hangzott el, hogy „Judit szerette az embereket, és az emberek szerették Juditot”.

Támogatta, hogy tanítványai is kitekintsenek más területek felé: megvolt benne az alázat a tudomány iránt, hogy nem értékelte túl saját területét, azt tartotta, hogy a fizika mindenütt szép. Tanítványait segítette azzal, hogy kezdeti témát adott nekik, megismertette a kutatás módszereivel, átadta kapcsolati hálóját, megadta nekik az első „lökést”, de utána hagyta, hogy megtalálják saját érdeklődési területüket, és segített nekik az első állás megtalálásában.

Mindig azt tanította tanítványainak, hogy minőségi kutatást végezzenek: nem az a jó kutatás, ami csak a saját kis csoportját érdekli, meg kell állni helyünket a nemzetközi szakmai közösségekben is. Ezért is ismerték el világszerte, megbíztak véleményében, ha egy ifjú kutatót ajánlott kollégái figyelmébe.

Sokszor voltunk együtt külföldi látogatásokon, rendezvényeken. Ilyenkor is nagyon nyitott, közvetlen volt, rengeteget beszélt másik nagy hobbjáról, az angol történelemről. Közvetlensége olyan átütő volt, hogy még a nagyon formális Németországban is „Judit” tudott lenni a „Frau Professor Doktor Hab” hivatalos megnevezések helyett.



Németh Judit 60 éves oktatói és hasonlóan hosszú, nemzetközileg is sikeres kutatói pályája ért véget 86 éves korában. Búcsúzunk tőle munkatársai, tanítványai, és mindazok nevében, akiket az elmúlt évtizedekben lenyűgözött előadásaival, nyitott és sugárzó személyiségével, a fizika irányába mutatott szeretetével és lelkesedésével.

Lévai Péter és Papp Gábor

Németh Judit írásai a Fizikai Szemlében

A magreakciók elmélete I–III.	1958/253, 281, 316
Atommagok töltés- és anyageloszlása	1968/235
A csillag belsejének fizikai állapota I–II.	1972/97, 135
Néhány megjegyzés a kutatási számítógép kapacitással kapcsolatban	1972/224
Csillagfejlődés végállapotai	1972/328
Sűrűségfüggő erők alkalmazása magszerkezeti számításokra I–II.	1974/144, 372
„Korrelációk atommagokban” Szimposium, Balatonfüred, 1973	1974/157
Előszó egy Németh László töredékhez	1985/335
Effektív magerők a magfizikában	1987/60
Nukleáris tél I–II.	1987/385, 418
Asztrofizika költőknek – vagy mit mondanak az atommagok az Univerzumból	1996/6
Szupernóva-robbanás	1997/167
Kozmológia az ezredfordulón	2000/297
A Yukawa-potenciáltól a relativisztikus magerőkig	2000/339
Marx György és a magyar kozmológia	2002/139
A természettudomány és a természettudományos oktatás szerepe a 21. században	2003/229
Mi az a sötét energia?	2004/1
Fizika és társadalom	2005/4
Hans A. Bethe, a magfizika és a nukleáris asztrofizika egyik szülőatyja	2006/234
A sötét anyag (Szabados Lászlóval)	2006/362
A fekete lyukak	2007/180
A változatos fizikusélet – Beszélgetés Németh Judittal 75. születésnapja alkalmából (Fái Györggyel)	2008/334
Természetes, hogy a Világegyetem alkalmas az élet számára? (Szabados Lászlóval)	2010/73
Búcsú Toró Tibortól	2010/429

FEJLŐDŐ PERSPEKTÍVÁK A NEUTRONNYALÁBOK SZÉLESKÖRŰ HASZNÁLATÁBAN

Mezei Ferenc
Mirrotron Kft. és Wigner FK.

Az elmúlt hét évtizedben a neutronnyalábok szórásának vizsgálata szerves része lett az anyagkutatás igen számos területének. A példák a mágnességantól kezdve az élő szervezetek molekuláris szerkezetének és folyamatainak vizsgálatán keresztül az archeológiáig sok-sok tudományterületet fednek át. Az ehhez szükséges neutronnyalábok előállítása különböző elvi alapokon működő neutronforrások feladata, amelyek közös eleme, hogy a neutronokat az atommagok belső felületén elfoglalt kötött állapotból valamilyen magreakcióval kell kiszakítani. Ha ez a folyamat exoterm (maghasadás, fúzió) jelentős mennyiségű hő szabadul fel, amit el kell vezetni. Ha a folyamat endoterm (például energetikus protonokkal, gamma-sugárzással való besugárzás), akkor a beérkező sugárzás leadott energiáját kell elvezetni. Végülis technikai szempontból a neutronkibocsátás helyén megjelenő hőtermelés jellemzi a folyamat gyakorlati megvalósításának legfőbb körülményeit. Így például atomreaktor-neutronforrásokat a neutrontermelő maghasadás hőteljesítményével jellemzik, ami a KFKI telephelyen működő középfluxusú neutronforrásnak megfelelő kutató atomreaktor (BKR) esetében 10 MW. A gyorsított részecskenyalábokon alapuló neutronforrások esetében a gyorsított részecskenyaláb kinetikus energiája a hasonló jellemző, például a svédországi Lundban épülő Európai Spallációs Neutronforrás (ESS) protongyorsítójának tervezett nyalábteljesítménye 5 MW. Továbbá léteznek olyan neutronforrások, amelyekben radioaktivitás révén keletkeznek neutronok, és amelyeket így nem jellemez a hőteljesítmény, de ezek neutronintenzitása a következőkben ismertetendő alkalmazásokhoz túl alacsony.

A neutronforrásokban a neutron kibocsátó magreakció révén mindig jórészt nagyenergiájú neutronok születnek, szabadulnak ki a magokból. A születő neutronok spektrumának túlnyomó része 1 MeV-et meghaladó kinetikus energiájú gyors neutron. A forrásokat elég jól jellemzi a felszabadított és a neutron-

forrás aktív zónájából kibocsátott gyors neutronok másodpercenkénti száma. Ez az ESS esetében körülbelül $10^{18}/s$ lesz, míg a hazai BKR-nél körülbelül $3 \cdot 10^{17}/s$. E két utóbbi és a korábban említett teljesítményadatok jól illusztrálják, hogy a spallációs eljárás az atomreaktorokénál körülbelül egy nagyságrenddel kevesebb hőteljesítményt igényel ugyanannyi nasszens neutron előállításához, és így a legnagyobb neutronintenzitások előállítására a spalláció a legelőnyösebb magreakció. Mivel spalláció létrehozásához 200 MeV energiát jóval meghaladó protonokkal való besugárzás szükséges, a spallációs források létesítési költségei magasak, például az ESS esetében 1000 milliárd Ft. A BKR létrehozása – mai árakon – elérné a 300 milliárd Ft-ot.

Az elmúlt 10–20 évben olyan protongyorsítóra épülő neutronforrások jelentek meg (egy az USA-ban és több mint 10 Japánban), amelyben protongyorsítókat használnak – mint a spalláció esetén –, de a protonokat tipikusan csak 5–10 MeV-re gyorsítják, ami sokkal kisebb, mint például az ESS tervezett 2 GeV-es protonenergiája. Az ilyen kis energiájú gyorsítók elférnek egy osztályteremben, építési és üzemelési költségeik pedig mintegy 1%-át teszik ki a mai spallációs forrásokban használt 0,5–3 GeV energiájú gyorsítók költségeinek. Ezekben a protonok könnyű elem (lítium vagy berillium) atommagjaival ütközve vernek ki neutronokat, és másodpercenként körülbelül 10^{12} – 10^{13} gyors neutron tudnak előállítani. Az ilyen típusú berendezések „kompakt neutronforrás” vagy (az angol kifejezés „compact accelerator based neutron source” rövidítésével) CANS néven lettek ismertek.

A teljesség kedvéért érdemes megemlíteni, hogy a még sokkal olcsóbb, még kisebb energiájú gyorsítókra alapuló, akár hordozható, úgynevezett Elektronikus Neutron Generátorok (ENG) tipikusan 10^8 gyors neutron tudnak előállítani másodpercenként. Ilyeneket nagy számban használnak ipari és biztonsági feladatok megoldására (például robbanószerek, nukleáris anyagok illegális szállításának felderítésére). Ezek neutronfluxusa azonban nagyon távol van azon értéktől, amire az atomi méretű jelenségek vizsgálatához lenne szükség a kondenzált anyagokban.

A kompakt neutronforrások megjelenése időben egybeesett egy gazdasági probléma megjelenésével, a neutronnyalábokat előállító források első generációjának kiöregedésével és a mostanra igen drágává vált felújítás helyetti leállításával. E generáció legtöbb képviselője maghasadáson alapuló kutatóreaktor, amelyek több mint 50–60 évvel ezelőtt épültek (mint például a 60 éve üzemelő BKR). Az elmúlt 10–15 évben 8 ilyen jelentős kutatóreaktort állítottak le Európában. Ezzel a hazai BKR – az ESS jelentős részének

Készült a 30. Magyar Fizikus Vándorgyűlésen (Sopron, 2019. augusztus 21–24.) elhangzott előadás alapján.



Mezei Ferenc sikeres gimnáziumi sportja a KöMaL-feladatok megoldása volt. Az ELTE-n fizikusként végzett 1965-ben, majd a KFKI-ban dolgozott. 1972-ben a itt fedezte fel Neutron Spin Echo és 1976-ban a neutron szupertükrök elvét, amelyekért 1986-ban Europhysics Díjat kapott. Később a Laue-Langevin, a Hahn–Meitner és Los Alamos intézetekben dolgozott vezető kutatóként. Az épülő ESS európai neutronkutató központ tanácsadója és a neutronműszer-spezialista Mirrotron Kft. vezetője.



A kompakt protongyorsító, öltönyben a szerző, Mezei Ferenc.

jó néhány év múlva esedékes üzembe helyezéséig – az ötödik legjelentősebb neutronforrássá lépett elő kontinensünkön. Emellett legalább 4 európai országban merült fel az az elképzelés, hogy kompakt neutronforrásokkal váltsák ki a leállított reaktorokat. Ez azt jelenti, hogy körülbelül 1000–10 000-szer kevesebb neutron előállító források állnak be a régi reaktorok helyett, igaz hogy az újjáépítési és üzemeltetési költségek kevesebb, mint 10%-át kitevő költségek mellett. Miért lenne ennek értelme?

A neutronforrásokban keletkezett gyors neutronokat – ha a neutronszorási kísérletekben akarjuk felhasználni – először több mint 1 milliószor kisebb energiákra kell lelassítani, hiszen hullámhosszuk ekkor lesz összemérhető a vizsgálandó anyagok atomjai közötti távolsággal. Ez szilárd testekben és folyadékokban tipikusan 0,2–0,5 nm. Ilyen hullámhosszú neutronok kinetikus energiája 50–300 K hőmérsékletű részecskék Boltzmann-energiájának felel meg, ezért hideg vagy termikus neutronoknak nevezik őket. A lelassítás (termalizálás) után pedig az ilyen lassú neutronokból álló nyalábokat a neutronokat mérő berendezésekhez (összefoglalva spektrométerekhez) kell eljuttatni, ahol a mintákon való szóródásukból (azaz sebességük irányának és nagyságának változásából) lehet következtetni arra, hogy a vizsgált anyagban miként vannak elrendezve és hogyan mozognak az atomok. Ehhez természetesen ismerni kell a neutronok kiindulási sebességét és irányát, amit monokromatizálás és

kollimációs eljárások révén érnek el. E három folyamat eredményeként a forrásban előállított száz millió – eredetileg folytonos energiaeloszlású, gyors – neutron közül kevesebb, mint egy jut el a minták helyére az egy forrás körül tipikusan üzemeltetett 20–40 spektrométer valamelyikén.

Az utóbbi évtizedekben kidolgozott, jobb hatásfokú kísérleti eljárások eredményeként ma a gyors neutronok közül, a kísérletek típusától függően 1000–100 000-szer többet lehet lelassítani és a mintákhoz elvezetni, mint amennyi akár csak 20 évvel ezelőtt eljutott a kutatóreaktorok köré épített spektrométerekbe. Ezen fejlesztések közül a két legfontosabb – folytonos üzemű reaktorok helyett – a tipikusan 0,5–2 ms időtartamú, a szakmában „hosszúnak” nevezett impulzusokban

előállítani a gyors neutronokat, másrészt az úgynevezett szupertükrök használata a lassú neutronnyaláb vezetéséhez – a forrástól a felhasználási pontig. Mindkét eljárás Budapesten született.

A lassú neutronok sebessége az 1000 m/s értékkel mérhető össze, ezért az impulzusüzemű forrástól 15–100 m távolságban elhelyezett spektrométerekhez – a sebességtől függő, könnyen regisztrálható – különböző időkésséssel jutnak el, azaz így a spektrométerig eltelt repülési idő alapján minden pillanatban tudjuk, hogy mekkora a bejövő neutronok sebessége. A folyamatosan működő forrás esetén a neutronsebességet csak úgy lehet beállítani, hogy a kiválasztott, nagyon szűk sebességtartományba eső neutronok kivé-

Az protongyorsítóhoz kapcsolt berilliumtartalmú neutronforrás, -moderátor és árnyékolás.

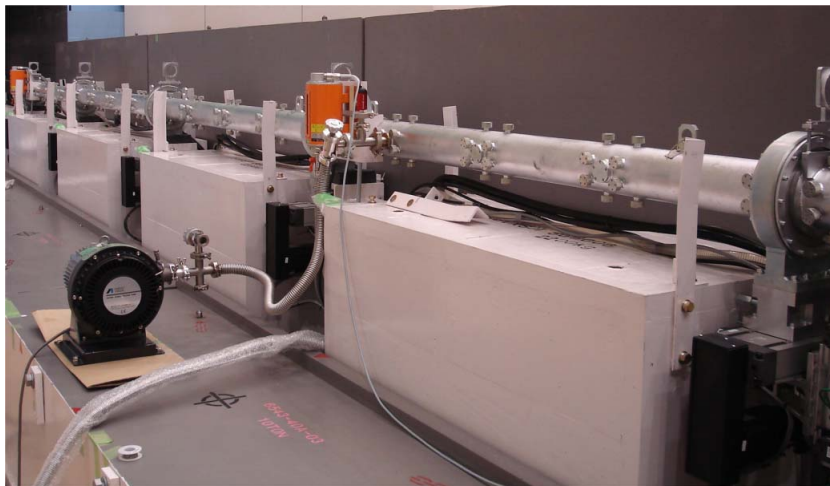


telével az összes többit kiszűrjük a nyalábból és megsemmisítjük. Így hosszú impulzusú üzemben körülbelül annyiszor több, ismert sebességű neutron érkezik a mintákra, mint a forrás impulzusai között eltelt periódusidő és az impulzushosszak aránya, feltéve hogy az impulzusok hossza elég nagy ahhoz, hogy a neutronsebesség ilyen módon való meghatározása – a szükségeshez képest – ne legyen túlságosan pontos. E módszerrel mintegy 20-szorosára lehet növelni a lassú neutronok kihasználása határfokát.

A lassúneutron-nyalábok spektrométerekhez való eljuttatása is olyan terület, ahol sokat fejlődött a technika. Hosszabb távolságokra – szabad repülés helyett – már évtizedek óta neutronvezető csövekben – amelyek tükörfelületű falai a kis szögekben rájuk eső neutronokat visszaverik és így a transzportált nyalábban tartják – repülnek a neutronok. Az 1976-ban felfedezett szupertükrök nagyobb szögterületben tudják visszaverni a neutronokat és ezért több neutront tudnak a neutronvezető csőben tartani, különösen, ha a vezetőcsövek alakja optikai megfontolások alapján optimalizált. A szupertükörrel bevont neutronvezetők körülbelül 20 év óta szisztematikusan veszik át a terepet. Velük újabb 10–20-szorosára javíthatjuk a neutrontranszport határfokát.

Az ESS-ben nemrég, sok más próbálkozás után, a gyors neutronokat lelassító moderátorok teljesítményét is sikerült növelni oly módon, hogy a moderátorok a termalizált neutronokat a kívánt irányokban – valamilyen prioritással – bocsássák ki. A gyakorlatban ez egy vízszintes, a műszercsarnok padlójával – amelyen elhelyezkednek a spektrométerek – párhuzamos síkot jelent. A neutronok a folyékony hidrogént vagy vizet tartalmazó palackokban található hidrogénatomokkal való ütközések és energia-csere útján lassulnak le. Ha csak egy ütközést veszünk figyelembe, akkor a lelassult neutron minden irányban nagyjából azonos valószínűséggel szóródik. Azonban a neutronok – mielőtt kijutnak a moderátor térfogatából – többször is ütköz(het)nek, és azt találtuk, hogy a moderátorpalack alakja valamelyest irányítja a kirepülő neutronok pályáját. Alacsony dimenziós alakokkal (sematikusan rúd vagy korong) lelassított hideg neutronok kibocsátásának intenzitása növekszik a moderátoredény hosszabb dimenziói irányában. Ezáltal 2–3-szor nagyobb nyalábfényességet lehet elérni – például a vízszintes síkban haladó nyaláboknál –, mint a korábban használt moderátorgeometriák mellett.

Az eddig felsorolt 3 módszerrel az eredetileg létrejött gyors neutronok közül 400–1200-szor több termalizált neutront lehet felhasználni. A spektrométerek fejlesztésének további újításaival, többek között a nagyobb szögterületet lefedő detektorok alkalmazásával – esetektől függően – újabb 3–100-szoros fak-



Egy, a Mirrotron Kft. által gyártott neutronvezető cső.

torral lehet növelni a spektrométerekben megfigyelt lassú neutronok számát. A teljes kihasználási határfok-növekedés, a kísérletek típusától és részleteitől függően, körülbelül 1000-szeres és 100 000-szeres között van. E módszereket, természetesen, rendszeresen alkalmazzák az újonnan épülő vagy felújított legnagyobb teljesítményű neutronforrásokban is. Ez a haladás minőségi oldala a nagyobb kísérleti érzékenységek felé, amelyekkel eddig nem megfigyelhető új jelenségek kerülhetnek napvilágra.

A megtermelt gyors neutronok nagyobb határfokkal való felhasználása más irányban is komolyan gyümölcsötterthető, ugyancsak új perspektívákat nyit: a neutronkutató centrumok sokkal kevesebb gyors neutron előállítására árán tudják azt az érzékenységet és mérési kapacitást elérni, mint 20 évvel ezelőtt. Emiatt a neutronnyalábok használata sokkal hozzáférhetőbbé válik mind a helyigényt, mind a biztonsági kívánalmakat, mind a költségeket illetően. Ez különösen az ipari alkalmazások szempontjából fontos, ahol az alacsonyabb költségek és könnyebb hozzáférhetőség döntő szerepet játszhatnak.

Egy konkrét példa a szerkezeti anyagok belsejében kialakult feszültségek vizsgálata. A neutronsugarak még vasban is akár 20 cm mélyen behatolnak és lehetővé teszik, hogy egy alkatrész egész térfogatában körülbelül 0,5 mm térbeli felbontással, mintegy 0,01% pontossággal meghatározzuk a kristályrács rácsállandóit. A feszültséget a rácsállandó eltérése – a nominális, egyensúlyi értékétől, ami akár 0,1% is lehet – mutatja. A módszert sok neutronforrás mellett használták és használják különféle ipari problémák megoldására. Többek között ide tartozik hegesztések körül keletkező feszültségek detektálása, feszültségcsökkentő hőkezelési eljárások vizsgálata, vasúti sínek elhasználódásának kutatása, motortengelyek terveinek ellenőrzése, használat során felhalmozódó húzófeszültségek és az ezektől származó törésveszély vizsgálata, különös tekintettel a járművekre. Egy nem is oly régi példa a német ICE gyorsvasút kerekének eltörése miatti, sok áldozatot



A Mirrotron Kft. martonvásári telephelyének alapkövetétele, 2018. június 8.

követő baleset okainak vizsgálata (Eschede, 1998). Csak a baleset után került sor az eltörött keréktípus már használt darabjaiban kialakult feszültségek vizsgálatára. A neutronos mérések az elfogadott elméletekkel össze nem egyeztethető húzófeszültségeket tártak fel a kerék azon helyén, ahol nagy sebességnél bekövetkezett a balesetet okozó törés.

A fent leírt neutronfelhasználási határfok-növekedés révén ilyen típusú vizsgálatok olyan kis méretű, kompakt neutronforrások mellett is lehetségessé válnak, amelyek építése a korábbiak töredékébe, körülbelül 2 milliárd Ft-ba kerülnek, üzemeltetésük költségei évi 100 millió Ft alatt maradnak, és akár egy vállalatnál, egyetemen vagy ipari parkban is elhelyezhetők.

Európában az első ilyen ipari és alkalmazott kutatási célokra szánt kompakt neutronforrás a Mirrotron Kft. új, erre a célra felépített martonvásári telephelyén – a strukturális alapok regionális iparfejlesztési támogatásával – jelenleg készül és 2021-ben kezdi el működését. A fent említett kihasználási határfokot növelő modern módszerek kompakt neutronforrásoknál még körülbelül egy 4-szeres szorzóval kedvezőbb eredményt adnak, mert a kis hőfelszabadulás miatt a moderátorok közelebb kerülhetnek az aktív zónához (ami itt gyorsított nyalábot felfogó target), mint például egy reaktorban. E prototípus megvalósítása lehetővé fogja tenni hozzá hasonló, körülbelül $3 \cdot 10^{12}$ neutron/s intenzitású neutronforrás sorozatgyártását és értékesítését is. Ezen túlmenően segíteni tudja nagyobb, a körülbelül 5 kW teljesítményű helyett 50–100 kW-os kompakt források kifejlesztését. Ezek a neutronszorási alkalmazások területén már meg tudják haladni a középfluxusú reaktorok teljesítményét, és az elkövetkező évtizedekben fel tudják váltani az öregedő kutatóreaktorokat. Minden, eredetileg kutatóintézetben kifejlesztett és használt eszköz előbb-utóbb hatékonyabban, kevesebb költséggel és rövidebb idő alatt állítható elő ipari körülmények között, ha létezik felvevő piac. A kompakt neutronforrások előállítása nagyon közel áll ahhoz, hogy ebbe fázisba érkezzen.

A fent leírtak a teljesítmény/költség arány viszonylatában egyértelműen generációváltást jelentenek ott, ahol jól definiált sebességű és kollimált neutronnyalábokat használunk, azaz például a neutronos anyagvizsgálatban.

A besugárzás jellegű anyagtranszformálás a neutronforrások egy másik felhasználása. Ilyen például neutronaktivációs analízis, vagy a klíma- és környezetvédelem szempontjából messze legkedvezőbb és nélkülözhetetlen atomerőművi energiatermelés fel nem használható hulladékának transzmutációs feldolgozása. Ezekben az alkalmazásokban elektromos energia segítségével sok

gyors neutront kell előállítani, azaz a teljesítményt az adott áramfogyasztásból nyert neutronok mennyisége jellemzi. Itt, mint korábban láttuk, a spalláció a legjobb ismert eljárás, ahol körülbelül 30–40 MeV gyorsított protonnyaláb-energia kell egy gyors neutron előállításához. Ha figyelembe vesszük, hogy még a leghatékonyabb gyorsítók is a hálózathoz vett elektromos energia csupán 40–45%-át alakítják protonenergiává, akkor $80\text{--}90 \text{ MeV} = (1,3\text{--}1,45) \cdot 10^{-11}$ joule elektromos energiába kerül egy gyors neutron előállítása. Az utóbbi években rohamosan fejlődtek és egyre gazdaságosabbá váltak a rövid, nagyintenzitású lézerpulzusok keltette neutronokon alapuló források. E területen a jövő fogja megmutatni, hogy hosszú távon melyik a leg gazdaságosabb eljárás. A spallációs neutronforrás használatáról már tudjuk, hogy lehetővé teszi az atomhulladék fennmaradó, hosszú ideig radioaktív komponenseinek transzmutálását kedvezően tárolható izotóppokká, vagy akár a bőven található tórium transzmutálását hasadóképes fűtőanyagká. Mindezt olyan energiabefektetéssel, amely csak csekély részét teszi ki a kapcsolódó nukleáris elektromosenergia-termelésnek.

A bőséges atomenergia kérdése annál is inkább aktuális, mert óriási, sokak szerint elengedhetetlen mértékben járulna hozzá a klímaprobléma mielőbbi megoldásához. Évtizedek óta ismert és kidolgozott technika a szintetikus benzin, kerozin stb. gyártása vízből és a levegőből kinyert szén-dioxidból – atomreaktor segítségével. Ezzel klímaneutralisan működhetnének a konvencionális autók és repülőgépek. Az így előállított benzin önköltsége ma 1 euro/liter. Természetesen ehhez még hozzájönnek szállítási és forgalomba hozási költségek, de ezek nagyfogyasztók – mint repülőterek – esetében nem lennének jelentősek. A környezeti következmények tényleges költségeit is beszámítva a kőolajalapú üzemanyag sem olcsóbb, viszont nagyon káros és fenntarthatatlan. A világgazdaságot vezető országok politikája óriási baklövést követett el, amikor a fosszilis energiaforrások rövidlátó rablógazdaságát pár évtizeddel ezelőtt nem váltotta fel a nukleáris energiatermelés széles körű kiépítésével.

KITERJEDT ÉGITESTEK KÖRÜLI GYŰRŰRENDSZEREK DINAMIKÁJA

Kovács Tamás

Eötvös Loránd Tudományegyetem, Elméleti Fizikai Tanszék

Naprendszerbeli óriásbolygó körül gyűrűt először, a 17. század elején *Galileo Galilei* figyelte meg. Kezdetben egyáltalán nem volt biztos, hogy amit Galilei lát, az a Szaturnusz körülvevő gyűrűrendszer. Később *Christiaan Huygens* és *Giovanni Domenico Cassini* megfigyelései tették egyértelművé, hogy a gázóriás gyűrűjét egyenlítője felett több, réssel elválasztott, különálló gyűrű alkotja. A csillagászati műszerek fejlődésével, valamint további óriásbolygók felfedezésével világhosszú vált, hogy nem csak a Szaturnusz veszi körül, hanem a gázóriások mindegyikéhez tartozik – igaz, fizikai paramétereikben más és más – gyűrűrendszer.

A közelmúlt Naprendszerrel kapcsolatos felfedezései közé sorolhatjuk, hogy mind kentauro-típusú objektumok¹ [1], mind pedig Neptunuszon túli törpebolygók [6] körül is felfedeztek gyűrűket. Ez utóbbiakra példa a (10199) Chariclo és a (136108) Haumea. Önmagában véve nagyon érdekes az a tény, hogy gyűrűrendszer ilyen kis égitestek körül is kialakulhat és valószínűleg hosszú ideig ott is maradhat. Mindemellett számtalan kérdést felvet a gyűrűrendszerek létezése. E cikkben a Haumea törpebolygó gyűrűjének dinamikai vizsgálatát mutatjuk be egy egyszerű dinamikai modellen keresztül.

A Haumea

A Haumea 2005-ben felfedezett törpebolygó a Kuiper-övben. Pályája (átlagos távolsága a Naptól 43,2 CSE) túlnyúlik a Neptunusz pályáján, így keringési ideje is hosszú: nagyjából 285 év. Tengely körüli forgása viszonylag gyors, körülbelül 4 óra, sűrűsége $\sim 1,8$ g/cm³, tömege $4 \cdot 10^{21}$ kg. A mérések azt mutatják, hogy alakja leginkább egy háromtengelyű ellipszoiddal közelíthető, amelynek féltengelyei $a = 1161 \pm 30$ km, $b = 852 \pm 4$ km, $c = 513 \pm 16$ km. A törpebolygó

A munkát az Emberi Erőforrások Minisztériuma ÚNKP-18-4 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programja támogatta.



Kovács Tamás csillagász, az ELTE Elméleti Fizikai Tanszékének munkatársa. Doktori értekezését égi mechanikából írta. Jelenlegi érdeklődési területei a nemlineáris dinamikai rendszerek, idősor-analízis, komplex hálózatok, valamint fázistérbeli transzport statisztikus fizikai leírása és ezek csillagászati alkalmazásai. Bolyai-ösztöndíjas. A Fizika Tanítása Doktori Iskola aktív témavezetője.

körül két kisebb hold is kering, a Hi'iaka és a Nani-ka, rendre 40 000 és 25 000 km távolságban. Magyar közreműködéssel 2017-ben [6, 7] publikálták a Haumea körül felfedezett, nagyjából kör alakú, 70 km széles gyűrűt, amely a megfigyelések alapján 2287 km-re kering a bolygó egyenlítői síkjában. Érdekes megállapítás volt továbbá, hogy a gyűrű pozíciójából fakadóan, az alkotó részecskék Haumea körüli keringési periódusa a törpebolygó tengely körüli forgásának harmada. Ezt 3:1-es közepmozgás-rezonanciának nevezzük. A továbbiakban a 3:1-es rezonancia részletesebb vizsgálatával foglalkozunk.

Numerikus modell

A gyűrű dinamikáját számítógépes modell segítségével vizsgáljuk, amelynek során egy nagyobb tömegű központi égitest körül követjük sok, egymással nem kölcsönható, tömeg nélküli részecske mozgását. Ez lényegében gravitációs kéttestproblémák vizsgálata, ami sok érdekességet nem hordoz magában. Van azonban néhány dolog, amit – bár a problémát egyszerűsített képpel tárgyaljuk – nem hagyhatunk figyelmen kívül:

1. a gyűrű az égitest méreteihez képest olyan közel kering, hogy a Haumeát már nem tekinthetjük pontszerűnek, így az alakjából adódó deformációt a gravitációs erő számolásakor figyelembe kell venni;

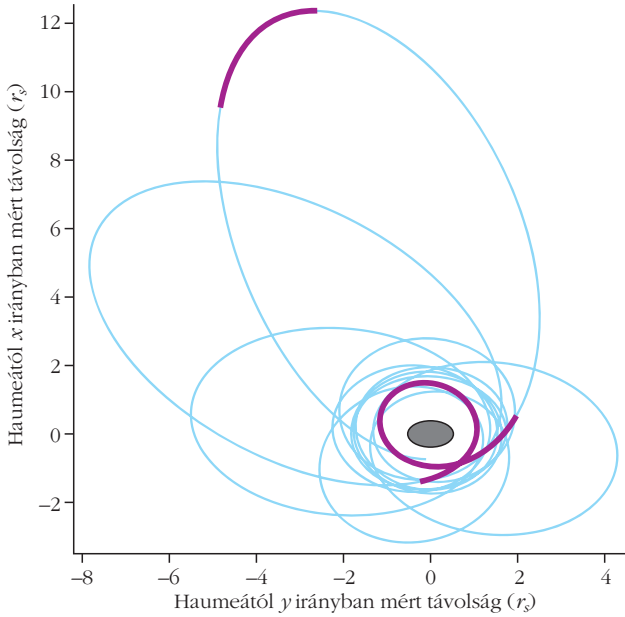
2. a napszél a gyűrűt alkotó részecskékre, azok méretétől függően, sugárnyomás formájában extra hatást gyakorol.

A fenti két hatás figyelembe vételével a kéttest-probléma megoldása már jelentősen eltér a Kepler-pályától, dinamikailag színes képet festve a gyűrűt alkotó részecskék mozgásáról (*1. ábra*). Nézzük meg kvantitatívan a fent vázolt hatásokat, illetve a mozgás-egyenleteket!

Első körben vezessünk be két paramétert, amelyek segítségével a pontszerű gravitációs potenciálhoz mérten tudjuk jellemezni az egyes hatások fontosságát [3]. A W lapultsági paraméter, amely a központi égitest alakjából származó extra gravitációs tagot jellemzi a pontszerű esethez viszonyítva:

$$W = -\frac{3}{2} C_{20} \left(\frac{R}{a}\right)^2 \frac{n}{n_{\odot}}, \quad (1)$$

¹ A kentaurok az óriásbolygók távolságában a Nap körül keringő kis égitestek. Mozgásuk a bolygókkal való szoros találkozások következtében bonyolult.



1. ábra A Haumea egyenlítői síkjába vetített egyetlen részecske pályája. A kezdő pozíció: $x_0 = 1,75$, $y_0 = 0$; a kezdősebesség körpályát definiál. A két vastagon jelzett szegmensben a törpebolygó alakjából származó gravitációs potenciál (közelebbi ív), illetve a napszél keltette sugárnyomás (távolabbi ív) a domináns hatás. A pálya többi szakaszán ezek „versengenek” egymással.

ahol C_{20} és R a második zonális harmonikus (lásd lentebb), illetve a Haumea átlagos sugara, n pedig a gyűrűrészecske középmozgása (gyakorlatilag a szögsebessége) a törpebolygó körül. A rendszer Nap körüli mozgását n_\odot jellemzi. Habár a fenti képlet forgási ellipszoidra érvényes, nagyságrendileg helyesen adja meg a Haumea háromtengelyű közelítésére vonatkozó értékeket.

A C sugárnyomási paraméter értéke a napszél hatását méri a központi bolygó pontszerű gravitációs hatásához képest:

$$C = \frac{9}{8} \frac{n}{n_\odot} Q \frac{F_\odot r^2}{GMc\rho s}. \quad (2)$$

A Q hatékonysági paraméter különböző anyagokra az optikai tulajdonságaiktól függ, így például ideálisan abszorbeáló részecskékre értéke 1-nek vehető. F_\odot a Haumea Naptól való távolságában érvényes sugárzási fluxus, r a részecskék gyűrűbeli pozíciója, G a gravitációs állandó, M a Haumea tömege és c a fénysebesség. A részecskékre jellemző paraméterek továbbá a ρ sűrűségük és s méretük. A 2. ábrán jól látható a fenti paraméterek nagyságrendjének változása a Haumeától mért távolság függvényében. Megjegyzendő továbbá, hogy (2) alapján minél kisebb a részecskék mérete, annál jelentősebb a sugárnyomás.

Most nézzük meg a fenti extra hatásokkal kiegészített mozgásegyenleteket! A gyűrűrészecskék mozgását a törpebolygóhoz rögzített forgó koordináta-rendszerben írjuk fel. A dimenziótlan alakhoz bevezetjük a problémára jellemző karakterisztikus távolságegységet $r_s = 1107$ km, ami azon távolságnak felel meg,

ahol a ponttömeg gravitációs hatása éppen megegyezik a centripetális gyorsulással:

$$r_s = \left(\frac{\mu}{\omega_H^2} \right)^{1/3}, \quad (3)$$

ahol ω_H a Haumea forgási szögsebessége. Időegységnek a Haumea T_H forgási periódusát választva kapjuk, hogy $\mu = GM = 1$.

A Haumea potenciálját annak csonkolt gömbfüggvényesorával jellemezhetjük [2], amelyben $C_{20} \leq 0$ a zonális rész, míg $C_{22} \geq 0$ az egyenlítő ellipticitásából származó járulékok, amelyek a tehetetlenségi főtengelyekhez vannak rendelve:

$$C_{20} = -0,5 \frac{2 I_{zz} - I_{xx} - I_{yy}}{r_s^2} = -0,1274, \quad (4)$$

$$C_{22} = 0,25 \frac{I_{yy} - I_{xx}}{r_s^2} = 0,0256.$$

Itt a Haumea tömegével normáltunk, és I_{ii} a megfelelő tehetetlenségi főtengelyek, $I_{xx} \leq I_{yy} \leq I_{zz}$. A dimenziótlan mozgásegyenletek az alábbi alakot öltik [4]:

$$\ddot{x} - 2\dot{y} = x - \frac{x}{r^3} + \frac{\partial U}{\partial x} + F_{x, \text{rp}},$$

$$\ddot{y} + 2\dot{x} = y - \frac{y}{r^3} + \frac{\partial U}{\partial y} + F_{y, \text{rp}}, \quad (5)$$

$$\ddot{z} = -\frac{z}{r^3} + \frac{\partial U}{\partial z} + F_{z, \text{rp}},$$

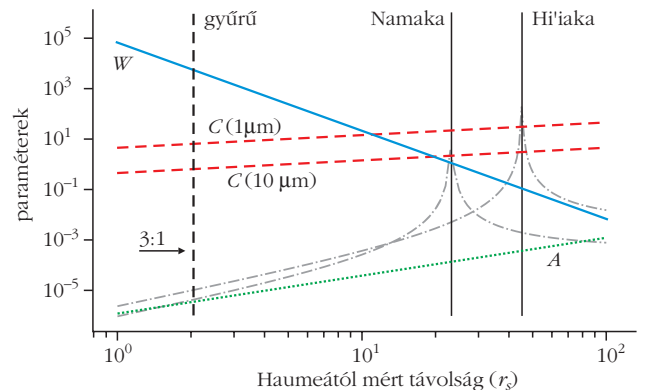
az U normalizált potenciállal

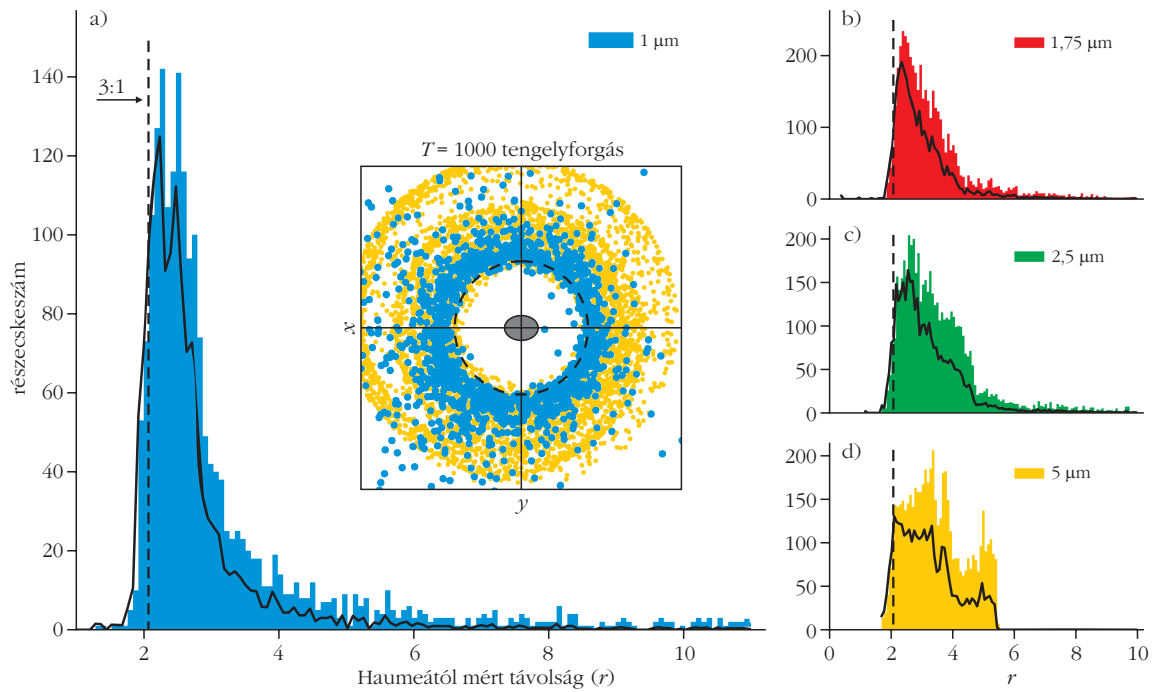
$$U = -\frac{C_{20}(x^2 + y^2 - 2z^2)}{2r^5} + \frac{3C_{22}(x^2 - y^2)}{r^5}, \quad (6)$$

ahol

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

2. ábra. A számításokban W (folytonos) és C (szaggatott) járulékat vesszük figyelembe. A Naptól származó árapály erő A (pontozott), valamint a holdak gravitációs hatása (pontozott-szaggatott) a szimulációk során elhanyagolható mértékű. Az r_s távolság egység a (3) képlet szerinti definíció.





3. ábra. A részecskék méret szerint kiátlagolt radiális eloszlása.

a részecske pozíciója. Az (5) egyenletek jobb oldalán az utolsó tagok a sugárnyomásból származó járulékokat írják le a következő módon:

$$\mathbf{F}_{rp} = m_p \dot{\mathbf{v}} = \frac{F_{\odot} A Q}{c} \hat{\mathbf{r}}(t) \quad (7)$$

és

$$m_p = \frac{4\pi}{3} \rho s^3$$

a \mathbf{v} sebességgel mozgó részecske tömege, A a keresztmetszete, és $\hat{\mathbf{r}}(t)$ a sugárzás irányába mutató egységvektor. Az együttforgó rendszerben \mathbf{F}_{rp} időfüggő. A számolások során az egyes részecskék gömb alakúak, és sűrűségük 1 g/cm^3 .

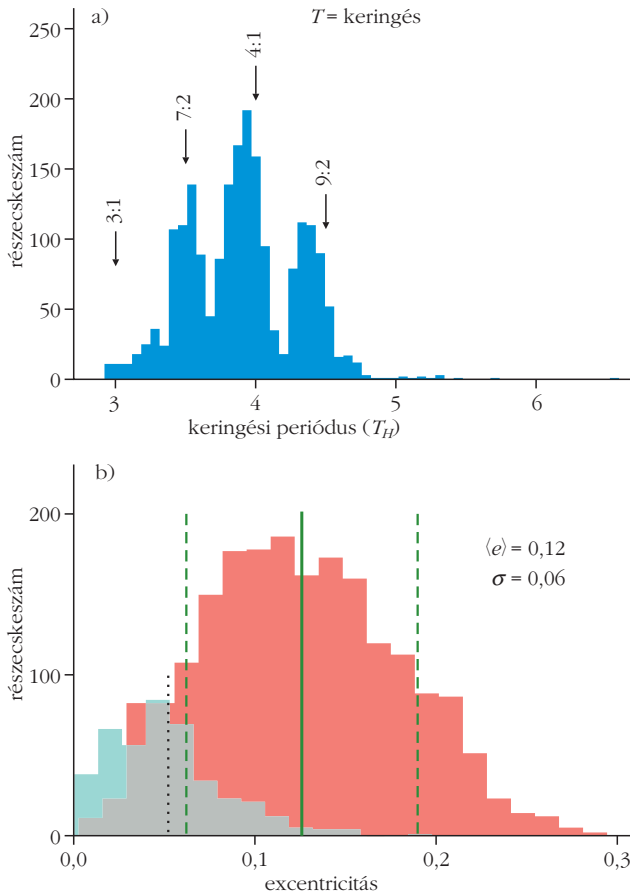
A gyűrűrészecskék dinamikája

A fenti egyenletek ismeretében már könnyen számolható a gyűrűt alkotó részecskék mozgása. A kezdeti konfiguráció az egyes szimulációk során a következő: 10 000 teszt részecskét az egyenlítő síkjában fekvő $r \in [1;5]$, $\theta \in [0;2\pi]$ gyűrűben helyezük el, és Kepler-körpályának megfelelő sebességgel indítjuk. Kezdetben rövidebb $T_H = 1000$) ideig tartó számolásokban követjük a különböző méretű (1, 1,75, 2,5, 5 μm) részecskéket [5]. A 3. ábrán a részecskék szimuláció letelte utáni radiális eloszlását ábrázoltuk. Látható, hogy nagyobb részecskeméret esetén a gyűrű sugárirányban kiterjedtebb lesz (zöld, sárga). Az (a) panelen a rendszert felülnézetből is láthatjuk. A kisebb méretű szemcsék (kék) főként egy szűk sávban koncentrálnak, míg az 5 μm -esek (sárga) spirális alakzatba rendeződ-

nek. A nagyobb távolságokra ($r > 25$) eljutó részecskék a Haumeával való szoros megközelítés eredményeként kiszóródnak a rendszerből. Minden egyes panelen függőleges szaggatott vonallal jelöltük a 3:1-es rezonancia elméletileg jóslott helyzetét. Levonhatjuk tehát a következtetést, ha egy szűk, a megfigyelésekkel összhangban levő, gyűrűt szeretnénk kapni, akkor mikrométer környéki vagy annál kisebb részecskéket kell modelleznünk. Felmerülhet a kérdés, hogy miért nem vizsgálunk kisebb méretű szemcséket, hiszen akkor talán még közelebb lennénk a mérési eredményekhez. A számolások azt mutatják, hogy a 0,7-0,8 μm -es tartomány alatt – a sugárnyomás hatására – már nem alakul ki összefüggő gyűrűrendszer, hanem a részecskék rendezetlen pályán elhagyják a törpebolygó környezetét.

Dinamikailag érdekes kérdés, vajon miként rendeződnek a részecskék éppen a 3:1-es rezonanciába. Ennek megfejtésére hosszabb időn át vizsgáltuk az 1 μm -es szemcsék mozgását. A Haumea forgási periódusának 25 000-szereséig integrált rendszerben 60 ezer részecske sorsát követtük nyomon. A 4. ábrán szintén a részecskék eloszlását tüntettük fel, most azonban a központi égitest forgásidejének függvényében. Ez lehetővé teszi, hogy lássuk, mely rezonanciák populáltak az 1 μm -es részecskék által. Az ábrából világosan kitűnik, hogy a 3:1-es középmozgás-rezonancia szinte teljesen üres, míg a mellette lévő 7:2, 4:1, illetve 9:2-es rezonanciák jelentős mennyiségű részecskét kötnek meg.

Ha ténylegesen ez a helyzet, akkor már csak azt kell megmagyarázni, miért látjuk mégis a 3:1-es középmozgás-forgási periódusaránynál a gyűrűt a Haumea körül. A választ a 4. ábra (b) paneljén találjuk, amilyen a részecskék pályaeccentricitásának eloszlá-



4. ábra. (a) A szimuláció végén megmaradt 1 μm -es részecskék eloszlása a keringési idő függvényében. (b) Ugyanezen részecskék excentricitáseloszlása (piros). A világoskék hisztogram a sugárnyomás nélküli esetben az eloszlás, azaz jóval kevesebb részecske marad a rendszer része, és azok átlagos pályalapultsága is kisebb, mint sugárnyomás jelenlétében.

sát mutatjuk az integrálás végén. Emlékeztetünk, hogy minden részecske körpályán kezdte mozgását, majd az extra hatások (a törpebolygó lapultsága, sugárnyomás) által a kezdeti nulla excentricitás átlagosan 0,12-ra nőtt. Ez azt mutatja, hogy a feltevést, miszerint a gyűrű kör alakú, felül kell vizsgálni. Abban az esetben, amit a szimuláció is mutat, ha excentrikus gyűrűvel van dolgunk, a részecskék az

$$r = a \frac{1 - e^2}{1 + e \cos v}$$

kifejezésnek megfelelő (a : fél nagytengely, e : excentricitás, v : valódi anomália) radiális távolságban helyezkednek el a központi égitesthez viszonyítva. Ennek következtében a gyűrű a 3:1-es rezonancia környékén figyelhető meg, de valójában az excentrikus pályák miatt más középmozgás-rezonanciákba csapdázódnak a részecskék.

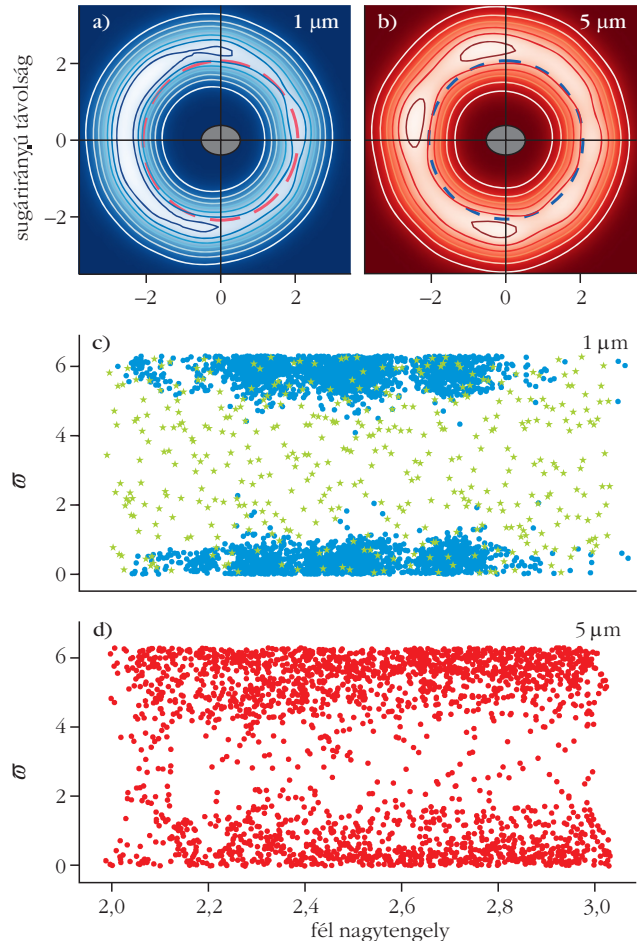
Még egy jelenséget érdemes megemlíteni. A felfedezést közlő cikkben rámutatnak, hogy a gyűrű vastagsága nem állandó. A megfigyelés során kimérték, hogy a gyűrű radiális kiterjedése a mérés elején 74 km, míg a végén 44 km volt. Az 5. ábra (a) és (b) paneljén a részecskék felületi sűrűségét tüntettük fel

szintvonalas hőterképeken. A két ábra közti fő különbség a részecskék méretében van, kék: 1 μm , piros: 5 μm . Látható, hogy a 3:1-es rezonancia helyét jelző szaggatott vonalhoz képest a kisebb szemcseméret esetén jelentősebb az eltérés. Továbbá, szintén az 1 μm -es esetben a Haumeától balra a gyűrű sugárirányú kiterjedése az átellenes oldalhoz képest megnő. Az 5 μm -es részecskékre ez kevésbé markánsan jelenik meg, az excentrikusság pedig teljesen eltűnik. A modellre alapuló számítások így alátámasztják a megfigyelési eredményeket.

Az irodalomból ismert továbbá, hogy excentrikus gyűrűrendszerekben az egyes ellipszisek nem véletlenszerűen állnak a térben, hanem fél nagytengelyeik igyekeznek közel azonos irányba rendeződni. Erre a viselkedésre több magyarázat is létezik. Egyesek szerint a részecskék közti kölcsönös gravitációs hatásnak tulajdonítható, mivel a mi modellünk nem tartalmazza ezt az effektust, más úton kell keresnünk a pályák rendeződésének – és ezzel együtt a gyűrű szélesedésének – okát.

A Kepler-problémában a mozgás pályaelemei időben nem változnak. A mi esetünkben azonban a gra-

5. ábra. (a)–(b) A Haumea gyűrűrendszerének felületi sűrűsége felülnézetből. A szaggatott vonal a 3:1-es rezonancia helyét jelöli, középen a törpebolygó méretarányos sziluettje. (c)–(d) Az integrálás során megmaradó részecskék ellipszisést jellemző térbeli irányultság (ϖ) a fél nagytengely függvényében, 1 és 5 μm -es részecskék esetén.



vitációs potenciál Haumea alakjából származó járuléka, valamint a Naptól származó sugárnyomás is a kezdeti pályaelemek megváltozását eredményezi. A sugárnyomás hatása, hogy az egyes gyűrűrészecskék excentricitása növekszik a mozgás során. Minél kisebb a szemcsék mérete, annál intenzívebb a hatás. Ennek eredményeképpen bizonyos hányaduk közel kerül a Haumeához, így vagy nekiütözik a felszínének és elnyelődik, vagy kidobódik a rendszerből. Másrészt a már excentrikus részecskékre a gravitációs potenciál zonális és egyenlítői járuléka olyan hatással vannak, hogy igyekeznek a pályaeállítások pericentrumait (Haumeához legközelebb eső pontjait) egy helyre gyűjteni. Ezenkívül a központi törpebolygó forgásából adódóan bizonyos középmozgás-rezonanciák protektívek a részecskék számára, mások pedig nem kötik meg a gyűrűt alkotó szemcséket, lásd ismét a 4. ábrát.

Az 5. ábra (c) és (d) paneljén az egyes részecske-méretekhez tartozó ellipszisek iránya látható. A ϖ mennyiség nem más, mint egy referenciairányhoz viszonyítva az ellipszisek fél nagytengelyének iránya. Mind az 1 μm -es, mind az 5 μm -es esetben jól látni a szignifikáns rendeződést $\varpi \sim 350^\circ$ körül $\pm 70^\circ$ ingadozással (1 μm). Ami még érdekesebbé teszi a dolgot, hogy amennyiben „kikapcsoljuk” a sugárnyomást, a pályák térbeli rendeződése nem következik be, hiszen ennek feltétele a már gerjesztett excentrikus mozgás. A (c) panelen a zöld pontok felelnek meg a változatnak. Ezzel tehát kimutattuk, hogy a részecskékre ható extra gravitációs, valamint szoláris eredetű perturbációk csatolt mechanizmusként alakítják a gyűrű komplex dinamikáját.

Kitekintés

A fentiekben bemutatott egyszerű dinamikai modell egy háromtengelyű ellipszoid körül keringő gyűrűrendszer részecskéinek első közelítésbeli leírására tökéletesen alkalmas, hiszen a megfigyelések nagy részét helyesen adja vissza, és magyarázatul szolgál a jelenségekre. Pontosabb képet kaphatunk azonban, ha realiztikusabb számításokat végzünk, amelyben a részecskék – a kölcsönös gravitációs vonzásuk által – tudnak egymásról, továbbá a részecskék közti ütközést és összetapadást is modellezhetjük. Még árnyaltabb képet kaphatunk a gyűrű szerkezetéről, ha egyfajta tömeg- és méreteloszlást feltételezünk a szemcsékre, a mágneses, illetve a Naptól származó egyéb perturbációkat már meg sem említve. Ezek további vizsgálata szakdolgozat vagy TDK-munka formájában érdekes eredményekre vezethet.

Irodalom

1. Braga-Ribas F., et al.: A ring system detected around the Centaur (10199) Chariklo. *Nature* 508 (2014) 72–75.
2. Érdi B.: *Mesterséges holdak mozgása*. Egyetemi jegyzet, Eötvös Kiadó, Budapest (1983).
3. Hamilton D. P., Krivov A. V.: Circumplanetary Dust Dynamics: Effects of Solar Gravity, Radiation Pressure, Planetary Oblateness, and Electromagnetism. *Icarus* 123 (1996) 503–523.
4. Hu W., Scheeres D. J.: Numerical determination of stability regions for orbital motion in uniformly rotating second degree and order gravity fields. *Planetary and Space Science* 52 (2004) 685–692.
5. Kovács T., Regály Zs.: Dynamics of Haumea's dust ring. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 479 (2018) 4560–4565.
6. Ortiz J. L., et al.: The size, shape, density and ring of the dwarf planet Haumea from a stellar occultation. *Nature* 550 (2017) 219–223.
7. <https://www.csillagaszat.hu/hirek/magyar-kutatok-a-nature-ben-gyurus-torpebolygo-a-neptunuszon-tul/>

A 2020. évi

63. Fizikatanári Ankét és Eszközbemutató

A 2020. évi ankétot március 19-től 22-ig a váci Piarista Gimnáziumban, A klíma fizikája, a fizika klímája témában rendezzük meg.

Részletek a www.elft.hu társulati és a www.kfki.hu/elftkisk szakcsoporthonlapokon.

A rendezvény 30 órás akkreditált pedagógus-továbbképzésnek minősül.

Előadások március 19–22-ig, műhelyfoglalkozások és eszközkiallítás március 20–21-én, szakmai látogatások március 19-én, ünnepélyes díjátadások március 19-én és 22-én.

ELFT Oktatási Szakosztályának vezetője



SZAVAK JELENTÉSVÁLTOZÁSÁNAK VIZSGÁLATA A STATISZTIKUS FIZIKA ESZKÖZEIVEL

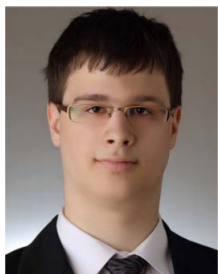
Asztalos Bogdán
ELTE, fizikus hallgató

Dolgozatom címe első olvasásra talán meglepő lehet: „mit keres a TDK fizika szekciójában egy szavak jelentésével foglalkozó cikk?” – kérdezhetnénk. Ennek magyarázata az, hogy a természettudományok fejlődésével egyre több területen foglalkoznak olyan rendszerek vizsgálatával, amelyek túl bonyolultak ahhoz, hogy egzaktul leírjuk őket, de viselkedésükről mégis tudunk törvényszerűségeket megállapítani. Ezek tanulmányozásánál – legyen szó egy összetettebb biológiai struktúráról, kémiai részecskéek összességéről, vagy egy, a fizikában gyakran emlegetett „komplex rendszerről” – fontos szerepet tölt be a statisztika, amely segítségével anélkül ismerhetjük meg a dolgok mérhető és tapasztalható tulajdonságait, hogy meg kéne értenünk annak alapvető működését.

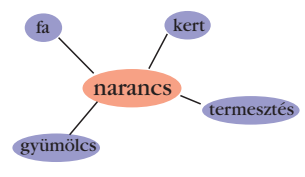
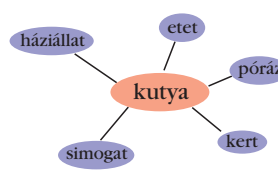
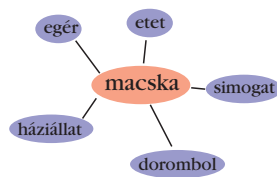
Mivel az emberek által beszélt nyelv is egy ilyen komplex rendszer, amelynek mélyebb tanulmányozása bonyolult, de használata logikai szabályokra épül, ezért a természettudományban megismert módszerek a nyelv vizsgálatára is alkalmasak lehetnek. Kutatásunk célja éppen ez, hogy a statisztikus fizika eszköztárát alkalmazva, nyelvi folyamatokra derítsünk fényt.

Az ötlet, hogy a nyelvet statisztikai módszerekkel tanulmányozzuk nem új, mind a nyelvészet felől, mind a számítástudomány felől sokan foglalkoztak már a témával. Mint fizikusok, elsősorban fizikus szemlélettel állunk a kérdésekhez, de a téma tudományközi jellegére való tekintettel elengedhetetlen olyan nyelvészeti vagy informatikai fogalmakat megismernünk, mint például a disztribúciós hipotézis vagy a szóbeágyazás.

Az Országos Tudományos Diákköri versenyen – témavezetők: *Palla Gergely* és *Czégel Dániel* – 1. díjat elért tanulmány *Fizikai Szemle* részére készített összefoglalója. Az Emberi Erőforrások Minisztériuma ÚNKP-18-1 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának támogatásával készült.



Asztalos Bogdán 2016-ban érettségizett a budapesti Baár-Madas Református Gimnáziumban, jelenleg az ELTE fizikus mesterképzés első éves hallgatója. Fizikában és matematikában is az elméleti problémák megoldása, és az ahhoz szükséges sajátos gondolkodásmód érdekli. Néhány éve részt vesz egy nyelvi folyamatokkal foglalkozó statisztikus fizikai kutatásban, amivel 2019 áprilisában OTDK 1. díjat nyert.



1. ábra. A disztribúciós hipotézis szemléltetése. Mivel a *macska* és a *kutya* szavak jelentése jobban hasonlít egymásra, a környezetükben előforduló szavak között több közös van, mint a *narancs* szó környezete között.

A továbbiakban látni fogjuk, hogy ezek segítségével miként transzformálható át egy elsősorban nyelvészeti téma fizikai rendszerré.

Disztribúciós szemantika

A szemantika a nyelvészet szavak jelentésével foglalkozó részterülete. Mivel a nyelvtudomány része, ezért elsősorban a humán tudományterületekhez tartozik, de a kognitív tudományok révén egyre több természettudományos kutatás alapjául is szolgál. Tekintve, hogy egy szó jelentésétől erősen függ, milyen szavak fordulnak elő körülötte, a szemantikának fontos eszköze, hogy a szavak egymáshoz képesti előfordulását tanulmányozzák. A disztribúciós szemantika nagy mennyiségű szöveges forrás statisztikai elemzésével próbál a szavak eloszlására vonatkozó információkat megállapítani (innen a disztribúciós jelző), és jelentésükre ebből következtetni.

A disztribúciós szemantika fontos mennyisége a szemantikai hasonlóság, amely egy adott szópár esetében megadja, hogy a két szó jelentése mennyire hasonló. Ez tulajdonképpen a nyelvészetből ismert szinonimafogalom kiterjesztése, de amíg a szinonima csak két teljesen megegyező jelentésű szót kapcsol össze, addig a szemantikai hasonlóság tetszőleges két szó közötti viszonyt képes jellemezni. Például, mondhatjuk, hogy a *kutya* és a *macska* szó ugyanúgy nem szinonimák, mint a *kutya* és a *narancs*, de tudjuk, hogy a *kutya* és *macska* szavak között nagyobb a szemantikai hasonlóság, mint a *kutya* és a *narancs* között.

A szemantikai hasonlóságot gyakran ténylegesen ki akarjuk számolni, ehhez biztosít lehetőséget a disztribúciós szemantika fontos állítása, a disztribúciós hipotézis:

Ha A és B két nyelvi kifejezés, akkor a közöttük lévő szemantikai hasonlóság mértéke azon nyelvi környezetek hasonlóságának a függvénye, amelyekben A és B elő tud fordulni [1].

Egyszerűbben megfogalmazva: hasonló szavak körül előforduló szavak szintén hasonlók egymáshoz. Ezt szemlélteti az 1. ábra is.

A disztribúciós hipotézis jelentősége abban rejlik, hogy igen hasznos eszközt ad a kezünkbe, ugyanis eszerint a szavak szemantikai hasonlósága a környezetük statisztikai vizsgálatával tanulmányozható. Ezt alapul véve, különböző eljárások találhatók, amelyekkel a szavak közötti szemantikai hasonlóságot becsülni lehet, ilyen például az általunk használt szóbeágyazás technikája is.

Szóbeágyazás

A disztribúciós hipotézis alapján felmerülhet bennünk az igény, hogy bármely két szó közötti szemantikai hasonlóságot kiszámoljuk (vagy legalább megbecsüljük). Ha közvetlenül a szöveg alapján tennénk meg, akkor minden egyes alkalommal, amikor két szó közötti viszonyt keressük, az egész szöveget kellene statisztikailag elemezni, ami rendkívül sok munka lenne. Sokkal egyszerűbb, ha a szövegben található információkat egyszer kinyerjük, és azt egy könnyen kezelhető objektumként tároljuk.

A szóbeágyazás alapja, hogy minden szó környezetének statisztikai tulajdonságait külön-külön eltároljuk egy számvektorban, és amikor két szó szemantikai hasonlóságát keressük, elég a két szóhoz rendelt számvektorral foglalkozni. A számvektorként való reprezentáció azért praktikus, mert matematikai tulajdonságaik jól ismertek és informatikai szempontból (ezáltal az adatok feldolgozásának szempontjából) is könnyen kezelhetők.

Ezen kívül, tudjuk, hogy egy n elemű számvektor egyben egy n dimenziós tér egy pontjaként is felfogható. Emiatt, ha a szavakat vektorokkal azonosítjuk, az formálisan úgy is értelmezhető, mintha létezne egy elvont nyelvészeti tér, a jelentéstér, amiben a szavak pontoknak felelnek meg. (A szóbeágyazás név is onnan ered, hogy a szavakat egy többdimenziós térbe ágyazzák be.) Szemléletesen ez úgy magyarázható, hogy a beágyazási tér különböző dimenziói a különböző nyelvi környezeteknek felelnek meg, és a szóreprezentációk különböző komponensei azt mutatják, hogy az adott környezet mennyire jellemző a reprezentált szóra.

A klasszikus szóbeágyazási módszerek (LSA,¹ PPMI²) pontosan ilyen alapon működtek: a szót reprezentáló vektor i -ik komponense attól függött, hogy az i -ik kontextusszó hányszor szerepelt a szó környezetében. Két szó szemantikai hasonlóságát a két szót reprezentáló vektor komponenseinek korrelációjával (azaz a két vektor által bezárt szög koszinuszával) becsülték. Azt, hogy melyik szóbeágyazás jó és melyik nem, általában tapasztalati úton, azaz humán szóasszociációs vagy egyéb pszicholingvisztikai vizsgálatokkal döntötték el. Az újabb szóbeágyazások már bonyolultabb módszerrel készítik el a szavakat reprezentáló vektorokat, ezért a különböző dimenziók

ilyen szemléletes jelentése eltűnt, valamint a beágyazás mögötti elv is sokkal elvontabb lett, de a szemantikai hasonlóság kiszámítása is jóval hatékonyabbá és pontosabbá vált [2].

Ugyan a szóbeágyazás módszerének ötletét már az 1960-as években kitalálták, de igazán csak a 2000-es években lett széles körben ismert, amikor már elég adat állt rendelkezésre a reprezentáció elkészítéséhez. 2012 után, a grafikus processzorok általánossá válásával elindult a „deep learning forradalma”, amely a számítástudomány legtöbb területét gyökerestül változtatta meg, hiszen olyan területeken kezdtek el gépi tanuláson alapuló eljárásokat alkalmazni, ahol azelőtt – a nagy adatmennyiség feldolgozása miatt – reménytelen lett volna. Így történt a szóbeágyazásokkal is: megjelentek az olyan szóbeágyazó algoritmusok, amelyek a gépi tanulás segítségével, mesterséges neurális hálózatokat használva „tanulják” meg a szavak legjobb beágyazását.

A Word2vec több olyan modell csoportja, amely mesterséges neurális hálókkal végez szóbeágyazást. Kifejlesztését *Tomas Mikolov* vezetésével a Google egyik kutatócsoportja végezte, eredményeiket 2013-ban két cikkben publikálták [2, 3], és ezek annyira hatékonyak működtek, hogy az utóbbi évek legnépszerűbb szóbeágyazási modelljeivé nőttek ki magukat. Kutatásunk során az úgynevezett skip-gram modellt használtuk, amely a beágyazott vektorokat a szavak környezetének valószínűségi becslése alapján állítja elő. Ez tipikusan ezertől néhány százezer szó hatékony beágyazására képes egy pár száz dimenziós térbe.

Kutatásunk alap gondolata

A beágyazott szavak – ahogy láttuk – egy (sokdimenziós) geometriai tér pontjaként képzelhetők el, így a szavak jelentésére úgy tekinthetünk, mint egy elvont nyelvészeti tér, a jelentéstér elemeire. Mindennapi tapasztalatunk, hogy a szavak jelentése az évek során időben változik, ez a jelentéstérben úgy képzelhető el, mint pontrészcskék vándorlása. Figyelve tehát, hogy az idő függvényében miként változott a beágyazott szavak halmaza, pontrészcskék bolyongását látjuk, amelynek vizsgálatára léteznek statisztikus fizikai módszerek. Ezeket használva állításokat fogalmazhatunk meg a szavak jelentésváltozására, amelyekkel akár nyelvi törvényszerűségekre is fényt deríthetünk, és mindezt a természettudomány eszközeivel.

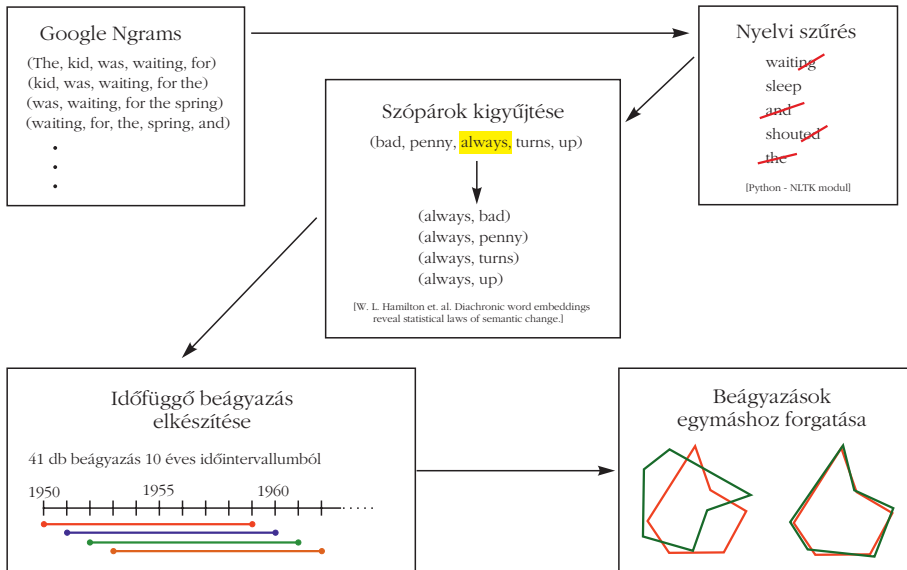
Adatok feldolgozása

Konkrét vizsgálatokat elvégzéséhez saját beágyazást (beágyazásokat) kell készítenünk, amelyeket megvizsgálva információt szerezhetünk a szavak viselkedéséről.

Az adatok feldolgozásának folyamatát vázlatosan a 2. *ábra* szemlélteti, a főbb munkafázisok az alábbiaként foglalhatók össze.

¹ Latent semantic analysis

² Point-wise mutual information



2. ábra. Az időfüggő beágyazás elkészítésének főbb lépései.

Adatok letöltése

A disztribúciós szemantikához természetesen szorosan kapcsolódnak a nagyméretű szöveggyűjtemények, hiszen, mint a nyelv használatának írásban megmaradt nyomai, ezek a szavak statisztikai tulajdonságainak első számú információforrásai. Különös jelentőségük – amióta elektronikusan különböző formákban elérhető, és így feldolgozásuk automatizálható – növekedett.

Kutatásunk során a Google Books Ngram Viewer ingyenesen elérhető, angol nyelvű adatbázisát³ használtuk. Ez az adatbázis a Google egyik nagyobb szabású projektjén, a Google Könyveken alapszik, amelynek keretében több millió könyv szöveges állományát gyűjtötték össze. Az Ngram Viewer keretében a szövegekből kigyűjtötték az összes szót, szópárt, szóhármast, ..., szó-n-est (más szóval n-grammot), és összeszámolták, hogy ezek a különböző évekből, 1800-tól 2008-ig milyen gyakran fordulnak elő.

Nyelvi szűrés

Miután letöltöttük az adatokat, első dolgunk, hogy a nyers szövegből kinyert szavakat annak érdekében egységesítsük, hogy rajta statisztikai vizsgálatokat lehessen végezni. E célból, egy erre készült algoritmus⁴ a toldalékoltszavakat szótőre egyszerűsítettünk, majd ezután a leggyakrabban használt, jelentéssel nem bíró szavakat – névelőket, kötőszavakat, segédigéket, amelyek csak torzítanak a statisztikai vizsgálatok eredményét – eltávolítottuk.

Együtt-előfordulási mátrix elkészítése

A beágyazó algoritmus az egymás közelében előforduló szópárokat igényli bemenetként, ezért a letöltött

tött adatokból ezeket az összetartozó szópárokat gyűjtöttük ki. Az előfordulási adatokat egy olyan $N \times N$ méretű mátrixban tároltam el (N az összes szó száma), amelynek i -ik sorának j -ik oszlopa megadja, hogy az i -ik szó környezetében hányszor fordult elő a j -ik szó. Egy ilyen mátrixot szemléltet az 1. táblázat.

Időfüggő beágyazás

Következő lépésként lefutattuk a beágyazást elkészítő programot. A skip-gram modell a tanításhoz szópárokat vár, ezek az együtt-előfordulási mátrixból könnyen kigyűjtethők, hiszen minden cella az adott szópár előfordulását jelenti.

A programot, amely magát a beágyazást végzi, egy másik kutatócsoport publikálta a saját kutatásuk keretében [4]. A beágyazás fontos paramétere a dimenziók száma. Esetünkben, követve korábbi kutatásokat, ez 300 volt [4, 5].

Mivel a szavak jelentését időben vizsgáljuk, ezért minden évre külön elkészítettük a megfelelő együtt-előfordulási mátrixot. Ahhoz, hogy adott beágyazáshoz mégis megfelelő mennyiségű adatunk, ne csupán egy évnyi legyen, egy beágyazás során 10 év adatait vettük figyelembe, és ezeket évenként csúsztattuk. Így összességében az 1950 és 1999 közötti adatokat 41 különböző intervallumban dolgoztuk fel.

Szavak beforgatása

A beágyazás eredményeként minden szóhoz, minden évben egy öt reprezentáló 300 dimenziós vektort kaptunk. Ha egy adott időpontbeli beágyazás összes vektorát elforgatjuk a 300 dimenziós térben, akkor a szavak egymáshoz képesti távolságai nem változnak, tehát a két beágyazás ekvivalens. Ez azért okoz problémát, mert két, egymáshoz képest elforgatott pont-halmaz – bármennyire is hasonló – hasonlósága nem vizsgálható (lásd 2. ábra, jobb alsó illusztráció).

1. táblázat

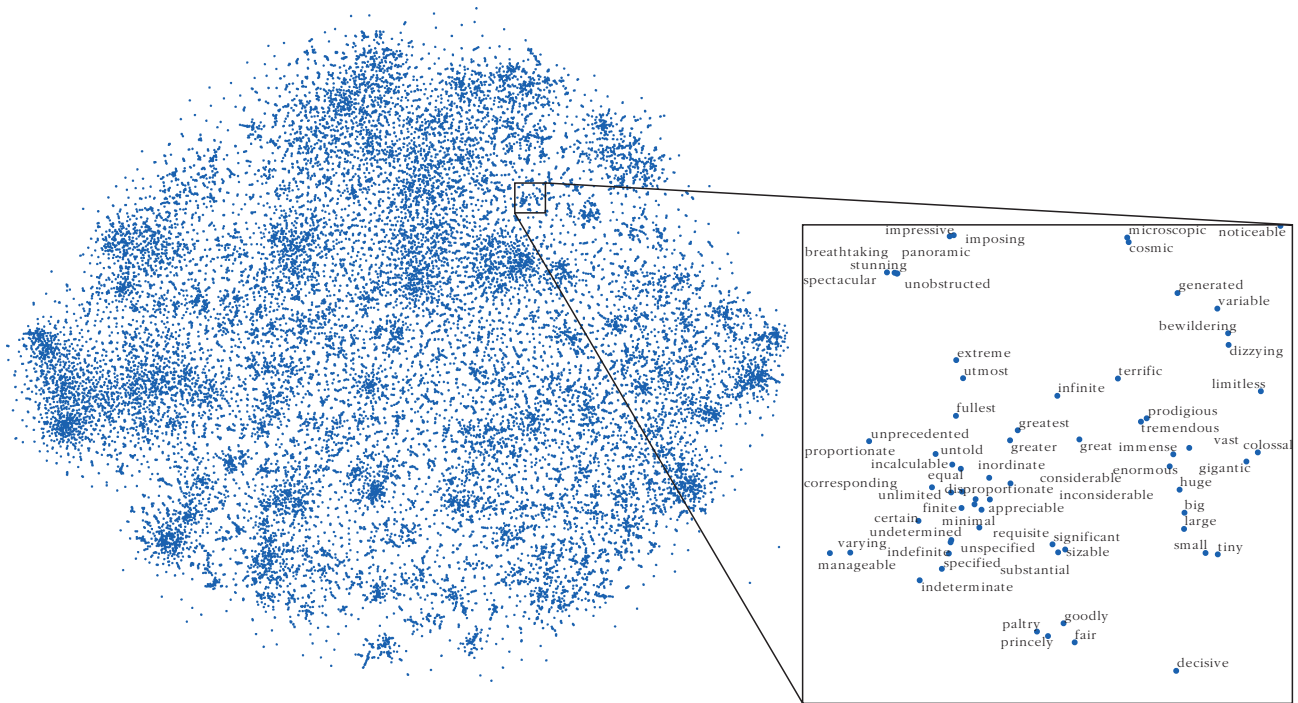
Példa egy együtt-előfordulási mátrixra

	kutya	macska	enni	póráz
kutya	2	8	23	10
macska	8	3	21	1
enni	23	21	5	0
póráz	10	1	0	2

A *kutya* szó környezetében a *póráz* 10-szer fordul elő, de a *macska* környezetében csak 1-szer, hiszen ez inkább a kutyaéhoz köthető fogalom, míg az *enni* szó mindkét állat környezetében hasonló számban fordul elő.

³ Elérhető a <https://storage.googleapis.com/books/ngrams/books/datasetsv2.html> címen.

⁴ A nyelvi szűrést a Python programnyelv nltk (Natural Language Toolkit) modul megfelelő célfüggvényeivel végeztük.



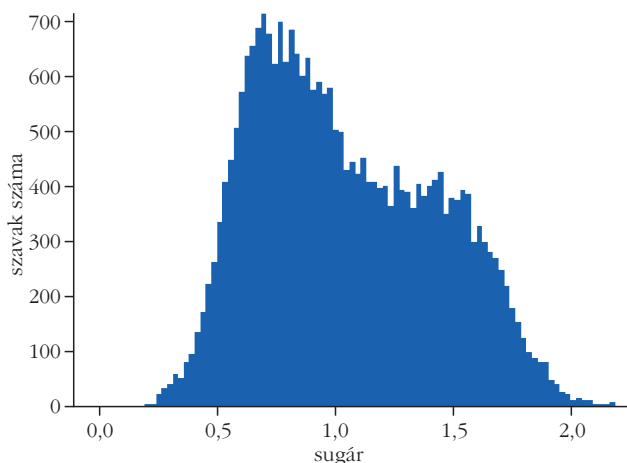
3. ábra. A 300 dimenziós beágyazás szerkezetének kétdimenziós vizualizációja. A levetítés a t-SNE (T-distributed Stochastic Neighbor Embedding) algoritmussal történt, ami egy nemlineáris sztochasztikus folyamat segítségével képez le többdimenziós adathalmazt alacsony dimenzióba úgy, hogy az adatpontok közötti távolságviszonyok minél jobban megmaradjanak [7].

Ezt a jelenséget úgy küszöböltük ki, hogy a szomszédos beágyazásokat „egymáshoz forgattuk”, azaz megkerestük mindegyik időpont beágyazásának azt az állását, ami legjobban hasonlít az előző időpontéhoz [6].

A beágyazás néhány tulajdonsága

Mielőtt a szavak időbeli viselkedését vizsgálnánk, nézzük meg egy adott beágyazás néhány érdekes tulajdonságát! (Az alábbi eredmények az 1990 és 1999 közötti évek adataiból gyártott beágyazás alapján készültek.) A beágyazás egészének a struktúráját a 3. ábra szemlélteti, ez a 300 dimenziós adathalmaz kétdimenziós levetítése.

4. ábra. A szavak origó körüli radiális sűrűsége.



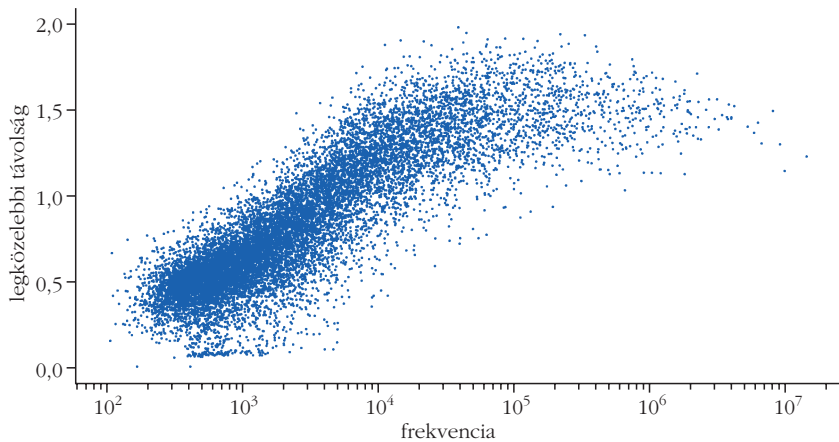
Jól látszik, hogy a szavak különböző csomópontokba – témakörökbe – gyülekeznek, és a kép egy-egy kisebb tartományára ráközelítve láthatjuk azt is, hogy egymáshoz közel a szinte teljesen megegyező jelentésű szavak helyezkednek el.

Érdekes tulajdonság, látható a 4. ábrán is, amely a szavak radiális sűrűségét ábrázolja az origó körül. Ez pontosan azt jelenti, hogy az origótól adott távolságba eső tartományban hány darab szó helyezkedik el. Ahogy látható, a szósűrűség nem egyszerűen megnő majd a végtelenben lecseng, hanem egy furcsa kettős púp alakot mutat. Ennek pontos okát nem tudjuk, de későbbi vizsgálatoknál nem árt észben tartani, hogy a szavak struktúrája nem olyan egyszerű, mint elsőre gondolnánk.

A szófelhő további különleges tulajdonságát ismerhetjük meg, ha a szavak körüli üres térrész sugarának nagyságát annak függvényében ábrázoljuk, hogy a szó milyen gyakran fordul elő a nyelvben. (Az üres térrész alatt most azt a távolságot értjük, ami az adott szóhoz legközelebbi lévő szó távolsága.) Az 5. ábra alapján megállapíthatjuk, hogy a gyakoribb szavak ritkább társaiknál sokkal nagyobb térrészt foglalnak el a jelentéstérből.

Szavak időfejlődésének viszonya a Brown-mozgáshoz

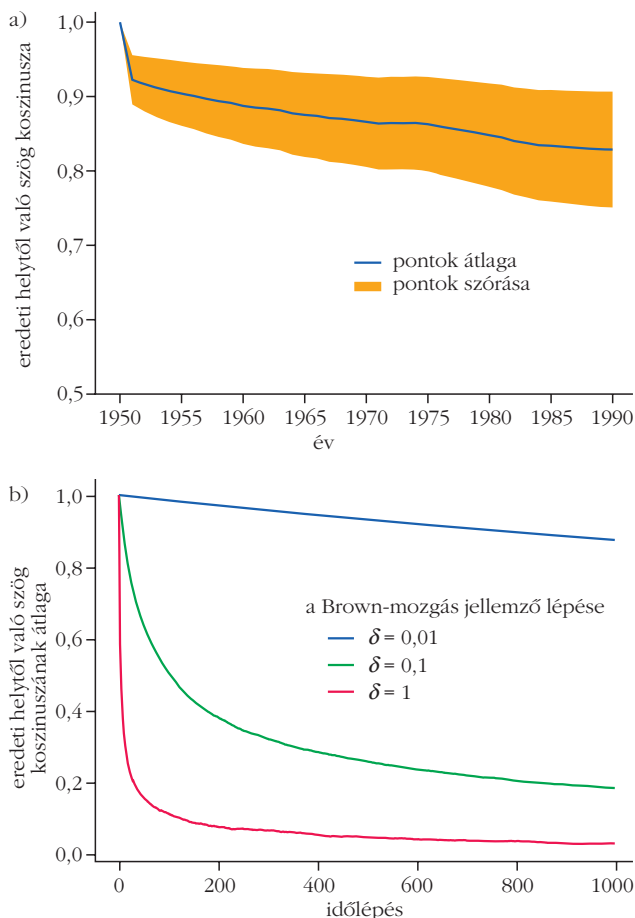
Ha a szavak mozgását a jelentéstérben úgy képzeljük el, mint a geometriai térben bolyongó részecskéket, jó lenne a mozgásukra vonatkozó törvényeket, szabályokat megállapítani. Bolyongó részecskék vizsgálata-



5. ábra. A szavakat reprezentáló pontok körüli üres térrész sugara a szavak gyakoriságának a függvényében.

kor általánosan elfogadott elemezni, hogy a kiindulási helyüktől időben miként távolodnak, és ezt ismert mozgások eredményeivel összehasonlítani. A szavak esetében ez a feladat azért bonyolultabb, mert a szemantikai hasonlóságot – konvencionálisan – a szavakat reprezentáló pontokba mutató vektorok által be-

6. ábra. (a) A beágyazási pontok első beágyazásban elfoglalt helyüktől való távolságátlaga és szórása. (b) A jelentéstérben Brown-mozgást végző részecske várható távolodása az eredeti helyéről, különböző δ lépésmagasságok esetében. A távolságot mindkét ábrán a vektorok által bezárt szög koszinuszával tüntettük fel, tehát az, hogy a görbék értékeinek 1-ről való csökkenése a kezdeti helytől való távolodást fejezi ki.



zárt szöggel mérjük, emiatt viszont a távolodás mértéke nem írható fel a megszokott a formában.

Egészen pontosan azt vizsgáltuk, hogy az egyszerű Brown-mozgó részecskék miként viselkednek a jelentéstérben, és ezt hasonlítottuk össze a beágyazott pontok viselkedésével. A szó jelentésváltozását és a Brown-részecskék távolodását egyaránt a különböző beágyazásokban reprezentáló vektorok által bezárt szögével jellemezzük.

A beágyazott pontok esetében ezt a távolodást a 6.a ábrán láthatjuk. A szavak átlagosan valóban távolodnak eredeti jelentésüktől, ám ez a

távolságváltozás csak a viszonyítási pontból való első lépés után lényeges, azt követően a viszonyítási ponttól való távolodás nagyban lelassul.

A jelentéstérben Brown-mozgást az alábbi módon értelmeztük. A részecske elindul a kiindulási helyéről és minden időlépésben arrébb ugrik egyet. Az ugrás irányát és nagyságát egy 0 középpontú, δ szórású, 300 dimenziós normál eloszlás szerint választja meg. Mivel a távolságot a vektorok szögével mérjük, ezért a várható távolság időfüggése nem a megszokott gyökfüggvény alakú. Az összefüggés megállapításához egy mesterséges ponthalmazon, különböző δ értékek esetén végzett szimuláción mértük meg a távolodást (6.b ábra).

Brown-mozgás esetében, bár a pontok szintén távolodnak a kiindulási ponttól, de a görbék – ellentétben az eredeti szavak esetén látott első lépésben való hirtelen távolodással – elég gyorsan és egyértelműen a 0 értékhez tartanak. Ez alapján úgy tűnik, hogy a szavak dinamikája nem modellezhető jól a kölcsönhatásmentes, memóriánélküli Brown-mozgással, hanem leírásához valamilyen bonyolultabb modell szükséges.

Kitekintés

Kutatásunk jövőbeli terveihez tartozik, hogy a Brown-mozgástól való eltérést kvantitatív módon jellemezzük, és olyan modellt találjunk, amellyel jól leírható a szavak dinamikája. A kiindulási alapötletre építve elsődleges célunk, hogy törvényszerűségeket ismerjünk fel a szavak mozgásának időfüggésében, és ezekkel ismert nyelvészeti szabályok okát magyarázzuk meg, vagy újakat mondjunk ki.

Irodalom

1. Alessandro Lenci: Distributional semantics in linguistic and cognitive research. *Italian Journal of Linguistics* 20/1 (2008) 1–31.
2. Tomas Mikolov, Kai Chen, Greg Corrado, Jeffrey Dean: Efficient Estimation of Word Representations in Vector Space. *CoRR* (2013) abs/1301.3781 <http://arxiv.org/abs/1301.3781>
3. Tomas Mikolov, Ilya Sutskever, Kai Chen, Greg S. Corrado, Jeff Dean: Distributed Representations of Words and Phrases and their Compositionality. In *Advances in Neural Information Processing Systems* 26. (C. J. C. Burges, L. Bottou, M. Welling, Z. Ghahramani, K. Q. Weinberger eds.) Curran Associates, Inc. (2013) 3111–3119.

<http://papers.nips.cc/paper/5021-distributed-representations-of-words-and-phrases-and-their-compositionality.pdf>

4. William L. Hamilton, Jure Leskovec, Dan Jurafsky: Diachronic word embeddings reveal statistical laws of semantic change. *arXiv preprint arXiv:1605.09096* (2016).
5. Omer Levy, Yoav Goldberg, Ido Dagan: Improving distributional similarity with lessons learned from word embeddings. *Transac-*

tions of the Association for Computational Linguistics 3 (2015) 211–225.

6. Peter H. Schönemann: A generalized solution of the orthogonal procrustes problem. *Psychometrika* 31/1 (1966) 1–10.
7. Laurens van der Maaten, Geoffrey Hinton: Visualizing data using t-SNE. *Journal of machine learning research* 9 (2008. nov.) 2579–2605.

VÉLEMÉNYEK

TUDÁSTERMELÉS A POSZTDISZCIPLINÁRIS KORBAN

Nyugtalanító tendenciák a tudományosságfelfogás alakulásában

Woynarovich Ferenc
Wigner FK

A címben szereplő kifejezés angol eredetije (knowledge production in post-disciplinary age) egy Budapesten működő egyetem egyik kutatás-módszertani tantárgyának leírásában található. A knowledge production kifejezés magyar fordítását használják máshol is,¹ de a „post-disciplinary” (egyébként sok helyen előforduló) kifejezés magyar megfelelője nem használatos. Gondolhatnánk, nem is kell, hiszen így is értjük, akár csak az interdiszciplináris vagy a multidiszciplináris kifejezéseket,² de tanulságos megpróbálni más szavakkal kifejezni, mit is jelenthet. A *disciplina* latin szó alapjelentése *fegyelem*, és ebből származik az összes többi, köztük a *tanítás*, *tudomány*, *tudományos rendszer*, *tudományszak* jelentés. A latinból jött angol *discipline* kifejezés legtöbb jelentésárnyalata is a fegyelemre és a fegyelmezésre vonatkozik, de megtalálható közöttük a *szabályrendszer* és a *tudásterület* értelmezés is, amely utóbbi nagyjából a magyar *tudomány*³ felel meg. Innen közelítve a „posztdiszciplináris kor” legkézenfekvőbb magyarítása a „poszt tudományos kor” vagy „tudomány esetleg tudományok utáni kor”, egy olyan korszak, amelyben már nem csak a tudományok szokásos rendszere és szerkezete, hanem szabályai, fegyelme stb. sem érvényesek.⁴ Ezzel összecseng az a meghatározás, miszerint a posztdiszciplináritás, mint a tudástermelés egy módja „menekülés a diszciplínáktól”, egyfajta „intellektuális engedetlenség”.⁵



Woynarovich Ferenc 1975-ben szerzett fizikus diplomát az ELTE TTK-n. 1992-től a fizikai tudományok doktora, 1993-tól az ELTE címzetes egyetemi tanára. Fő kutatási területe a statisztikus fizikán belül a teljesen integrálható, alacsony dimenziós rendszerek kérdésköre. A külföldön töltött évek kivételével a többször nevet váltott és átszervezett KFKI-ban dolgozott. 2012 óta nyugdíjas, a Wigner FK SZFI külső munkatársa.

Elgondolkoztató, hogy azok a kutatási területek, egyetemi tanszakok és műhelyek, amelyek úgy gondolják, hogy a tudományok (módszertani) fegyelme helyett a posztdiszciplináritás a jövő, egyértelműen a *modernitással szembe forduló* posztmodern szemlélet szülöttei, és ha nyíltan nem is vállalják fel a velük rokon hagyományos diszciplínák elutasítását, nagyon erős kritikával viszonyulnak hozzájuk. A továbbiakban röviden áttekintem a modern kor „tudományosság”-képét, és az azt érő posztmodern támadásokat, majd néhány példát részletesebben is tárgyalok.

¹ Például a Corvinus Egyetem kereteiben működő Társadalomelméleti Kollégium bemutatkozásában a tudományos aktivitás helyett használja: „TUDÁSTERMELÉS: Kritikai balos tudás termelése és megosztása. Közös gondolkodással tudást termelünk és vitatunk meg, amit tovább is adunk és gyakorlatba ültetjük. A közösségi tanulás módszerével alternatívát biztosítunk a felsőoktatás rendszere mellett.”

² Az interdiszciplináris, illetve multidiszciplináris jelzőket olyan kutatási aktivitásokra alkalmazzuk, amelyek több tudomány vagy tudományterület határvidékére irányulnak, illetve amelyeket több tudomány bevonásával művelnek.

³ Az angolban az egyes tudományok neve nem tartalmazza a tudomány (science) szót, az szigorúan véve csak a természettudományokra vonatkozik.

⁴ „[...] napjainkban egyesek nem hisznek már a hagyományos modernista értékrend hasznosságában s előnyben részesítenek alternatív, posztmodern szemléletmódokat. Ez azzal a következménnyel jár, hogy fel kell adniuk a modern tudományról kialakított és a legtöbb tudományfilozófia által is elfogadott és támogatott elképzeléseket. Ezzel a döntéssel azonnal szembesülnek azzal a nagyon nehezen kezelhető problémával, hogy vajon egyáltalán lehetséges-e ebben (a posztmodern) világban a tudomány? [...] A válasz már megszületett: nem. Másfajta tudásra, másfajta tudományra vágyik a mai kor emberé.” (Ropolyi L.: A tudomány posztmodern kritikái című fejezet bevezetője. In Gulyás L., Kampis Gy., Kutrovácz G., Ropolyi L., Soós S., Szegedi P.: *Bevezetés a tudományfilozófiába*. Egyetemi jegyzet, ELTE TTK Tudománytörténet és Tudományfilozófia Tanszék. 152. old.)

⁵ „Post-disciplinary weaves a unique inquiry thread. It is an 'escape' from disciplines – marked by flexibility, creative problem-solving and intellectual disobedience.” (saját fordításban: A posztdiszciplináritásban a kutatás vezérfonala egyedi. Olyan „menekülés” a diszciplínáktól – amelyet rugalmasság, kreatív problémamegoldás és intellektuális engedetlenség fémjelmez.) Table 1.1. In *Approaches and Methods in Event Studies*. Szerk.: T. Pernecky, Routledge, 2016.

A tudományosság etalonjai

Valamikor a tudományosság etalonja a geometria euklideszi tárgyalása volt. Ennek lényege, hogy azon állításokat tekintjük igaznak, amelyeket néhány előzetesen elfogadott axiómára és posztulátumra vissza lehet vezetni. A „more geometrico”, a geometria módjában való tárgyalás igénye megjelent a fizikában is (ez tükröződik például abban, hogy a klasszikus mechanika alaptörvényeit ma is gyakran Newton-axiómáknak nevezzük). Az idők folyamán tisztázódott azonban, hogy a természettudományok esetében ez az elvárás – minden látszólagos sikere ellenére – félrevisszi a megismerési folyamatot. Az axiomatikus tárgyalás lehetőségével az az észrevétel kecsegtetett, hogy a kialakuló fizika nagy részét lefedő klasszikus mechanikában és később más területeken is a jelenségek nagy része néhány alaptörvény (a Newton-törvények, gáztörvények, Maxwell-egyenletek stb.) segítségével megérthető. A struktúra hasonló, de észre kell venni, hogy egy axiomatikus rendszer matematikai tárgyalásában mások a kérdések, mint a jelenségek leírásakor, és más a helyesség kritériuma is. Az előző esetben a rendszer ellentmondás-mentessége vagy túlhatározottsága, illetve a bizonyítható tételek alkotják a kutatás tárgyát, és az állítások igaz voltának egyedüli kritériuma a logikai konzisztencia. A természet leírásakor azt vizsgáljuk, hogy az egyes jelenségekben miként érvényesülnek a már megismert törvények, elegendők-e a megértéshez, vagy további feltevésekre van szükségünk, esetleg eddig nem ismert törvények rajzolódnak ki általuk stb., és a helyességhez ugyan szükséges, de nem elegendő a logikai konzisztencia, a döntő kritérium mégiscsak a tapasztalattal való egyezés. Ilyen módon – annak ellenére, hogy például a fizika „munkanyelve” a matematika – lényeges különbség van a matematikának és a természettudományoknak a tárgyukhoz való viszonyukban. A II. világháború után, a társadalomtudományok felértékelődésekor azok művelőiben is megjelent egyfajta igény a természettudományok tudományosságképének átvételére („mérés”, matematizálás). Ezek a kísérletek komoly eredményeket hoztak, de sokak számára világos: ahogy a természet megismerése és leírása nem a matematika logikáját követi, úgy a gazdaság- és társadalomtudományokban sem várható el, hogy a természettudományok sajátosságai érvényesüljenek. Hogy csak néhány okot említsünk: itt a megismerés folyamatában a kísérletezés lehetősége szinte kizárt, és a szabályszerűségek jellege is más kell hogy legyen, hiszen a fizika törvényei mindenhol ugyanazok, a társadalom összefüggései viszont erősen kultúrafüggők; vagy például a természet törvényei attól függetlenül működnek, hogy mi mit gondolunk róluk, szemben a gazdasággal és a társadalommal, ahol a jelenségeket (a résztvevők döntésein keresztül) alapvetően befolyásolja, hogy a szereplők miként vélekednek felőlük.⁶ Ebből természetesen nem következik, hogy ezen területek igényes művelése ne lenne tudomány, csak e tudományosság tartalma igazodik a

vizsgált jelenségek lehetőségeihez (például annyiban, hogy sokkal tágabb tere van a különböző értelmezéseknek és újraértelmezéseknek). Általában elmondható, hogy az egyes tudományokat (diszciplínákat) erősen meghatározza a megismerés tárgyának természete, ehhez igazodik a vizsgálódás módszere, a tudás ellenőrzésének és a megbízható tudás elfogadásának rendszere is. (Megjegyzendő, hogy ebből a sokak által az „akadémikus korra” jellemzőnek mondott tudomány-, illetve tudományosságképből nem kilógnak, hanem jól beilleszkednek az interdiszciplinárisnak és multidiszciplinárisnak nevezett kutatások, amíg azok megfelelően igazodnak az érintett diszciplínákhoz.)

A posztmodern tudománykép

Ezt a felfogást az elmúlt évtizedekben komoly támadás érte az egyre terjedő *posztmodern* gondolkodás – főleg bölcsész hátterű – képviselői részéről. A 1990-es évekre Amerika és Nyugat-Európa egyes egyetemein a tudományok mibenlétét vizsgálók bizonyos köreiben elterjedt egy, a hagyományos értékeket megkérdőjelező, relativista szemlélet, amelynek jegyében kétségbe vonták a tudományok kitüntetett szerepét⁷ a megismerésben (és világunk értelmezésében), egyáltalán, hogy képesek lennének megbízható tudást generálni. Ezek a tudományfilozófia, tudománytörténet, tudományszociológia stb. posztmodern irányzatait követő, összefoglaló néven *tudománytanulmányokat* művelő kutatók úgy gondolták (gondolják), hogy a tapasztalat nem határozza meg egyértelműen a magyarázatokat (sőt, akár végtelen sok egyenértékű magyarázó elv is lehet), és a tudományok tartalma is (legalább részben) társadalmilag meghatározott. (Ez tulajdonképpen „a lét meghatározza a tudatot” marxista tétel⁸ egyfajta újraértelmezése és kiterjesztése a matematikára és a természettudományokra is.)⁹ Úgy tűnik, mintha az előzőekben vázolt

⁶ Erről részletesen ír *Soros György* is a *Lehetetlen megkísértése* című könyvében (2000 Egyesület, Budapest, 1991.) a kritikai gondolkodás elemzésekor. Nézetei elgondolkoztatók: „Maga a-társadalomtudomány» kifejezés is hamis metafora. A tárgyhoz illőbb lenne a társadalmi jelenségek tanulmányozását alkímiának mondani, mivel e jelenségek a kísérletező akaratától függetlenül gyúrhatók, formálhatók oly módon, ahogy a természeti jelenségek soha. [...] A társadalomtudományoknak mérhetetlenül sok kárt okozott, hogy megpróbálták szolgálai utánozni a természettudományokat.” (211. old.)

⁷ *Paul Feyerabend*től származik az a kijelentés, hogy „Nincs tehát világosan megfogalmazható különbség mítoszok és tudományos elméletek között. A tudomány egyike az emberek kialakította számtalan életformának, és nem is föltétlenül a legjobb. Hangos, pimasz, drága és föltűnősködő.” Feyerabend P.: *Against Method*. New Left Books, London, 1975. (Magyarul: *A módszer ellen*. Atlantisz, Budapest, 2002.)

⁸ A marxizmus ezen elképzelésre alapozva jelentette ki, hogy a társadalom tekintetében egyedül a munkásosztály képes az igazság felismerésére, az elnyomó osztályok nem.

⁹ Itt a társadalmi meghatározottságon azt értik, hogy a tudományos eredmények is magukon viselik a társadalom aktuális (kulturális, hatalmi stb.) állapotának lenyomatát. (Lényegében ezzel rokon az az időről időre felbukkanó, feminista eredetű vélekedés is, miszerint a tudományok azért olyanok, amilyenek, mert általában férfiak művelték őket.)

folyamat irányával ellentétben nem a természettudományok struktúráját állítják példának a társadalomtudományok elé, hanem a társadalomtudományok, a társadalomértelmezés tapasztalatait és jellemzőit tekintik érvényesnek és irányadónak minden tudományra, még a „kemény tudományokra” is. Az ezzel kapcsolatos viták sorozatát szokás tudományháborúnak (science wars) nevezni [1, 2]. Ez napjainkban elülni látszik anélkül, hogy az igazán fontos kérdésekben konszenzus alakult volna ki, és eredményként kettős kép él a természettudományokról: leendő mérnökeink, természettudósaink és tanáraink más tudományképpel találkoznak a tudományfilozófiai kurzusokon, mint amit a szaktanáraik vagy idősebb kollégáik próbálnak átadni nekik.

Mindezzel párhuzamosan – főleg a társadalomtudományok területein – megjelent egy újfajta kutatási stratégia, amelyet studies-nak, azaz *tanulmányoknak* neveznek (mint például tudománytanulmányok vagy gendertanulmányok stb.). A hagyományos értelemben vett tudományok, és az azok helyét gyakran elfoglalni törekvő tanulmányok közötti különbség röviden úgy fogalmazható meg, hogy a tanulmányoknak nevezett gyakorlat elveti a tudományok módszertani fegyelmét, és – a „bármilyen elmegy” elvének¹⁰ megfelelően – meglehetősen szabadon kezeli a vizsgálódás szempontjait és módszereit.¹¹ Ebből egyenesen következik, hogy a két stratégia konfliktusba kerülhet, és a tudományok szempontrendszerében a tanulmányok állításai gyakran nem tekinthetők megalapozottnak. A kétféle irányzat között a tudományos érveken alapuló vita lényegében elképzelhetetlen, mert a tanulmányok művelői pont azon módszertani alapok kitüntetett és számon kérhető voltát kérdőjelezzik meg, amelyek mentén bírálják őket. Ugyanakkor a tanulmányok művelői tevékenységüket tudományos értékűnek gondolják (és ennek elismerését el is várják) annak ellenére, hogy saját tudományosságkritériumaikat nem tudják (nem akarják, talán nem is lehet) megfogalmazni. Meg kell jegyezni, hogy számos modern kutatási területen, a kutatás tárgyának természetéből adódóan nem lehetséges a tudományokra jellemző megközelítés, és valóban egy más jellegű, sokszempontú és többféle módszert alkalmazó vizsgálódás a

¹⁰ A már idézett, ismeretelméleti anarchistaként is emlegetett Paul Feyerabend hírhedt nézete. Eszerint módszertanilag „bármilyen elmegy”, ami alkalmassá teszi a tudományt arra, hogy megfeleljen a saját társadalmi szerepével szemben támasztott követelményeknek, azaz a társadalommal tudományosnak fogadtatható el. (Feyerabend id. mű.)

¹¹ „Eszközök vonatkozásában a hagyományosan eltérő kulturális szférákban kialakult és eredendően kizárólagosan azokban használt elemző módszerek célszerűnek mutatózó gátlástalan kombinációi tűnnek fel. Egy kiválasztott téma kapcsán akár filozófiai, szociológiai, antropológiai, politikai, gazdasági és történeti módszereket, illetve ezek sajátos kombinációit egyaránt be lehet vetni a téma alaposabb megértésének jegyében. [...] Az új kutatási stratégiának neve is van: studies-nak (tanulmányoknak) hívják, hogy megkülönböztessék az egyes diszciplínákban begyakorolt és fegyelmezetten alkalmazott »szakyszerű« [idézőjel az eredetiben] metodológiáktól.” (A már idézett *Bevezetés a tudományfilozófiába* című egyetemi jegyzet, 152. old.)

célravezető, de ebből nem következik, hogy a diszciplína (mint módszertani fegyelem) bárhol feladható lenne, ahol egyébként követhető.

A posztmodern gondolkodás nem csak – és nem is elsősorban – az újfajta „tudásszerzés” összefüggéseiben jelenik meg, tulajdonképpen egész korunkat áthatja. A tudományokkal kapcsolatban manapság megfogalmazott gondolatok és kívánatosnak tekintett attitűdök lényegében jelen vannak a hétköznapi gondolkodásban is, ahol sokszor kifejezetten pozitív dolgoknak tekinthetők, ezért hangsúlyozásuk akkor is szimpátiát vált ki, ha történetesen éppen fellázítják azokat a normákat, amelyek a tudományos gondolkodást kiemelték a más típusú gondolkozásmódok közül. Példaként említhetjük a „posztdiszciplináris tudástermelés” két kiemelten fontos jellemzőjét, a napjainkban megkülönböztetett értéknek tartott rugalmasságot és a kreativitást (lásd az 5. lábjegyzetet). A valóság megismeréséhez ezek valóban elengedhetetlenek, de ahhoz, hogy a felismerni vélt összefüggésekből igazolt tudás legyen, feltétlen szükséges az egyes diszciplínák módszertani fegyelme, pont az, amitől a tanulmányok, mint kutatási stratégia, szabadulni próbál. Ilyen módon a mindennapi gondolkodásunkban joggal értékesnek tartott elemek ellentétbe kerülhetnek a természettudományokban megszokott és ott sikeresnek bizonyult gondolkozásmóddal. A továbbiakban néhány, a tudományok gyakorlatával valamilyen szinten szembenálló, de az új „tudástermelésben” határozottan megjelenő, részben bölcséleti jellegű, részben pedig elvárás szintű posztmodern elképzelést mutatok be.

Az igazság relativitása

A gyakran idézett felfogás szerint az igazság úgymond kontextusfüggő,¹² nincs az értelmezési kerettől független igazság, minden állítás csak egy adott összefüggésrendszerben lehet érvényes és értelmezhető. Ez így tulajdonképpen magától értődő, de az e köré csoportosítható, erre „alapozott” állítások már sokszor meghökkentők és elfogadhatatlanok, legalábbis általánosságban nem igazolhatók. Ilyenek például, hogy „nincs igazság, csak jobban vagy kevésbé védhető álláspontok vannak”, vagy hogy ugyanazon dologról „különböző kontextusokban akár egymásnak ellentmondó állítások is lehetnek igazak”. A mindennapi életben gyakran találkozunk olyan esetekkel, amelyek igaznak tekinthető interpretációját nem találjuk, esetleg különböző, egymásnak ellentmondó véleményekben egyaránt „van igazság”. Ott számíthatunk ilyesmire, ahol a „jelenség” nem ragadható meg néhány egyszerű fogalom és a köztük lévő viszonyok által. Ezért például nem lepődünk meg, ha különböző társadalom- vagy gazdaságelméletek nem hozhatók

¹² Itt a „kontextus” fogalma jóval bővebb, mint a „szöveggörnyezet”, tulajdonképpen magába foglalhat mindent, ami egy adott szempontból meghatározó lehet.

összhangba,¹³ de ennek összes tudományra történő általánosítása hibás. Történetesen a fizika állításai sem ilyenek. A fizika (vagy tágabban a természettudományok) esetében a kontextus alatt azokat a körülményeket kell értenünk, amelyek egy jelenség (megfigyelés, mérés) szempontjából relevánsak.¹⁴ Ezek meghatározzák az összefüggések azon rendszerét, amelyben az adott jelenség értelmezhető. Más körülmények között, azaz más kontextusban esetleg más lesz az értelmezés, de – a körülmények különbözősége miatt – a különböző értelmezések nem lehetnek egyszerre igazak, vagy ha igen, nem lehetnek konfliktusban. Ezt jól világítja meg az alábbi egyszerű példa. Ha valami nem túl nagy vagy kicsi tömegű, és nem túl gyorsan halad, akkor mozgása a klasszikus mechanika fogalmi rendszerével leírható, a mozgásegyenlet megoldásával a pálya megadható. Ha az adott test tömege nagyon kicsi (atomi méretű), a mozgása a kvantummechanika keretein belül értelmezendő, ami kor is nincs határozott pálya, mert a határozatlansági reláció miatt az adott részecske helye és impulzusa (sebessége) egyszerre nem ismerhető. A legtöbb esetben világosan eldönthető, milyen leírás adandó, de a határesetben sincs ellentmondás: a tömeg növelésével az impulzus relatív bizonytalansága csökken, a sebesség egyre nagyobb pontossággal értelmezhetővé válik, és a klasszikus pálya kirajzolódik. Ez a fajta tiszta kép a már lezárt területekre jellemző, azokra, amelyek esetében már nem várjuk, hogy ismereteinket alapvetően kelljen átértékelni. Természetesen a kutatás frontjain lehetnek viták, versenghetnek ellentmondó elméletek, de itt sincs több párhuzamos igazság, legfeljebb nem tudjuk, hogy melyik leírás a helyes, vagy hogy a különböző leírások milyen módon hozhatók összhangba. A tapasztalat azt mutatja, hogy a viták előbb-utóbb meggyőzően eldőlnék,¹⁵ és az újabb ismeretek már nem kényszerítik ki a régebbiek átértékelését, hanem csak azok érvényességi körét pontosítják. (Ezért érthetetlen, miért beszélnek egyesek arról, hogy tapasztalataink magyarázatára akár végtelen sok különböző elv is létezhet. Hol vannak ezek?)

A kontextusfüggő igazság elképzelése ijesztő távlatokat nyithat meg, ahogy ez az asztrológiát újra tudományként, vagy legalábbis értelmes tudástípusként elismertetni szándékozók aktivitásában is megmutatkozik. Azt gondolhatnánk, az asztrológia tudományta-

lását kellőképpen bizonyítja, hogy nem sikerül semmiféle igazolható korrelációt kimutatni a csillagok állása és az emberi sorsok alakulása között. Ha így gondoljuk, tévedünk, ez nem elég. Olyan érvek jelennek meg az asztrológia mellett, hogy mindazok a kritériumok, amelyek az asztrológia megalapozatlanságát hivatottak bemutatni, a konkurens(!?) tudományosság által támasztott feltételek, és igazából csak akkor lehetne érdemben megítélni az asztrológiát, ha sikerülne a tudományokon kívüli, mintegy semleges nézőpontból vizsgálni. Megfogalmazódik az az érv, hogy a tudomány (melyik is?) és az asztrológia két teljesen különböző rendszer, és értelmetlen az egyik szempontrendszerében vizsgálni a másik sikerességét. Nevezetesen ahhoz, hogy „az asztrológia gyümölcsöző vagy meddő voltát megállapítsuk, módszertanát feltérképezzük, sikerességekritériumait azonosítsuk, *igazság- és objektivitásfogalmát* [kiemelés tőlem, W.F.] megértsük, először meg kell kísérelnünk, hogy behelyezkedjünk a saját hagyományába” [1]. Ez a gondolat azért veszélyes, mert az igazság végtelen relativizálását tartalmazza. Abban nincs vita, hogy az igazság egy sokkal gazdagabb fogalom, mint a kétértékű logika igaz-hamis ítéletpárjának egyike. Az sem kérdéses, hogy az igazság tartalma és alapja (mit és miért gondolunk igaznak) nagyon sokféle lehet, de a tudományokban maga az igazság fogalma (mint a valóság tényei, és az ezekről szóló állítások egymásnak való megfelelése) megegyezik a józan ész igazságfogalmával, tehát az adott tudományok ismerete nélkül is jól körülírható. Itt nem ez a helyzet: nem csak az igazság tartalma, hanem az is, hogy mit kell értenünk igazságon, mit jelent az, hogy valami igaz, maga is kontextusfüggő, sőt, a kontextus (jelen esetben az asztrológia) ismerete nélkül kísérletet sem tehetünk arra, hogy megragadjuk.

Az ideológia és az aktivista attitűd

A tudományok általában a saját szempontrendszerükben, a saját módszertanukat követve vizsgálják tárgyakat, de számos új kutatási területen több tudomány együttműködése szükséges a tárgy megfelelő megismeréséhez. Ez a fajta többszempontúság nem kell, hogy szétfeszítse a hagyományos tudományosság kereteit, de magában hordozza ennek veszélyét. Ahogy azt már említettük, ez szinte programszerű a tanulmányok esetében, amelyek a tárgy alaposabb megismerése ürügyén különböző hagyományok szempontrendszerét és módszertanát elegyítik sajátos elképzelések és előfeltevések mentén. Ennek akár tankönyvi példája is lehetne a kritikai pszichológia, amely az alábbiak szerint határozza meg magát [3]: „A kritikai pszichológia nem külön irányzat, hanem olyan törekvés és mozgalom, amely a mainstream pszichológia elméleti és módszertani előfeltevéseit, az ezekhez kapcsolódó gyakorlatokat, illetve a társadalom hatalmi viszonyait vizsgálja kritikai megközelítésben. A kritikai szemlélet többféle forrásból fakad,

¹³ Ennek frappáns illusztrációját mutatja a Közgazdasági Nobel Emlékdíj. Az elmúlt év(tized)ekben számos, a gazdaság szereplői részéről racionális és optimumra törekvő döntéseket feltételező elmélet érdemelte ki ezt a magas elismerést, 2017-ben viszont egy olyan munka kapta, amely arra épül, hogy az előbbi alapfeltevések rendszerszinten sérülnek.

¹⁴ Például a mikrofizika területén a kontextualitás problémája egy jól meghatározott méréselméleti probléma, nevezetesen azzal a kérdéssel kapcsolatos, hogy egy objektum megfigyelt tulajdonságai mennyiben függetleníthetők a mérés módjától (a mérés kontextusától). Itt ezzel a kérdéssel nem foglalkozunk.

¹⁵ Ennek folyamatát a tudományok tartalmának társadalmi meghatározottságát hirdető az érdekelt tudományos műhelyek közötti alkudozásoként és üzleti jellegű megállapodásokként értelmezik.

részben a pszichológián kívüli, filozófiai, szociológiai és kultúrantropológiai irányzatokból, részben pedig a pszichotudományokon belül létrejött kritikai törekvésekből [...]” Ebben figyelemre méltó annak nyílt felvállalása, hogy egy eddig autonómnak tekintett tudománnyal szembeni kritikai attitűd (legalább részben) az adott *szaktudományon kívüli* forrásokból ered. Kiemelten fontos a filozófia megjelenése is, amit nehéz nem az *ideológia* behatolásaként értelmezni. Ez kiegészülve a (deklarált) mozgalmi törekvésekkel, inkább egy ideológia köré szerveződő mozgalom, mintsem egy a jelenségek hű és érzelmentes (*sine ira et studio*) leírását célzó tudomány képét mutatja. Meg kell jegyezni, a mozgalmi attitűd, az aktivista szemlélet megjelenése a tanulmányok (mint *studies*, azaz az új „tudástermelő” tevékenységek) területein sokkal általánosabb, mint gondolnánk! Bizonyos esetekben, például a gendertanulmányoknál ez szembeötlő,¹⁶ de például a tudománytanulmányok programjaiban is határozottan fellelhető.¹⁷ Meglepő nyíltsággal, közvetlen teendőként fogalmazódik meg, hogy „a »Tudomány Hósi Eposza« helyett emberközeli tudományképet [kell] nyújtani. Meg kell fosztani a tudományt a hamis pátoasz azon légkörétől, amely a laikusok számára elérhetetlen és magasztos régiókba emeli a tudományos ismereteket, és a »nagy elbeszélés« (vagy mítosz) demagóg [sic!] terjesztése helyett olyan képet kell nyújtani a tudományról, ami a lehető legpontosabban lefesti annak valódi természetét.” [4] Afelől, hogy mit is gondolnak a tudomány „valódi természetéről” azok, akik a tudományok hagyományosan elismert értékeit mítosznak, demagógiának mondják, nem lehetnek illúzióink [2]. De van ebben a programban egy igen veszélyes mozzanat, a *közértebtőség normának tekintése*, amit érdemes részletesebben is meggondolnunk.

A rendszerezett, széles körben sikerrel alkalmazható, a közfelfogásban tudománynak nevezett tudás társadalmi presztízsének, rangjának, a vele kapcsol-

latban érzékelhető tiszteletnek és bizalomnak nem egyszerűen a sikeresség a forrása. Fontos, hogy művelésük a mindennapi intellektuális tevékenységeknél többet igényel, olyan képességeket, illetve felkészültséget, amellyel az emberek többsége csak kisebb mértékben rendelkezik. Mindemellett természetes módon jelenik meg az az igény, hogy az emberek minél többet szeretnének megérteni a tudományok eredményeiből. Ezt hivatott kielégíteni a *tudományos ismeretterjesztés*, ami a szinte lehetetlenre vállalkozik: közérthetően, kifinomult eszközök nélkül elmondani azt, ami nem szemléletes és aminek lényege éppen az emberek nagy része által nem uralt eszközök segítségével ragadható csak meg. Az erre való igény óriási, gondoljunk csak a modern fizika utóbbi években tett felfedezései (például a gravitációs hullámok vagy a Higgs-bozon) körüli izgalmakra. Ezek valóban szenzációsak, de a megfelelő matematikai apparátus nélkül még a szakmabelieknek is nehéz elmondani, mi is hullámozik az egyikben, vagy mi köze a másiknak az elemi részecskék tömegéhez. Ezért azután megmosolyogtató, amikor egy tv-műsorban arra kéri egy szakterület tudósát, hogy foglalja össze néhány szóban a dolog lényegét. Ezzel persze nincs baj, az ott kezdődik, ha valaki komolyan veszi, hogy a tudomány így elmondható,¹⁸ illetve hogy az a jó tudomány, ami így elbeszélhető. Ez még a bölcseszeti- és a társadalomtudományok esetében sincs feltétlen így, pedig azok nyelve közel áll a hétköznapi nyelvhez, de biztosan nincs így, például a fizika esetében, amelynek természete szerinti nyelve a matematika.¹⁹ Ezért a mindennapi emberek felkészültsége és a tudományos eredmények érthetősége közötti távolságot a tudomány művelői részéről fenntartott hamis pátoasznak nevezni a tudományokat létrehozó intellektuális teljesítmény súlyos leértékelése. Ilyent csak olyanok mondhatnak komolyan, akik szerint a tudomány nem több, mint ami az ismeretterjesztésben megjelenik.

Záró gondolatok

Az előzőekben áttekintettük a tudományokról való posztmodern gondolkodás néhány elemét, amelyek lassan, de szisztematikusan erodálják a tudományok

¹⁶ Ez erős hangsúlyt kapott nemrég az egyetemi genderszakok körül fellángolt vitákban, de a jelenség külföldön már korábban is ismert volt. *Heller Ágnes* az akkor még „nemtudományoknak” nevezett gendertanulmányokat a biopolitikai mozgalom tudományos legitimitációjára irányuló tevékenységként írja le: „Ha pillantást vetünk arra, hogy az Egyesült Államok főiskoláin és egyetemein gomba módra szaporodnak a nemeket tanulmányozó tanszékek, akkor ezt a jelenséget azon hatalmas lobbyk befolyásolásának tulajdoníthatjuk, amelyek, mint általában, új és jövedelmező pozíciót biztosítanak a lobbytagok számára. [...] A nemeket tanulmányozó tanszékek és azoknak az úgynevezett tanulmányoknak a sokasága, melyek állítólag a kulturális sokféleséget ösztönzik, azt a célt szolgálják, hogy valamelyik lobbyt tudományos színben tüntessék fel.” (Megváltoztatta-e a biopolitika a politika fogalmát? *Világosság*, 1994/11)

¹⁷ „Without programmatic announcements or even fanfare, the center of gravity of STS [Science and Technology Studies] has moved markedly toward the terrain of the engaged program.” (saját fordításban: A tudomány- és technológiatanulmányok súlypontja minden programdeklaráció vagy harsonaszó nélkül határozottan eltolódott a [társadalmilag] elkötelezett programok felé.) S. Sisondo: Science and Technology Studies and an Engaged Program. In *The Handbook of Science and Technology Studies* (szerk.: E. J. Hackett, O. Amsterdamska, M. Lynch, J. Wajcman) Third Edition, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 2007, 21. old.

¹⁸ Ez a gondolat a magyar tudományosság intézményeiben is terjed: az MTA Doktora cím elnyerésért benyújtott és sikeresnek ítélt dolgozatok esetében a bíráló bizottságnak a nem szakmai nyilvánosság számára érthető módon is össze kell foglalnia azon eredményeket, amelyeket pozitívan értékelt.

¹⁹ Erről *R. P. Feynman* így ír *A fizikai törvények jellege* című könyvében (Akkord Kiadó, 2005.): „A fizikusok nem térhetnek át egy másik nyelvre. Ha a természetről akarnak ismereteket szerezni, méltányolni akarják annak szépségeit is, akkor érteniük kell azt a nyelvet, amelyen hozzánk szól. Így fejezi ki magát, és mi nem lehetünk olyan szerénytelenek, hogy azt kérjük, szóljon másképpen, hogy odafigyeljünk rá. [...] A filozófusok megpróbálkoznak a természet kvalitatív jellemzésével. Én megpróbálok egy valóságghú képet rajzolni róla. De nem tudok, mert ez – matematika nélkül – lehetetlen.”

ethoszt. Partikuláris problémának tűnhetnek, de beépülnek a közfelfogásba, és hatásukat nem szabad lebecsülni.

Az elmúlt évtizedekben számos új tudomány jelent meg, illetve új tudástermelő tevékenység fogalmazta meg igényét a társadalmi elismerésre, valamint az ezzel járó tekintélyre, befolyásra és anyagi támogatásra. Az új kutatási gyakorlatok egy része az újszerű megközelítés mellett is kétség kívül tudomány. Más részük a megfelelő fogalmi keretek megteremtésével a (társadalmi) valóság újabb és újabb területeit teszik szisztematikus vizsgálódás tárgyává, de az adott jelenségek természetéből adódóan a tudományokban elvárt objektivitás lehetősége igen korlátozott. Megint mások előzetes koncepciók köré szerveződött, erős mozgalmi elszántsággal működő tevékenységek. Néhány éve teljes polgárjogot nyert a „post-truth” kifejezés, amely olyan körülményekre utal, amelyekben kevésbé az objektív tények, inkább az érzelmekre és a személyes meggyőződésre, illetve hiedelmekre való hivatkozás alakítja a közvéleményt. Vannak, akik körunkat a politikában, a társadalmi életben és a tömeg-tájékoztatásban egyre erősödő tendenciák miatt egye-

nesen „post-truth” érának látják,²⁰ és fennáll annak a veszélye, hogy a negatív tendenciák egyre szélesebb területeken érvényesülnek [5]. Ilyen körülmények között a tudományosság intézményeinek, akadémiáknak és egyetemeknek, az egész tudományos társadalomnak óriási a felelőssége, hogy mit legitimál tudományként, mi az, amiért „garanciát vállal”.

Irodalom

1. Kutrovácz G., Láng B., Zemplén G.: *A tudomány határai*. Typotex, Budapest (2009) 151. old.
2. Woyrnarovich F.: A tudományháború megjelenése az ismeretterjesztésben. *Valóság* (2016/7) 87–98.
3. <https://www.elte.hu/content/ii-kritikai-pszichologia-konferencia.e.4446>
4. Kutrovácz G.: *A napneutrínó-probléma szociológiája és filozófiája*. Országos Csillagászati Szeminárium (ELTE TTK Csillagászati Tanszék), 2001. TDK-dolgozat, 2001. <http://hps.elte.hu/~kutrovacz/neutrino>
5. Rédey S.: Tudománykommunikáció az „igazságon túli” világban. *Magyar Tudomány* (2019/11) https://mersz.hu/hivatkozas/matud_f31233#matud_f31233

²⁰ A „post-truth” kifejezést az *Oxford English Dictionary* a 2016-os év szavának választotta. Ma filozófiai és szociológiai kurzusokat és konferenciákat szerveznek a jelenség megértésére.

A FIZIKA TANÍTÁSA

A KLEPSZIDRÁK FIZIKÁJA

Stonawski Tamás, Kiss Tamás
Nyíregyházi Egyetem

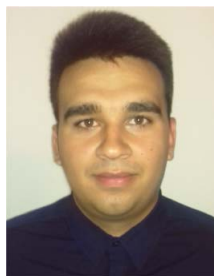
Elgondolkoztunk már azon, hogy egy hengeres alakú, vízzel teli, alul lyukas edényben miként csökken a vízszint? Könnyen belátható, hogy nem egyenletesen, hiszen az alsó kifolyónyíláson folyamatosan csökken a hidrosztatikai nyomás, ezzel együtt a kifolyó víz sebessége is (a Bernoulli-törvény alapján), így időegységenként egyre kevesebb víz ürül ki. Ha időmérésre szeretnénk használni e jelenséget, akkor a henger belső falát lefelé haladva egyre sűrűsödő beosztásokkal kellene ellátnunk (a helyes beosztás megállapításához további számítások szükségesek), egy másik lehetőség az edény alakjának megfelelő változtatása (lefelé szűkítése). A vízóra pontosságát pedig valamely megbízható időmérő eszközzel ellenőrizhetnénk.

Napjainkban az idő mérésére számtalan eszközt használunk, de az atomórával időzített okostelefonok modern korában is találhatóak igazi nagy klasszikusokat, például a homokórákat (jó szolgálatot tesznek a szaunában, vagy akár dolgozatírás idejének meghatározásakor, de a Windows várakozást „segítő” forgó homokórája is sokunk agyába égett).

Az időmérés kezdetén a Nap járását követő árnyékok megfigyelése adott alkalmat az első napórák elkészítésére. Azonban borús időben és éjszaka nem működtek a napórák, ezért (és az óránál jóval kisebb időegységek meghatározásához is) volt szükség bevezetni egy, a Naptól független (de ahhoz igazított) időmérő eszközt. Az egyik ilyen találmány volt az ókori



Stonawski Tamás a Nyíregyházi Egyetemen főiskolai adjunktus. Doktori címét 2016-ban az ELTE Fizika Tanítása doktori program keretében szerezte. Kutatási területe a digitális média alkalmazása a tanulói kreativitás, problémamegoldás és önálló kísérletezés fejlesztésére általános és középiskolában.



Kiss Tamás a Nyíregyházi Egyetem V. éves fizika-matematika osztatlan tanárszakos hallgatója. Főként az általános iskolában is bemutatható kísérletek tervezésével, valamint az ott hasznosítható demonstrációs eszközök készítésével foglalkozik.

kultúrákban elterjedt vízóra. A vízórák tulajdonképpen egy tartályból kifolyó (gyakrabban előfordul) vagy befolyó vízmennyiség időegységre váltásának felelnek meg (a vízórák kalibrációjához valószínűleg a napórákat használták fel).

A leggyakoribb esetben a vízórából a víz egy vékony csövön folyt ki (és nem csöpögött), és a megfigyelő a belső skálabeosztáson olvasta le az eltelt időt (1. ábra).

A vízórákat az ókorban elsősorban templomokban, bíróságokon, hivatalokban, munkahelyeken használták, de feljegyzések alapján ismeretes csillagászati számítások, órszégváltás, tanítási óra, zsilipnyitási idő meghatározására való alkalmazása is. A címlapon¹ szereplő összetett szerkezet egyszerre volt szélirányjelző, valamint nap- és vízóra.

A klepszidra fejlesztésében a görögök jártak élen, de a római időkben is használták a bíróságokon, politikai fórumokon a felszólalás időtartamának meghatározásához (ha valamely okból a felszólalás megszakadt, a lyukat viasszal tömítették el, így állítva meg a kifolyást). Az ókori orvostudomány a vízórákat pulzusszámlálásra is használta, de még az athéni bordélyokban is teret hódított. Fizikai kísérletekhez az újkorban Galilei használta először a vízórát annak bizonyításaképpen, hogy a szabadon eső testek gyorsulása állandó és egyenlő nagyságú. Egy tartályból vékony csövön át vizet engedett egy edénybe a lejtőn elindított golyó mozgásának időtartamára. A felfogott vizet egy pontos mérlegen megmérte, és ebből következtetett a mozgás idejére (a vízórát ingával hitelesítette) [2].

¹ A „Szelek tornya” nyolcszögletű – oldalai az Athénban uralkodó fő légáramlatok irányába mutatnak – márványból készült, 12 méter magas és 8 méter átmérőjű épület. Valószínűleg Kúroszi Andronikosz építette i. e. 100 vagy 50 körül (más források szerint azonban az i. e. 2. században) Athén agoráján. Később egy ortodox templom harangtornyaként, majd a török uralom alatt dervisek szent templomaként is használták – valószínűleg ennek is köszönheti fennmaradását. Ez időben keletkeztek azok a török feliratok, amelyek nyomokban még ma is láthatók belül a falakon. Bár már romos állapotban van, de még ma is látható-látogatható.

A torony nyolc, 2,8 méter hosszú oldalán lévő frízein a nyolc széliesen látható. Az ókorban a torony tetején volt Tritón, az ember-törzsű és halfarkú tengeristen bronzból készült szobra, amelyik mindig a szél irányába fordult. (A legenda szerint, amikor a szobor eltűnt, hetekig nem fúj a szél, s hatalmas volt a hőség Athénban.) Az oldalain található napórák után horológiumnak, azaz órának is nevezik a tornyot.

Az épület belsejében egy vízórát is elhelyeztek, nyomait ma is látni, tervrajzát sikerült rekonstruálni. A vízórát az Akropoliszról lefolyó víz működtette, amit egy ólomcsövön keresztül egy tartályba vezettek. Innen a víz egyenletes sebességgel egy kisebb méretű bronzból készült tartályba folyt, és folyamatosan emelte az abban lévő úszót. Ennek függőleges irányú mozgását egy finom lánc vitte az óralapra csigákon keresztül. Az óraszerkezetből távozó víz pedig szökőkutakat táplált. (Wikipedia nyomán)



1. ábra. Balra az 1904-ben Karnakban talált, egyik legősibb vízóra, amelyet III. Amenhotep fáraó (i. e. 1415–1380) uralkodásának idején alabástromból faragtak. Jobbra e legrégebből fennmaradt vízóra 1978-ban – az akkori vizsgálathoz – készült rekonstrukciója [1].



tette) [2]. Feljegyzésekből tudjuk, hogy Newton is készített ötletet vízórákat [3].

Napjainkban is felbukkannak újszerű építésű vízórák. Az egyik ilyen híres vízóra az úgynevezett „Time-Flow” óra (Bernard Gitton, fizikus-művész 1979). Ez a vízóra a történelmi változatok modern megközelítése. Gitton tervezése a gravitációra (Galilei szellemét megidézve) támaszkodik, órája több szifont használ, amelyekből a víz kanalakba áramlik, egy ingasort meghajtva. Ahogy az órába épített ingák kitérnek, úgy üríti a kanalakat is, egyenlő időközönként. A tényleges időmérést tehát egy kalibrált ingasor végzi, amelyet az óra tartályából vezetett vízáram táplál [4].

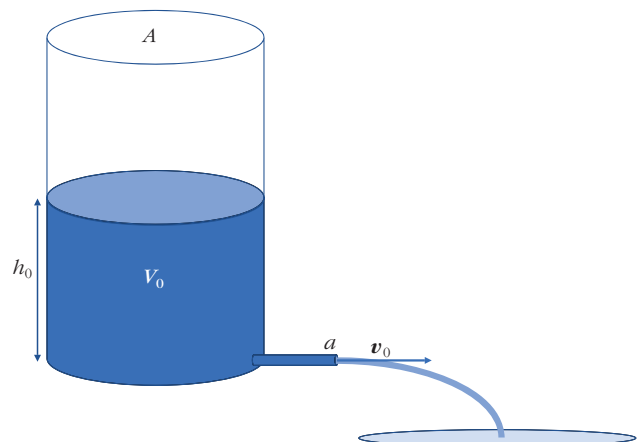
A henger alakú edény vizsgálata

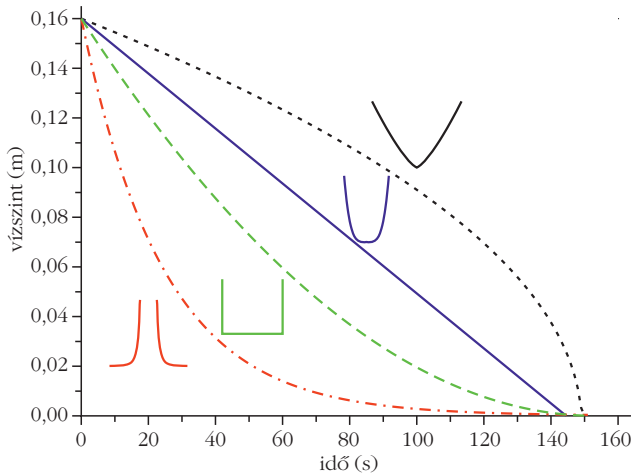
Ahhoz, hogy megtudjuk, milyen ütemben csökken a vízszint magassága (2. ábra), induljunk az alábbi differenciálegyenletről:

$$\frac{dh}{dt} = -\frac{1}{A} \frac{dV}{dt} \quad (1)$$

A $dV = -avdt$ – ahol $v \approx \sqrt{2gh}$ (mivel $(a/A)^2 \approx 0$ – összefüggés felhasználásával szeparálható differen-

2. ábra. A hengeres testből kifolyó folyadék számításához.





3. ábra. 16 cm magasságú, különböző formájú edények kifolyási görbéi. A kifolyónyílás méreteit úgy választottuk, hogy (a szemléletesség miatt) a kifolyási idő azonos legyen. Az ábrán jól látható, hogy a vízszintsüllyedés sebessége miként függ az edény alakjától.

ciálegyenlethez jutunk, amelynek megoldásából adódik a vízszintmagasság és az idő közötti másodfokú egyenlettel leírható kapcsolat:

$$h = \frac{a^2}{A^2} \frac{1}{2} g t^2 - \frac{a}{A} \sqrt{2 g h_0} t + h_0. \quad (2)$$

A forma és a süllyedés matematikai kapcsolata

Az egyenes körhengerből kifolyó víz során a vízszint tehát nem egyenletesen, hanem egy másodfokú egyenlettel leírható összefüggés szerint csökken. További vizsgálódásaink afelé irányulnak, milyen formájú lyukas edényekben csökken a vízszint egyenletesen vagy egyenletesen lassulva, illetve gyorsulva [5].

A forgásszimmetrikus edények formáinak meghatározásához a vízórák térfogatát kis magasságú korongokkal közelítjük. Az edényformák matematikai összefüggésének meghatározásához a vízszintmagasság függvényében kell megkeresnünk a korongok sugarát.

A térfogat definíciójából kiindulva a következőket írhatjuk fel:

$$dV = -A(y) dy = -A(y) \frac{dy}{dt} dt = -A(0) v dt. \quad (3)$$

A Torricelli-féle kifolyási törvény és (3) felhasználásával kapjuk:

$$\frac{dy}{dt} = \frac{A(0) \sqrt{2 g y}}{A(y)}. \quad (4)$$

A kifolyónyíláson kifolyó víz sebessége felírható a vízszintmagasság függvényeként:

$$v(y) = \frac{dy}{dt} = \frac{A(0) \sqrt{2 g y}}{A(y)}. \quad (5)$$

Mivel a tárgyalt vízórák forgástestek, $A(y) = r^2 \pi$ alakú, az egyenletes kifolyás miatt pedig a sebességet a $v(y) = \text{konst. } y^0$ alakban keressük, így a korong sugara és a vízszintsüllyedés közötti összefüggés:

$$A(0) \sqrt{2 g} \frac{y^{\frac{1}{2}}}{y^{\frac{1}{2}} \pi} \rightarrow r = y^{\frac{1}{4}} \rightarrow y = r^4. \quad (6)$$

A kifolyási sebesség vízszintmagasság függvényeként (korábban említve) több süllyedéstípust is megkülönböztethetünk:

$$v(y) \begin{cases} = \text{konst. } y^0 \text{ egyenletes } (y = r^4), \\ = \text{konst. } y^1 \text{ egyenletesen lassuló } (y = \frac{1}{r^4}), \\ = \text{konst. } y^{-1} \text{ egyenletesen gyorsuló } (y = r^{\frac{4}{3}}). \end{cases} \quad (7)$$

A matematikai összefüggések meghatározásával az edények formái megjeleníthetők (3. ábra).

Kísérletek és szimulációk

Az egyenletek alapján háromdimenziós képeket készítettünk a forgástestekről, majd CNC-eszterga segítségével azokat műanyagból el is készítettük [6].

A Tracker videóelemző program segítségével az elkészített vízórakon ellenőriztük a vízszintsüllyedés sebességét. A time-laps felvételek alapján (az elemzéshez bőven elég volt az 1 kép/szekundumos filmfelvételi beállítás is) elkészítettük az $y-t$ grafikonokat, amelyeket saját készítésű szimulációkkal is egybevetettünk.

A szimuláció alapalgoritmus a kontinuitási egyenlettel kiegészített Torricelli-egyenlet volt:

$$\frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} m v'^2 + m g h, \quad (8)$$

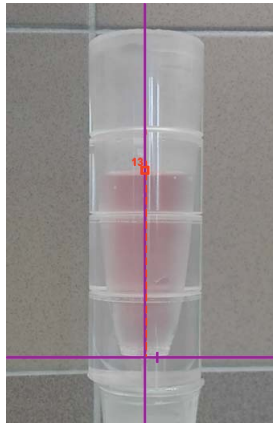
$$a v = A v'.$$

Az egyenletből $v-t$ kifejezve megkapjuk a kifolyónyíláson távozó vízszög pillanatnyi sebességét:

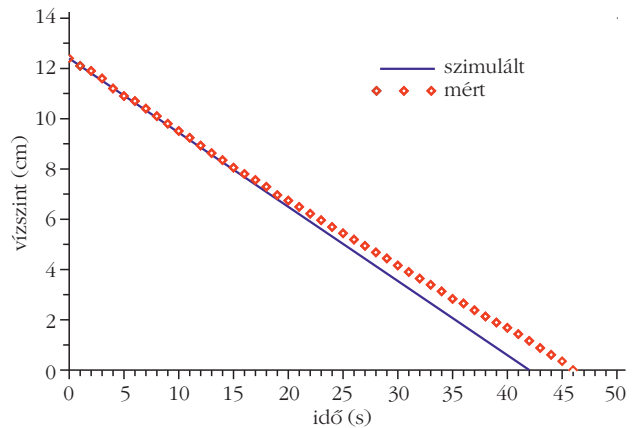
$$v = \sqrt{\frac{2 g b}{1 - \left(\frac{a}{A}\right)^2}}. \quad (9)$$

A szimulációk írásakor szintén a kis magasságú korongokra való felosztás gondolatát alkalmaztuk, azaz egy időegység alatt kifolyó, változó sugarú, kis henger-térfogatokkal számoltunk. A szimulációban a v sebességgel kiáramló víz térfogatát a kifolyó víz intenzitásából kiszámoltattuk, ez megegyezik a tartályban lévő vízmennyiség térfogatának csökkenésével, amelyből a vízszintcsökkenés értéke kiszámítható. A kezdeti vízszintből kivonva a vízszintcsökkenés értékét, megkaptuk az új vízszintértéket, amelyre addig folytattuk a ciklus számításokat, amíg a vízszint zérusra nem csökkent.

A lépésközt elegendő volt 1 s-ra állítani. Ez az eljárás a különböző alakú tartályokra is alkalmazható, azzal a különbséggel, hogy a keresztmetszetek számításainál figyelembe kell venni a sugár magasságtól való függését is. A kísérletek alapján kapott és az ideális folyadékmodell-szimuláció során számolt kifolyásiidő-értékek (4. ábra) különbözősége miatt szimulációnkat a kifolyónyílásnál történő áramvonal-sűrűsödéssel egészítettük ki (2/3-dal szoroztuk a kifolyó víz térfogatát) [Budó: Kísérleti fizika 262. o.]



4. ábra. Balra a videóelemzés egy fázisa az egyenletesen csökkenő vízszint ellenőrzésekor. $r = 1 \text{ mm}$ (a kifolyónyílás sugara), $h_0 = 12,4 \text{ cm}$, $t_{\text{mért}} = 47 \text{ s}$. Az $y-t$ grafikon képe egyenes, az állandó vízszint-csökkenés sebességének értéke: $v = 2,7 \text{ mm/s}$. A folytonos vonal a szimulációval kapott eredményt mutatja.



Az egyenletesen csökkenő vízszintsüllyedés szimulációjának algoritmusai:

```
t=0; h=0; i=0
h(1)=0.16 // vízszint kezdeti magassága (m)
g=9.81 // nehézségi gyorsulás (m/s^2)
dt=1 // lépés köz időtartama (s)
l=0; v=0; dV=0; dh=0; Atartaly=0
Rlyuk=0.005 // kifolyónyílás átmérője méterben
Atartaly(1)=((h(1)*100)^(1/2)/100)*pi // a tartály keresztmetszete (m^2)
Rtartaly(1)=(h(1)*100)^(1/4)/100 // a tartály sugara a magasság negyedik gyökével egyenlő
Alyuk=Rlyuk^2*pi // a lyuk keresztmetszete (m^2)
t(1)=0; v(1)=0; l(1)=0; dV(1)=0; dh(1)=0; i=1
while h(i)>=0; // Csináld, amíg ki nem ürül!
i=i+1
t(i)=t(i-1)+dt // idő léptetése
v(i)=sqrt(2*g*h(i-1)/(1-(Alyuk/Atartaly(i-1))^2)) // kifolyó víz sebessége
l(i)=Alyuk*v(i) // kifolyó víz intenzitása
dV(i)=l(i)*dt // dt idő alatt kifolyt víztérfogat
dh(i)=dV(i)/Atartaly(i-1) // dt idő alatt bekövetkező vízszintsüllyedés
h(i)=h(i-1)-dh(i) // a vízszint pillanatnyi helyzete
Atartaly(i)=((h(i)*100)^(1/2)/100)*pi // a tartály keresztmetszete a vízszintnél
Rtartaly(i)=(h(i)*100)^(1/4)/100 // a tartály keresztmetszetének a sugara a vízszintnél
```

Egy ókori vízóra „hitelesítése”

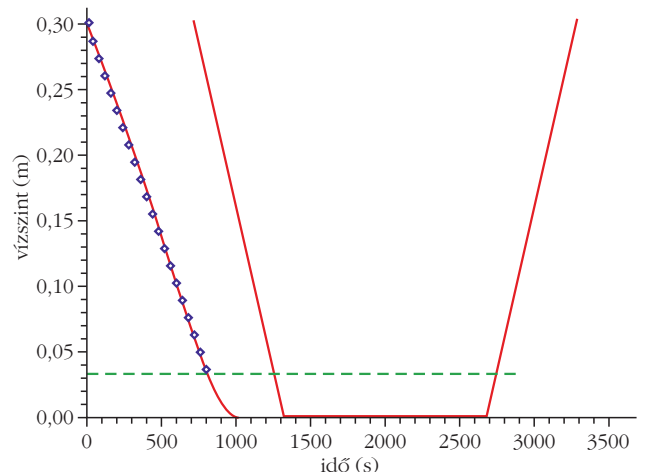
A múzeumból nem kérhettük kölcsön a vízórát, és annak 1978-as másolatát sem volt esélyünk megkapni, így más módszert eszeltünk ki az ókori szerkezet pontosságának ellenőrzésére. Az 1. ábrán látható vízóra alakjának egyenletét a GeoGebra programmal meghatároztuk és a már megírt szimulációba [7] beírtuk az alak egyenletet. A szimuláció lefuttatása nagy izgalommal töltött el bennünket, hiszen kíváncsiak voltunk az ókori tudomány precizitására. Az eredmény önmagáért beszélt: a vízszintsüllyedési sebesség szinte állandó maradt, az igazi eltérés csak a csap vonala alatt keletkezett

volna, de a víz onnan már nem folyhat ki az edényből. Felmerül a kérdés, vajon miként lehetséges, hogy a 4. hatvány helyett 1. hatványú alakegyenlettel is sikerült az egyenletes vízszintsüllyedés? A 4. hatványú egyenlettel kapott forgástestnek is van olyan része, amelyre jól illeszthető egyenes palást. Az 5. ábrát alaposabban megfigyelve, természetesen észrevehetjük, hogy a kifolyás kezdetén kicsit gyorsabban, majd a végén kicsit lassabban folyik ki a vázából a víz, azaz felül szélesíteni, alul pedig szűkíteni, a középső részen pedig változatlanul kellene hagyni az edény alakját. Valószínű, hogy az ókorban olyan mérési pontosság nem állt még rendelkezésre, amivel ezeket az eltéréseket észreveheték, így pusztán csak a dőlésszög változtatásával érheték el az egyenletes vízszintcsökkenést.

Tanórai alkalmazás

A 7. osztályban már találkozunk a hidrosztatikai nyomás fogalmával, a hengeres edényből kifolyó víz sugarak pályája alapján a tanulók felismerik hogyan függ a

5. ábra. Az egyiptomi vízóra „hitelesítése” a fényképe alapján. Jobb oldalon az edény formája, bal oldalon folytonos vonallal a szimuláció, körökkel a rá illesztett egyenes látható. A vízszintes szaggatott vonal a csap magasságát jelzi.



nyomás a vízoszlop magasságától. Ehhez az anyag-részhez kapcsolódva szakköri vagy projektmunka keretén belül stopper segítségével bejelölhetik egyenletes időközönként a hengeres edényből kifolyó vízszintmagasságokat, azok egyenletlenségeiből összefüggéseket vonhatnak le és az ókori elvek alapján megkereshetik az ideális vízóraalakot.

Középiskolában már sokkal inkább alkalmazhatjuk a videóelemző és szimulációs programokat, illetve izgalmas kalandozásokban lehet részünk, ha vizsgálódásaink körébe a történelmet is bevonjuk. Ellenőrzéseket végezhetünk ókori szerkezetekkel, azokat – aktuális tudásszintünknek megfelelően – továbbfejlesztjük. A projektek bemutatása és élményszerű elő-

adása is mind több tanulóval ismertetheti meg a fizika valódi komplex világát, rádöbbsentve őket, hogy fizika nélkül a hétköznapi eszközök működése és a világ jelenségei mindörökké rejtélyben maradnának.

Irodalom

1. <https://www.topoi.org/project/a-3-8/>
2. Simonyi K.: *A fizika kultúrtörténete*. 192. o.
3. Szilágyi J.: Nagy tudósok az órákészítés történetében. *Szemle* 110/3 (2005. június)
4. B. Gitton: „Time, like an everflowing stream.” Trans. Mlle. Annie Chadeyron. Ed. A. Randall. *Horological Journal* 131 (1989) 18–20.
5. Berkes I.: *A mindennapok fizikája*. Springer, Leverkusen, 1999.
6. https://1drv.ms/u/s!An0er2QwwGjytubt_F1IDSn4h8k?e=f2o7yP
7. <https://1drv.ms/u/s!An0er2QwwGjytW06tMLd3pg3jPRd?e=VdC4RB>

TETTEN ÉRT TUDOMÁNY:

A SZUPRAVEZETÉS JELENSÉGÉNEK FELFEDEZÉSE, 1911

Kamerlingh-Onnes előadása az első Solvay-konferencián

Vantsó Erzsébet
Budapest

2019 nyarán több nagy rendezvény is várta a magyar fizikusokat és fizikatanárokat. Nemcsak a háromévenként rendezett *Fizikus Vándorgyűlés* éve ez. Júliusban Budapesten tartotta nagykonferenciáját a *GIREP* (Groupe International de Recherche sur l'Enseignement de la Physique), az 1966-ban a fizikaoktatás fejlesztésére alapított nemzetközi szervezet is. Az öszszejevetelt utoljára éppen 30 éve, 1989 őszén, *Marx György* professzor szervezésében rendezték Magyarországon. Most magyar részről az ELFT, az MTA SZTAKI és a konferenciának helyet adó BME rendezésében, a GIREP magyarországi képviselőjeként *Jarosievič Beáta* és *Sükösd Csaba* kezdeményezésére szervezésében ismét Magyarországon gyűltek össze a fizikaoktatás nemzetközi prominensei.

A zsúfolt rendezvénynapotárakba belepillantva láthatjuk, hogy a kutatóknak számos, a fent említettekhez hasonló lehetőség áll rendelkezésére, hogy megosszák egymással nemcsak eredményeiket, hanem akár születőben levő új gondolataikat is. Az oly fontos személyes találkozásra és eszmecsere-re a nemzetközi

konferenciák, valamint szimpóziumok, workshopok tucatjai állnak rendelkezésükre, ezért nehéz elképzelnünk, mekkora újdonság és mekkora eredmény volt az első fizikai témájú nemzetközi konferencia megszervezése. Ez volt az első *Solvay-konferencia*, amely 1911. október 30-tól november 3-ig zajlott Brüsszelben.

Erről az első rendezvényről (valamint az ott elhangzott, a szupravezetés felfedezéséről beszámoló német nyelvű előadásról) a 2011 áprilisában tartott 54. Országos Fizikatanári Anketon, *Radnai Gyula* előadásában hallottam először. Az első Solvay-konferenciára visszaemlékező előadása részletként elhangzott, hogy *Kamerlingh-Onnes* itt mutatta be először az abszolút zérus fok közelében végzett kísérletei eredményeit, a szupravezetés jelenségének első megnyilvánulásait, és a magyarázatra történő első próbálkozásokat [1]. Az előadás és az azt követő cikk így az akkor 100 éves felfedezés előtt is tisztelgett [2, 3].

A szupravezetők napjainkban egyre nagyobb jelentőségre tesznek szert, e sikertörténet mellett kevesebb figyelmet kap, hogy az eredeti, a cseppfolyós hélium hőmérsékletén fennálló jelenség felfedezése már 1911-ben, éppen néhány hónappal az első nemzetközi konferencia előtt megtörtént. Vajon milyen eszközökkel, milyen előzményekre támaszkodva valósult meg a felfedezés? Milyen technikai nehézségeket kellett legyőzni az adott korban? E kérdésekre választ maga a felfedező ad. Ritka pillanat, és ezért kiemelkedően érdekes, ha a tudomány műhelyébe pillanthatunk be, ahol szinte folyamatában követhetünk és végül tetten érhetünk egy nagy jelentőségű felfede-



Vantsó Erzsébet az ELTE-n végzett ny. matematika-fizika szakos tanár, szaktanácsadó. Közreműködött fizika felnőttoktatási tantervek, tankönyvek, kutatások készítésében.

zést. Ez motiválta, hogy – tanártársaim érdeklődésére számítva – lefordítsam az egykori konferenciakiadványban megjelent cikket,¹ Kamerlingh-Onnes az élőszó frissességével hangzó előadását, kiegészítésül összegyűjtve a szupravezetés történetének néhány érdekes mozzanatát.

A szupravezetés második félévszázada

A szupravezetés jelenségét – talán azért, mert elmélete, teljes kvantumfizikai magyarázata az 1950-es években született csak meg – a közvélemény gondolatban többnyire a huszadik század közepéhez – második feléhez köti. Ekkor jelent meg a Ginzburg–Landau- és a BCS-elmélet. Az elmélet névadói, *Vitalij L. Ginzburg* (1916–2009) és *Lev D. Landau* (1908–1968) orosz–szovjet fizikusok egyik nagy eredménye a szupravezető-képesség elméletének 1950-ben történt kidolgozása. Landau a szuperfolyékonyságra vonatkozó elméletéért már 1962-ben fizikai Nobel-díjat kapott. Ginzburgnak erre 2003-ig kellett várnia; ekkor *Alexej A. Abrikosov* (1928–2017) orosz származású amerikai, és *Anthony J. Leggett* (1938–) angol származású amerikai fizikusokkal együtt megosztott Nobel-díjat kapott, a bizottság indoklása szerint „a szupravezetés és a szuperfolyékonyság területén végzett úttörő munkáért”.

A szuperfolyékonyságot, azt a jelenséget, hogy igen alacsony hőmérsékleten a cseppfolyós hélium sűrűlődsmentesen, ellenállás nélkül áramlik, *Pjotr L. Kapica* (1894–1984) orosz–szovjet mérnök-atomfizikus; Nobel-díj, 1978) figyelte meg először, 1938-ban. Az elméleti magyarázatra váró, a szupravezetéssel kapcsolatos jelenségek között fontos helyet foglalt el a Meissner-effektus is. Ezt a névadó *Fritz Walter Meissner* (1882–1974) és *Robert Ochsenfeld* (1901–1993) német fizikusok fedezték fel, 1933-ban. Lényege, hogy ha egy mágneses térbe helyezett szupravezetésre képes anyag hőmérsékletét a kritikus érték alá csökkentik, akkor a mágneses mező megszűnik az anyag belsejében, csak a szupravezető anyagon kívül létezik. Az indukcióvonalak kikerülnek és körülölelik a szupravezető anyagot. Ezzel a ténnyel a szakirodalomban olyan szemléletes megfogalmazásban is találkozhatunk, hogy „a szupravezetőből a mágneses tér kiszorul”.

Az 1957-ben megalkotott BCS-elmélet elnevezése *Bardeen*, *Cooper* és *Schrieffer* nevének kezdőbetűiből alakult ki; az elméletért 1972-ben kaptak Nobel-díjat. John Bardeen (1908–1991) amerikai fizikus már 1956-ban *Walter Brattain* és *William Shockley* amerikai tudósokkal megosztott Nobel-díjat kapott a tranzisztor 1947-es feltalálásáért. A díjbizottság 1972-es indoklása szerint, „a szupravezetés magyarázatára történt első sikeres mikroszkopikus elmélet kidolgozásában” fiatal munkatársai John Robert Schrieffer (1931–2019) és Leon Neil Cooper (1930–) vettek részt. Utób-

bi a szupravezetés létrejöttében nagy szerepet játszó elektronpárokról, a később róla elnevezett Cooper-párokról alkotott elmélettel járult hozzá a jelenség magyarázatához.

A nem-fizikus közfigyelem a másodfajú szupravezetők felfedezése (*Georg Bednorz* és *Alexander Müller*; Nobel-díj 1987) után, nagy gyakorlati jelentősége miatt kezdett a jelenségre irányulni. Johannes Georg Bednorz (1950–) német születésű, és Karl Alex Müller (1927–) svájci fizikusok „a kerámiaanyagokban való szupravezetés területén történt áttörésért” kapták a díjat.

Az 1983-ban és a későbbiekben felfedezett különféle kerámia-szupravezetők kritikus hőmérséklete, amely alatt elektromos ellenállásuk hirtelen nullára esik, 100 K körül van. Ezek a „magas” hőmérsékletű szupravezetők. Az alacsony hőmérsékletű szupravezetők kritikus hőmérséklete 20 K-nél kevesebb, az elsőnek felfedezett szupravezető anyagé, a higanyé csak 4,19 K. Ezen alacsony hőmérsékletek előállítása és fenntartása lényegesen költségesebb, mint a másodfajú szupravezető anyagok hűtéséhez szükséges hőmérsékletek. A gyakorlat számára ez teszi fontosá a kerámia-szupravezetőket.

A felfedezésük óta eltelt majd 40 évben közismertté vált, hogy a másodfajú szupravezetők jól alkalmazhatók nagy mágnesek huzaljaként: velük kis – azaz zérus – energiavesztésű, lényegesen nagyobb áramú, tehát nagyobb mágneses teret előállító, olcsóbban működtethető elektromágnesek készíthetők. Reménybeli alkalmazásuk a nagy teljesítményű transzformátorok, elektromotorok, energiatároló eszközök területe. Kísérletek folynak eróművi áramtárolóként való felhasználásukra (2009 óta működik ilyen áramtároló az oberlausitzi Boxberg eróműben). A másodfajú szupravezetőket alkalmazzák az óriás részecskegyorsítókban a nyaláb irányítására, az orvosi MRI-ben, ennek köszönhető a mágnesek segítségével a pálya felett lebegető, több száz km/óra sebességgel száguldó vonat – a japán Maglev vasút – működtetése, a legérzékenyebb mágneses tér szenzor (SQUID) megalkotása, a világ leggyorsabb „hagyományos” számítógépeinek készítése, vagy a kvantumszámítógépek perspektívája. Érthető tehát, hogy intenzív kutatások irányulnak a még magasabb kritikus hőmérsékletű, azaz szobahőmérsékletű szupravezető anyagok felfedezésére [5–8].

A szupravezetés az iskolában

A szupravezetés jelensége a középiskolában a fizikai tanulmányok utolsó évében – motiváló érdekességként – többnyire szóba kerül. A cseppfolyós levegővel végzett kísérletek a középiskolai fizikai délutánok kedvelt műsorszámai. Ezek során néhány iskolában, amelyek továbbképzésen kapott ajándékként évekként ezelőtt hozzájuthattak magas hőmérsékletű kerámia-szupravezető anyaghoz, a „magas”, azaz a cseppfolyós levegő hőmérsékletén történő szupravezetés jelenségét is be tudják mutatni. Említésre kerül

¹ Köszönet *Radnai Gyulának*, hogy az eredeti szöveget rendelkezésre bocsátotta.

a szupravezetők mágneses tulajdonsága, azaz, hogy a szupravezető anyag belsejében a mágneses indukcióvektor értéke nulla, környezetében viszont nem, és ennek kapcsán említhetők a jelenség gyakorlati alkalmazásai.

Amióta nagy lehetőségként néhány száz magyar fizikatanár meglátogathatta a CERN-t, közülük évente többen szerveznek oda tanulói csoportokat. Így a diákok személyes élményévé válhat, hogy a genfi Nagy Hadronütköztetőben (LHC) is szupravezető tekercseket alkalmaznak a nagy mágneses tér létrehozására, a részecskenyalábok irányítására és fókuszálására.

A történet kezdete

A szupravezetés felfedezője, Kamerlingh-Onnes neve kevésbé ismert a közvélemény előtt; a kor más nagy fizikusai – az első Solvay-konferencia résztvevői és még mások – mellett átsiklunk eredményeinek megemlézése felett.

Heike Kamerlingh-Onnes (1853–1926) holland fizikus, családi nevét a források hol kötőjellel, hol anélkül írják. Ez a bizonytalanság jogos: eredeti családnéve Onnes, második keresztnéve, a Kamerlingh csatlósásával maga alkotott belőle kettős nevet. A Leideni Egyetem kísérleti fizika professzoraként 1904-ben egy alacsony hőmérsékletek kutatására alkalmas laboratóriumot – ahol számos vendégkutató is tevékenykedett – hozott létre.

„A fizika sarkvidékei éppen úgy harcra serkentik a kutatókat, mint az Északi- és Déli-sark a felfedezőket.» A Leideni Egyetem rektora, Kamerlingh Onnes ezekkel a szavakkal vázolta saját helyzetét az 1904-ben tartott évnyitói beszédében. Abban az időben a fizikusok köreiből a cseppfolyós gázok tulajdonságai és a hélium cseppfolyósítása a sarkvidékhez tartozott.” [4]

A gázok sorában az először 1871-ben, a Nap színképe elemzése során felfedezett, földi körülmények között csak 1894-ben előállított hélium volt az utolsó, amelyet sikerült cseppfolyósítani. „Onnes ... méréseinek eredményeiből arra a következtetésre jutott, hogy a hélium 5 K alatt lesz csak cseppfolyós. Ilyen alacsony hőmérsékletet csak nagy mennyiségű hidrogén párologtatásával lehetett elérni.” Tehát a hélium cseppfolyósítása csakis a hidrogén cseppfolyósításának mindennapi gyakorlattá válása (1898) után válhatott lehetségessé.

Onnes egyik erőssége az volt, hogy élőbeszédhez közeli módon, szinte riportszerűen számolt be eredményeiről írásban is, ami a mai olvasóban a beavatottság érzését kelti. Így számolt be a hélium sikeres cseppfolyósításáról (1908) is. Az 1908-ban elért legalacsonyabb hőmérséklet 0,9 K volt.² Az abszolút nul-

la közeli hőmérsékletek mérésére szolgáló eljárást, valamint a folyékony hélium tárolására alkalmas edényeket is Kamerlingh-Onnes fejlesztette a laboratóriumában. Cseppfolyósító berendezése és más kísérleti eszközei Leidenben, részint az egyetemen, részint a városi múzeumban, ma is megtekinthetők.

Ezek után már elkezdődhetek az igen alacsony, a cseppfolyós hélium hőmérsékletén végezhető kísérletek. Korábban – elméleti megfontolások alapján – eltérő vélemények alakultak ki a kor fizikusai között arról, miként viselkedhetnek az elektromos vezetők az abszolút nulla fok közeli hőmérsékleteken. Az egyik véglet, *Lord Kelvin* – már nem lehetett a Solvay-konferencia résztvevője, 1907-ben hunyt el – véleménye szerint abszolút nulla fokon az elektronok mozgása megáll, ezért az elektromos vezetés megszűnik, így a vezető végtelen nagy ellenállásra tesz szert. Mások álláspontja ennek ellenkezője volt: az ellenállás csökkenni fog, sőt nullává válik.

Kamerlingh-Onnes, a kísérleti fizika elkötelezettjeként, méréssel kívánta eldönteni a kérdést. Már 1882-ben, a Leideni Egyetemen tartott székfoglaló beszédében megfogalmazta kutatói *ars poeticáját*: „A kísérleti fizika legfőbb feladata ... a jelenségek között fennálló kvantitatív kapcsolatok keresése ... Méréssel a Tudásig az irányelv, amelyet minden fizikai laboratórium falára kívánnék írni.” Azonban nem volt egyoldalú kísérletező. A szupravezetésről beszámoló előadásából is látható, hogy már az első kísérleti eredmények ismertetésekor is – a legújabb ismeretekre támaszkodva – törekedett az elméleti magyarázatra.

Az alacsony hőmérsékleteken való vezetőképesség vizsgálatát Onnes különböző fémeken végezte. A platina, majd az arany után a higany vizsgálatára tért át.

Meglepő eredményeiről és az elméleti modellre tett próbálkozásairól az első Solvay-konferencián számolt be. Mint majd láthatjuk, a jelenség magyarázatára történő legelső próbálkozások során is, az akkor már évtizedes múltra visszatekintő, és több jelenség megvilágítására sikeresen alkalmazott kvantumelmélet ígérkezett megfelelő eszköznek [4].

A konferencia hivatalos francia nyelven mellett németül és angolul is lehetett előadást tartani, így érthető, hogy a konferenciakiadvány is több nyelven jelent meg. Először 1912-ben a francia nyelvű.³

A német nyelvű [1] két évvel később jelent meg. Többet tartalmazott, mint a francia nyelvű kiadás fordítását: függelékként közölte mindazokat az eredményeket, amelyek a kvantumelmélet területén 1911 ősze – a Solvay-konferencia – és 1913 nyara, a kiadvány lezárásának időpontja között születtek. Kamerlingh-Onnes alább közlendő előadásának fordítása⁴ e német nyelvű kiadás alapján készült.

² Ezt akkor még a hosszabb, „0,9 fok abszolút hőmérséklet” kifejezéssel jelölték, mivel a kelvin elnevezést csak 1954-ben vezették be, a jelölést a „°” jel elhagyásával 1967-ben rövidítették K-ra, a 10., illetve 13. CGPM (Conférence Générale des Poids et Mesures – Általános Súly- és Mértékügyi Konferencia) döntése alapján.

³ *La Theorie Rayonnement et les Quanta. Rapports et Discussions de la Reunion tenue a Bruxelles, du 30 Octobre au 3 Novembre 1911, sous les auspices de M.E. Solvay.* Publiés par MM. P. Langevin et M. de Broglie, Gauthier-Villars, Paris, 1912.

⁴ Fordította Vantsó Erzsébet.

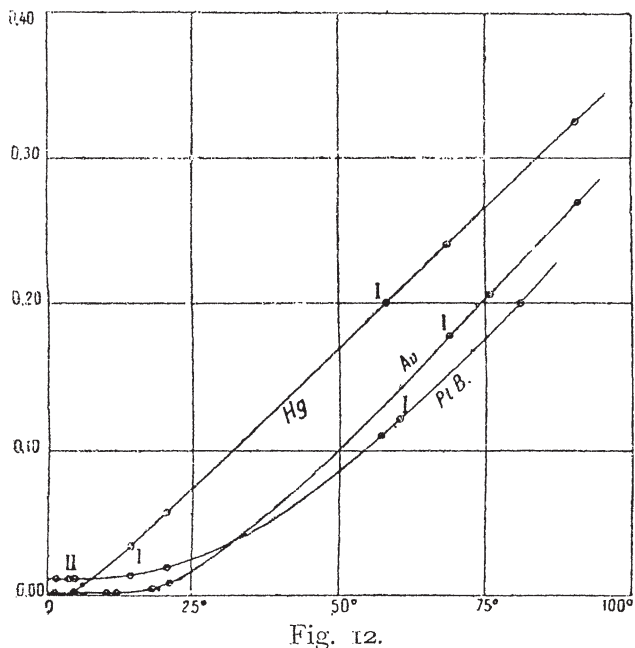


Fig. 12.

Kamerlingh Onnes: Az elektromos ellenállásról

„Úgy vélem, az elektromos ellenállásnak az a határértéke, amit *Nernst* úr az alumínium esetében, alacsony hőmérsékleten tapasztalt, a fém szennyezettségével megmagyarázható.⁵

A szennyeződések hasonló hatását mutattam ki a platina és az arany esetében is, amikor a vizsgálatot a cseppfolyós hélium hőmérsékletéig terjesztettem ki.⁶

A részint *Clay* úrral együttesen, a cseppfolyós hidrogén hőmérsékletén végzett megfigyelésekből az olvasható ki, hogy az ellenállás határértéke annál kisebb, minél tisztább a fém. Nos, a higanyt könnyen lehet a többi fémnél sokkalta tisztább állapotban tartani. Sőt ez irányban olyan messze is juthatunk, hogy egyáltalán semmi olyan ellenállás ne maradjon, amit a szennyeződéseknek tulajdoníthatnánk. Ekkor az extrém tiszta higany ellenállása nulla lesz. Feltehetőleg ugyanígy viselkedne a tökéletesen tiszta platina és arany is.

E helyt most a legalacsonyabb hőmérsékletű higany ellenállására vonatkozó vizsgálataimba szeretnék közelebbi bepillantást engedni.

E vizsgálatok részét képezik azon munkálatoknak, amelyeket már hosszabb ideje a hidrogén olvadáspontja közeli, illetve ennél alacsonyabb hőmérsékleteken fellépő számos sajátosság kutatására folytattam. Megkíséréltem, hogy mindezeket a sajátosságokat az elektronok atomokhoz való mintegy odafagyásával magyarázzam. A higany ellenállására vonatkozó kísérletek talán egzaktabb utalásokat eredményezhetnek ebben a kérdésben. Valószínűleg az elektronok ato-

⁵ Magam is mindig azon a véleményen voltam, hogy a határérték nagyságát a szennyeződések befolyásolják; lásd *Physikal. Zeitschr.* 12 (1911) 978. Az alumíniumot éppenséggel igencsak nehéz egyszén tisztán tartani; lásd *Ann. D. Phys.* 36 (1911) 412. *Nernst*.

⁶ Lásd *Communic. fr. the physical laboratory at Leiden*, nr. 119, 120, 123.

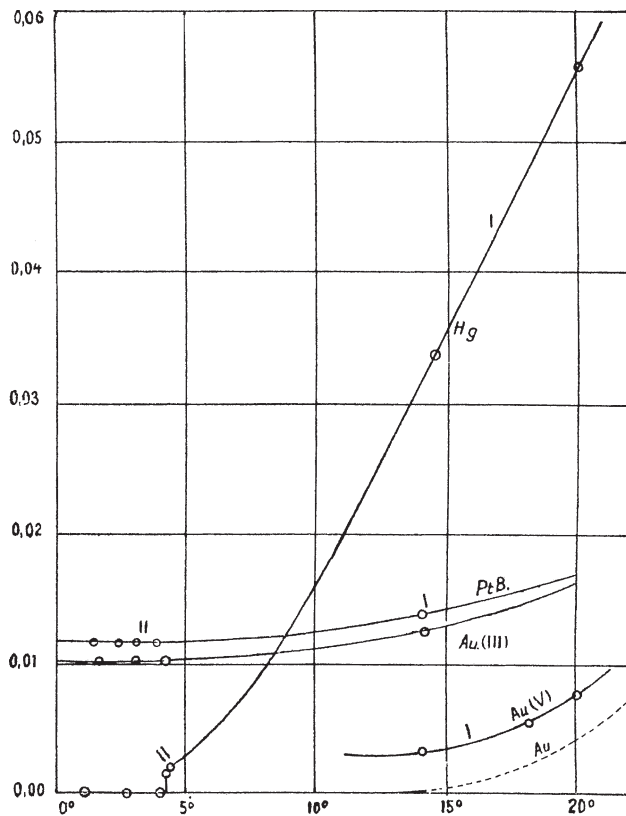


Fig. 13.

kokhoz való effajta odafagyását hasonlóképpen kell értenünk, mint azon bizonyos *Planck*-féle oszcillátorok nyugalmi állapotát.

A 12. ábra⁷ a platina, az arany és a higany 100 fok abszolút hőmérséklet alatt tapasztalható ellenállásváltozását mutatja. Ordinátaként ugyanazon fémszál T hőmérsékleten való W_T és a (0 °C-on mért) W_{273} ellenállásának aránya van feltüntetve.

A szilárd higany 0 °C-on való ellenállásának értékét a -100 °C feletti hőmérsékleteken való mérések extrapolációjával kaptuk.

A 12. ábra mindenekelőtt azon eredményeket tartalmazza, amelyeket *Clay* úrral, a cseppfolyós hidrogén hőmérsékletén végzett méréseket is beleértve, már korábban megcélzottunk. A megfelelő pontokat I jelöli. A görbe a higany esetében még a cseppfolyós hidrogén hőmérsékletén sem mutat olyan inflexió pontot, mint amilyen a többi fém esetén tapasztalható. Ezen inflexió pont megléte azt sejteti, hogy létezik a fémeknek valamely egymásnak megfeleltethető állapota. A másik két fémre vonatkozó görbe már a cseppfolyós hidrogén hőmérsékletén jelentősen görbül az abszcisszatengely irányába.

Azon korábbi vélekedéseim alapján, amelyek *Lord Kelvin* és – alapvonásaiban – *Königsberger* elméletére is hasonlítanak, még alacsonyabb hőmérsékleten az ellenállás további csökkenésének kellene bekövetkeznie.

⁷ Az ábrák számozása a fordításhoz felhasznált kiadvány eredeti számozását követi.

A 12. ábrát most kiegészítjük a cseppfolyós hélium hőmérsékletén végzett kísérleteim eredményével (az ábrán II-vel jelölve).

Mielőtt a platinával való kísérleteket elvégeztem volna a cseppfolyós hélium hőmérsékletén, azt gondoltam, hogy az abszolút nullpont megközelítése során az ellenállás a várt csökkenés helyett egy határérték, méghozzá a nulla érték felé fog törekedni. Meglepetésem mégis nagy volt, amikor kiderült, hogy a platinaszál Pt_B ellenállása (lásd 12. ábra) a cseppfolyós hélium hőmérsékletétől kezdve a hőmérséklettől függetlenné válik, ami a 13. ábrán (ez ötszörös nagyításban készült) egyértelműen felismerhető. (A görbék különböző mértékű szennyezettséget ábrázolnak, a pontosított jelölt görbe mutatja, mely adatok vonatkoznak a vegytiszta aranyra.)

A különböző aranyfajtáknak megfelelő görbék alapján a szennyeződések hatásáról az állapítható meg, hogy az egészen tiszta fém ellenállása gyakorlatilag – vagyis az elkerülhetetlen szennyeződések leíró értékekig – már az abszolút nulla feletti hőmérsékleteken nulla lesz (lásd 14. ábra, ahol az ellenállás méretaránya hússzoros).

Ezek az új eredmények már nem egyeztethetők össze azzal a feltevessel, hogy a szabad elektronok odafagynak az atomokhoz, hanem inkább azt látszik alátámasztani, hogy itt megszűnik az elektronok mozgását gátló minden akadály. Az a tény, hogy az ellenállás megszűnése már az abszolút nulla pont előtt bekövetkezik, közel áll a kvantumelmélet alkalmazásához, ahhoz hasonlóan, ahogyan *Einstein* és *Nernst* a fahő eltűnését magyarázták. Csak annyit kell feltételeznünk, hogy a fémekben az elektronok mozgását akadályozó tényezők a Planck-féle oszcillátorok mozgásából származnak. Ezen elképzelés alapján közelítőleg meghatározhatjuk az ellenállás-változást a hőmérséklet függvényében, ha a Planck-törvényt beillesztjük a *Riecke-Drude-Lorentz*-elméletbe. Az akadályozó tényezők hatását az oszcillátorok gyorsaságával vagy rezgési amplitúdójával kell arányosnak vennünk, azaz E négyzetgyökével arányosnak, ahol E -t az

$$E_T = \frac{\beta v}{e^{\frac{\beta v}{T}} - 1}$$

Planck-féle képlettel definiáljuk. Így az ellenállások viszonyára a következő összefüggés adódik:

$$\frac{W_{273}}{W_T} = \frac{\sqrt{273}}{\sqrt{T}} \frac{\sqrt{E_{273}}}{\sqrt{E_T}}$$

Egy ilyesfajta képlettel a v -értékek használatával jól visszaadhatók azon megfigyelések, amelyek nem állnak nagyon távol a rugalmas adatokból kiszámolható, a fahő kiszámítására is alkalmas értékektől; ez a felismerés növeli annak valószínűségét, hogy a kvantumelmélet erre az esetre is alkalmazható.

E módszerrel a higany viselkedése előre meghatározhatóvá válik.

A számítások szerint a vegytiszta higany ellenállásának a hélium forráspontján (4,25 fok abszolút hőmérsékleten) még észlelhetőnek kell lennie, de 3 fok abszolút hőmérsékleten már gyakorlatilag zérus kell legyen. Mivel a higany tisztán előállítható, e számítás gyakorlatban való megerősítése eleve elvárható volt. Ténylegesen ez is történt.

A higanyt olyan gondosan, amennyire ez csak lehetséges, cseppfolyós levegőben való desztillációval megtisztítottuk. Ezután egy üvegapillárisban hagytuk megfagyni. A kapillárisban elhelyezkedő higanyzál végeihez két-két, ugyanilyen módon előállított higany vezetőszálat csatlakoztunk, amelyek közül az egyik pár a mérőáram vezetésére szolgált, a másik párat a potenciálcsökkenés mérésére használtuk. Az eredményeket a 14. ábra mutatja.

Látható, hogy 3 fok abszolút hőmérsékleten az ellenállás kisebb, mint a saját, 0 °C-on mért értékének 1 milliomod része. A legújabb mérések szerint ez a határérték még kisebb.

Mindezen nagymértékű egybeesések ellenére a fent leírt képletet csak elsődleges közelítésnek tekinttem, első próbálkozásnak a kvantumelmélet alkalmazására.

Az nehezen dönthető el, vajon az itt említett oszcillátorok azonosak-e azokkal, amelyek a *Rubens* által a higany színképében megfigyelt, rendkívül nagy hullámhosszúságú fényt kibocsátják.

A legújabb mérések során, amelyek azt vizsgálták, hogyan csökken tovább az ellenállás, néhány olyan tulajdonság mutatkozott, amelyek nem illenek össze a korábban adott magyarázattal, és amelyek eredete még nem tisztázott. Éppen ezért erről e helyt még nem tudok részletes tájékoztatást adni.

Mindazonáltal biztosnak látszik, hogy – ahogyan a 200-szoros nagyítású 15. ábráról leolvasható – a higany ellenállása a hélium forráspontjához igen közeli, de annál kicsit kisebb hőmérsékleten hirtelen, emellett nem folytonos csökkenést mutat. Ennek következtében az ellenállás eltűnése már előbb fellép, mint ahogy ez a fentebb közölt képlet alapján várható lenne.

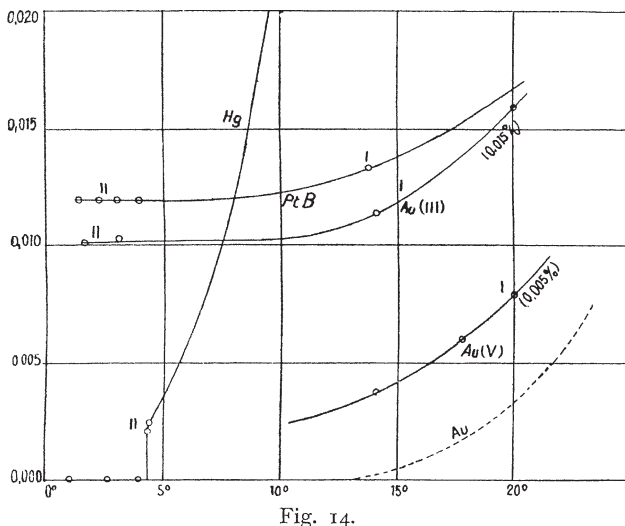


Fig. 14.

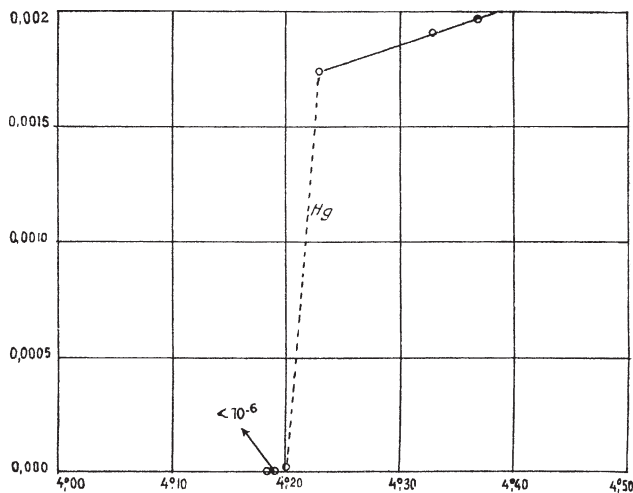


Fig. 15.

Itt még néhány megjegyzést tennék:

1. Az az érdekes képlet, amelyet *Lindemann* úr velem egy időben tett közzé, csak akkor alkalmas kvantitatív következtetésekre, ha az elméletileg meghatározott konstansok helyett a tapasztalati értékeket helyettesítjük be. Ezen kívül még a végső maradékellenállást is számításba kell vennünk. Ha visszpillantunk a tényekre, vagyis, hogy a tiszta fém maradékellenállása gyakorlatilag nulla, akkor *Lindemann* úr képlete a Nernst úr által javasolt empirikus törvénnyé alakul, amelyben – hogy a tiszta fémmre alkalmazható legyen – a maradékellenállást elhagyjuk. Azok a maradékellenállások, amelyekről a tiszta fémek esetében még fennállhatnak, valószínűleg sokkal kisebb nagy-

ságrendűek, mint azok, amelyek az empirikus Nernst-formulában szerepelnek, és a még meglevő szennyeződések leírására szolgálnak.

2. Ami pedig a szennyeződések mértékétől függő maradékellenállás nagyon alacsony hőmérsékleteken való stagnálását illeti, megjegyzendő, hogy az ötvözetek esetén – bár ez elméletileg még nincs alátámasztva – hasonló viselkedés feltételezhető.”



Bár neve itthon nem közzismert, hazájában kevesen kérdőjelezik meg, hogy Heike Kamerlingh-Onnes a 20. század egyik legkiválóbb kutatója volt. Hollandia huszonegy városában őrzi nevét utca vagy tér. Az elismerés nem túlzott [4].

Irodalom

1. *Die Theorie der Strahlung und der Quanten, Verhandlungen auf einer von E. Solvay einberufenen Zusammenkunft (30. Oktober bis 3. November 1911)*. Mit einem Anhang über die Entwicklung der Quantentheorie vom Herbst 1911 bis zum Sommer 1913, in deutscher Sprache herausgegeben von A. Eucken, Halle a. S., Druck und Verlag von Wilhelm Knapp, 1914.
2. Radnai Gy.: *Az első Solvay-konferencia*. 54. Országos Fizikatanári Ankét, Sárospatak, 2011. március
3. Radnai Gy.: *Az első Solvay-konferencia centenáriuma – I., II. Fizikai Szemle 61/7–8, /9 (2011) 250., 316.*
4. De Châtel P.: *Monsieur Zéro Absolu. Természet Világa 140/4 (2009)*
5. Zawadowski A.: *Szupravezetés és szuperfolyékonyság a Nobel-díjak tükrében. Természet Világa 135/3 (2004)*
6. *Britannica Hungarica világciklopédia*. Magyar Világ Kiadó Kft., 1994–2001.
7. K. Haven: *100 Greatest Science Discoveries of All Time*. Libraries Unlimited, 2007.
8. *História – Tudósnaptár* (KFKI); www.kfki.hu/physics/historia

LÁTVÁNYOS LÉGNYOMÁSMÉRÉS A SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEMEN

Farkas Zsuzsanna, Torma Gábor
SZTE, Juhász Gyula Pedagógusképző Kar
Általános és Környezetfizikai Tanszék

Korábbi cikkünkben [1] már beszámoltunk arról, hogy monumentális légn nyomásmérő eszköz épült a Szegedi Tudományegyetem Juhász Gyula Pedagógusképző Kar főépületének udvarán, az Általános és Környezetfizikai Tanszék gondozásában (1. ábra). A „vizes” Torricelli-

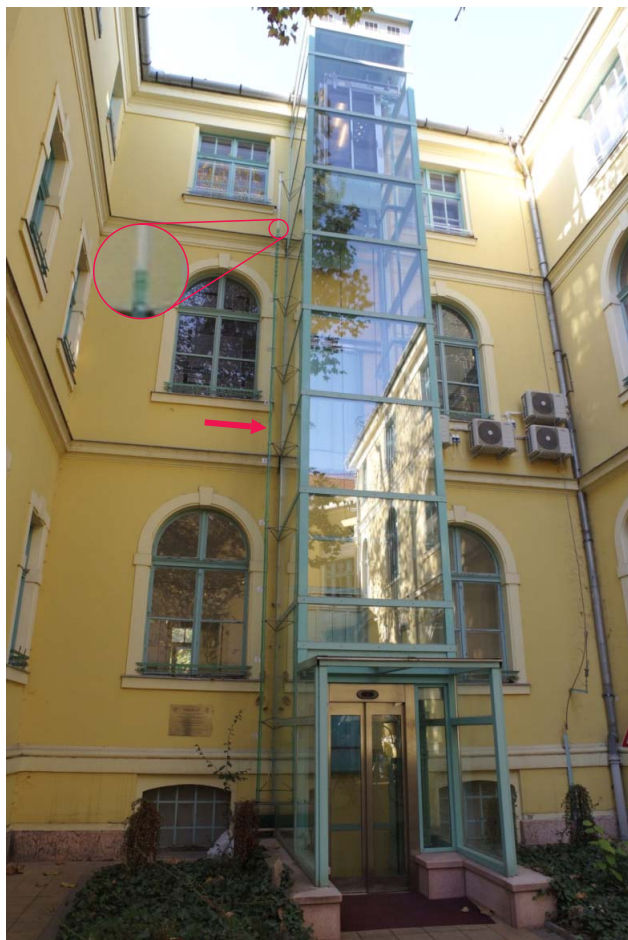
cső létrehozása lehetőséget ad a higannyal már nem elvégezhető, de klasszikus, fizikatörténetileg nagy jelentőséggel bíró kísérlet bemutatására. A higany helyett vizet, illetve – a téli hidegre is gondolva – praktikus döntésként fagyálló oldatot tartalmazó cső az alkalma-



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



Torma Gábor matematika-fizika szakos tanár 2019-ben végzett a Szegedi Tudományegyetemen. 2018 óta tanít a szegedi Dugonics András Piarista Gimnáziumban (óraadóként, majd tanárként). Több évig volt demonstrátor az SZTE JGYPK Általános és Környezetfizikai Tanszékén, valamint az SZTE TTIK Bolyai Intézetében is. 2019 óta az SZTE Matematika- és Számítástudományok Doktori Iskolájának PhD-hallgatója.



1. ábra. A télen-nyáron működő Torricelli-cső a Juhász Gyula Pedagógusképző Kar főépületének udvarán (fotó: Karancsi Zoltán).

zott folyadék higanynál kisebb sűrűsége okán 11 méteres hosszban készült el. A cső átlátszó műanyag, hosszának több pontján az udvari lift oldalához acélrögzítéssel támaszkodik. Kilenc méteres magasságig méterenként, fölötte pedig deciméterenként, messziről is jól látható jelölést kapott. A munkafolyadék személyautókhöz vásárolható fagyálló folyadék 50%-os vizes oldata, amely közel 85%-ban tartalmaz vizet, sűrűsége 7,6%-kal nagyobb a vízénél. A speciális oldat használatával a rendszer $-36\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ig fagyálló, így a cső folyamatosan és állandóan feltöltve tartható. A cső alul golyós csappal, felül membrános dugóval záródik.

Az eszköz megtekintése mellett a Természetismereti Tudástárban drámapedagógiai elemekkel kiegészített további, a légnyomáshoz kapcsolódó kísérletekkel tarkított, természettudomány-népszerűsítő előadásban lehet része a „Torricelli-túrára” bejelentkező csoportoknak [1].

A kísérleti eszköz létrehozásának azonban volt egy másik fontos célja: kvantitatív méréseket is lehessen végezni vele. Jelen cikkünkben a széles hőmérséklet-tartományban elvégzett méréseinkről, az eszköz validálásáról, a mérések pontosságáról és a hibaforrásokról számolunk be.

A mérés elméleti alapjai

A méréshez a hidrosztatikai nyomáson alapuló hagyományos Torricelli-kísérlet elméleti alapjaival kell tisztában lenni. A légnyomás meghatározásához a csőben lévő folyadékoszlop magasságát kell megmérni. Ez a Torricelli-csőünk melletti liftből, vagy akár az udvaron állva, az említett jelölések segítségével centiméteres pontossággal megállapítható. A folyadékoszlop magasságának tudtával, annak sűrűségének ismeretében a hidrosztatikai nyomás már meghatározható.

Amennyiben követjük az iskolai tárgyalást, és „megengedjük”, hogy a Torricelli-ürben – azaz a folyadék fölött – vákuum van, akkor az így számolt hidrosztatikai nyomást a levegő nyomásával, azaz a légnyomás értékével tesszük egyenlővé.

Nagyobb igényű mérésnél nem tekinthetünk el attól az ismert tényről, hogy egy folyadék zárt térben történő párolgása esetén a folyadék felett a folyadék adott hőmérséklethez tartozó telített gőze – tehát nem vákuum – tölti ki a teret. A gőznyomás értékének meghatározásával, az alábbi egyenlet felhasználásával, méréseink pontosabbá tehető:

$$p = p_{\text{bidr}} + p_{\text{göz}} = \rho g h + p_{\text{göz}},$$

ahol ρ a munkafolyadék sűrűségét, g a nehézségi gyorsulást, h a folyadékoszlop magasságát, $p_{\text{göz}}$ pedig a Torricelli-ürben lévő gőznyomást jelöli.

A telített gőz hőmérsékletfüggő nyomásának meghatározása nem egyszerű feladat, számításainkban csak közelítés alkalmazásával élhettünk: úgy számoltunk, mintha a munkafolyadék víz lenne, és a Torricelli-ürt

1. táblázat							
A légnyomás meghatározása							
folyadék-magasság (cm)	hőmérséklet ($^{\circ}\text{C}$)	folyadék-sűrűség (kg/m^3)	hidrosztatikai nyomás (Pa)	gőznyomás (Pa)	számolt légnyomás (Pa)	légnyomás „időkép” (Pa)	relatív eltérések (%)
938	3,2	1076,0	99 010	769	99 779	101 280	0,022 0,015
938	12,5	1075,4	98 951	1450	100 401	101 886	0,029 0,015
933	15,8	1075,1	98 397	1796	100 193	101 296	0,029 0,011
933	18,0	1074,5	98 348	2064	100 412	101 627	0,032 0,012
925	21,3	1073,9	97 446	2535	99 980	101 165	0,037 0,012

annak telített gőze töltene ki. Ezt azért te(he)ttük, mert a használt oldat körülbelül 85% vizet tartalmaz, a víz – gyakorlatilag – telített gőzének nyomása pedig táblázatokból ismert [2]. A hőmérsékletfüggésre vonatkozó táblázat a szükséges tartományban csak Celsius-fokonként tünteti fel a gőznyomásértékeket, a tizedfokpontossággal mért hőmérsékletértékekhez lineáris interpolációt alkalmaztunk. Továbbá, mivel a hőmérséklet nemcsak a gőznyomás értékét, hanem a munkafolyadék sűrűségét is befolyásolja, így ennek figyelembevétele is szükséges volt a pontosabb méréshez [3].

A számolt légnomáseredmények összevetése a szegedi meteorológiai adatokkal

Mérési eredményeinkből az 1. táblázatban egy reprezentatív mintát mutatunk be. Az általunk elvégzett 30 mérés során a legalacsonyabb hőmérséklet $-0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, míg a legmagasabb mért érték $27,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ volt, így a mérést ilyen szempontból megbízhatónak tekinthetjük.

A táblázat első oszlopában a munkafolyadék leolvasott magassága, a másodikban az infra hőkamerával mért hőmérséklet, a harmadik oszlopban a munkafolyadék sűrűsége (amely a víz adott hőmérséklet-hez tartozó sűrűségének 1,076-szorosa), a negyedik oszlopban a ρgh képlettel számolt hidrosztatikai nyomás, az ötödikben a gőznyomás értéke található. A hatodik oszlopban található a gőznyomással korrigált légnomás (az előző két érték összege), a hetedik oszlopban a – Szeged-Gyálaréti – meteorológiai állomás légnomásadata. Az utolsó oszlopban a gőznyomással nem korrigált és a gőznyomással korrigált értékek irodalmi (azaz a meteorológiai állomáson mért) értéktől való relatív eltéréseit adtuk meg.

A mérés kivitelezése, pontosságának becslése

Minden mérés során négy hőmérsékletértéket rögzítettünk: az első hőmérsékletértéket egy Dewalt DCT416S1 infra hőkamera, a másodikat egy Mastech MS6530 infra hőmérő segítségével határoztuk meg, míg a harmadik és negyedik hőmérsékletet az SZTE Éghajlattani és Tájföldrajzi Tanszék („adatok.geo”) [4], illetve a Szeged-Gyálaréti mérőállomás („időkép”) [5] adatai alapján jegyeztük fel. Ennek megfelelően a négy különböző hőmérséklethez négy különböző gőznyomásértéket rendeltünk, így négy különböző számított légnomásértéket kaptunk. A mérési pontosság meghatározásához ezen értékeket hasonlítottuk össze a két szegedi meteorológiai állomás (SZTE Éghajlattani és Tájföldrajzi Tanszék és Szeged-Gyálaréti mérési állomás) interneten elérhető mérési adataival. Így a nyolcféle párosítás

Mérés fajtája (hőmérséklet – meteorológiai adat származása)	Relatív eltérések átlaga (százalék)
Dewalt – adatok.geo	1,14
MS6530 – adatok.geo	1,60
adatok.geo – adatok.geo	1,13
időkép – adatok.geo	1,17
Dewalt – időkép	0,85
MS6530 – időkép	1,15
adatok.geo – időkép	0,75
időkép – időkép	0,84

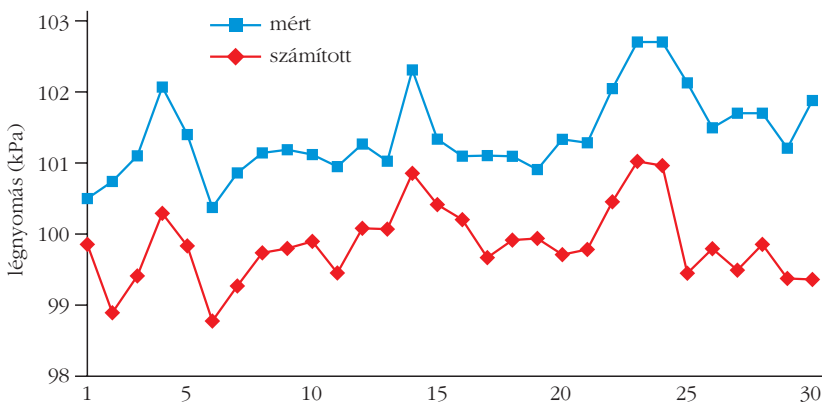
miatt egy mérésből nyolc relatív eltérés értéket kaptunk, lásd a 2. táblázatot. Az összes relatív eltérés átlaga 1,08%, amelyből azt a következtetést vontuk le, hogy kísérleti eszközünk vállalható hibahatáron belül, és megbízhatóan működik, alkalmas a légnomás mérésére [6].

A 2. ábrán 30 mérés gőznyomásértékkel korrigált számolt és mért légnomásértékeit tüntettük fel. A bemutatott adatsorban hőmérsékletmérésre a Dewalt DCT416S1 infra hőkamera adatát használtuk, az „irodalmi” légnomásértékeket a Szeged-Gyálaréti mérőállomás szolgáltatta. A bemutatott mérések 2018 februárja és májusa között történtek.

Hibaforrások

Hibaforrást jelent a csőben lévő folyadékoszlop magasságának nem eléggé pontos leolvasása, valamint a hőmérséklet változásából adódó, a cső függőleges hőtágulása által okozott hiba. Tapasztaltunk az, hogy a Torricelli-cső melletti liftből a leolvasás pontossága 0,5 és 1 cm közötti, ez 0,05-0,1% hibát okoz, a hőtágulás által okozott hiba pedig – számításaink szerint – kevesebb, mint 1%.

2. ábra. Az ábrázolt két adatsor közötti legnagyobb eltérés 2678 Pa, ami kisebb, mint 3%. A mért légnomásértékek nagyobbak, mint a gőznyomással korrigált értékek. Ennek oka az lehet, hogy az alkalmazott oldat gőznyomása valójában nagyobb a tiszta víz gőznyomásánál.



Továbbá hibaforrás, hogy a csőben lévő folyadék a feltöltéskor légbuborékokat tartalmaz, az ebből származó hiba jelen van, és teljesen nem is küszöbölhető ki. De, amint az [1] cikkben is utaltunk rá, ezen probléma okozta hiba minimalizálása érdekében kvantitatív mérésünk esetén több napot várunk a cső – szándékosan lassú – feltöltése és teljes lezárása között annak érdekében, hogy a folyadékból a levegőbuborékok eltávozhassanak, sőt, a lezárást-kinyitást többször megismételjük, hogy a forrás előidézésével minimalizáljuk a folyadék levegőtartalmát. Ily módon eljárva azt mondhatjuk, hogy a folyadék feletti zárt teret kellően hosszú idő után *gyakorlatilag* a folyadék telített gőze tölti ki. Állításunkat megerősíti az a bemutatott, számokkal igazolt tény, hogy méréseink hibája – minden, ebben az eljárásban általunk nem kiküszöbölhető körülményt vállalva – a 2. táblázat adatai szerint 1,6%-nál nem nagyobb.

A jelenlevő, mérésből származó hibaforrások elemzése mellett azonban érdemes szem előtt tartani kezdeti célkitűzésünket, hogy a Torricelli-cső egy nagyon látványos jelenség, egy „outdoor fizikai kísérlet” bemutatására készült. E jelenség mind általános, mind középiskolában része a NAT-nak, de a mérgező higanyal történő bemutatása már nem engedélyezett. Célunk az volt, hogy a látogatókban kérdésként első-

sorban az fogalmazódjon meg, vajon mi „ragasztja” a folyadékot egy 10 méteres csőbe? Miért nem folyik ki a munkafolyadék az alul nyitott csőből? Változik-e, ha igen, miért és mennyit a folyadék magassága? Ezt a célt elértük. Több száz általános, illetve középiskolás diák látogatott már el karunkra, hogy csodálkozva megtapasztalja a légnyomás jelenlétét és „erejét”.

Jelen cikkünkben azt kívántuk bemutatni, hogy a cső kvantitatív mérésre is alkalmas. A tanuló – leolvasva a folyadék magasságát – a szükséges összefüggés, illetve adatok (folyadék sűrűsége és a nehézségi gyorsulás) ismeretében, akár a helyszínen ki tudja számolni a már mindig zsebben lévő okostelefonnal a légnyomás aktuális értékét, és az okostelefonnal szintén elérhető helyi légnyomással össze is tudja hasonlítani. Az így számolt relatív eltérés átlaga sem lesz több 4%-nál.

Irodalom

1. Farkas Zsuzsanna, Mező Tamás, Torma Gábor: Torricelli megidézése. *Fizikai Szemle* 68/5 (2018) 176–179.
2. [https://hu.wikipedia.org/wiki/Víz_\(adatlap\)](https://hu.wikipedia.org/wiki/Víz_(adatlap)) (2019. december 17.)
3. <https://fizipedia.bme.hu/images/2/29/Tablazatok.pdf> (2019. december 17.)
4. <http://adatok.geo.u-szeged.hu> (2019. december 17.)
5. https://www.idokep.hu/automata/omme_szeged_gyalaret (2019. december 17.)
6. Torma Gábor: *Légnyomásmérés egy látványos barométerrel*. Szakdolgozat, Szegedi Tudományegyetem, 2019.

HÍREK – ESEMÉNYEK

JELÖLÉSI/PÁLYÁZÁSI FELHÍVÁS

az Eötvös Loránd Fizikai Társulat kitüntető érmeire,
valamint felsőoktatási és tudományos díjaira

Az ELFT Díjbizottsága jelöléseket, illetve pályázatot vár a Társulat 2020. 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 **2020. március 6-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/tarsulattrol/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 az ELFT 2020. májusi Küldöttgyűlésen 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 célkitűzéseinek 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 időszakra kiterjedő, a kiválóság eltérő jegeit 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 Ágoston-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 (kozmosz 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

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

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

Kiadja az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, felelős kiadó Groma István főtitkár, 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 Társulathoz vagy postautalványon a 10200830-32310274-00000000 számú egyszerűsített.

Megjelenik havonta (nyáron duplaszámmal), egyes szám ára: 1000.- Ft (duplaszámé 2000.- Ft) + postaköltség.

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

