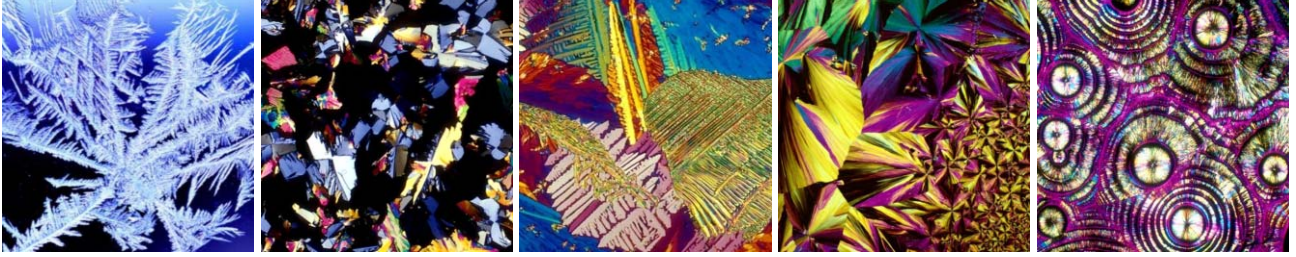


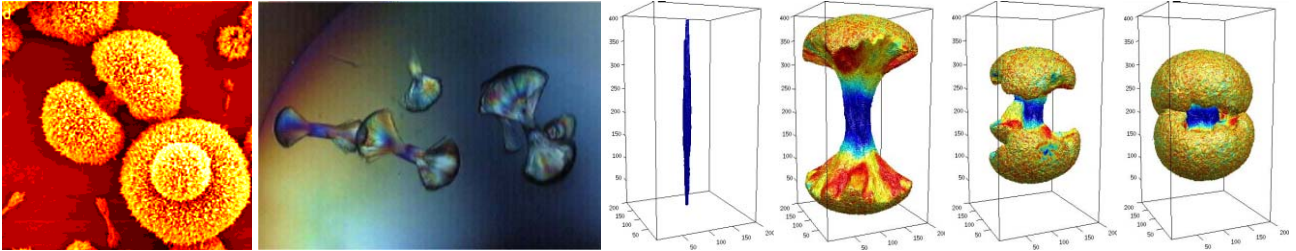
fizikai szemle



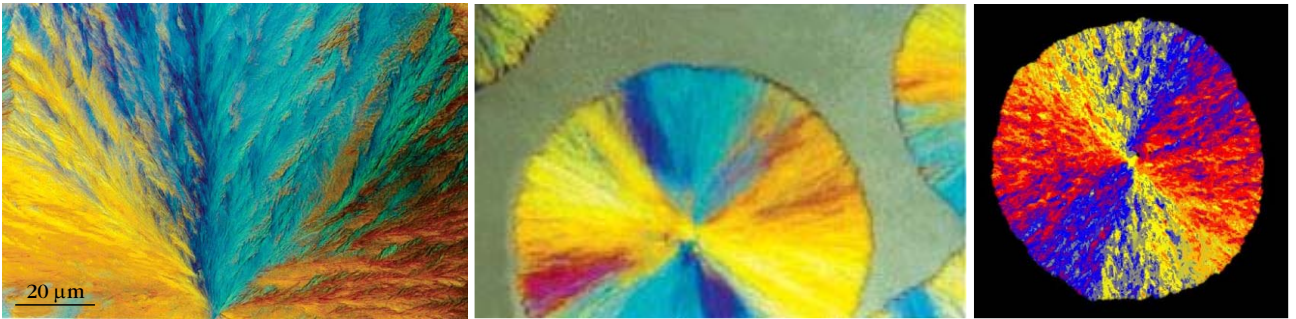
2017/12



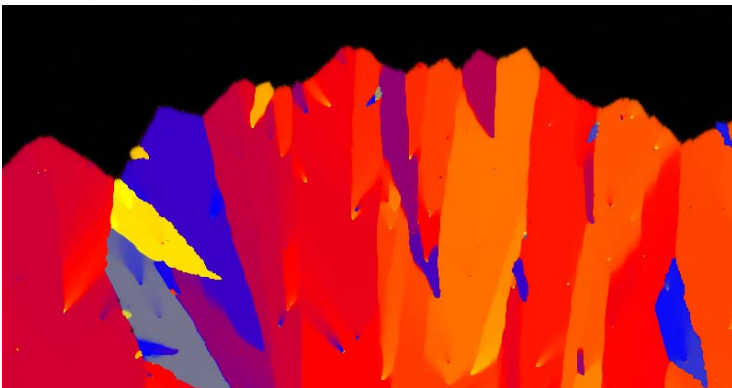
1. *ábra.* Polikristályos morfológiák fagyott italokban. Balról jobbra: víz, gin, amerikai sör (pale ale), poharak aljáról összeöntött (dirty) Martini, vodka-tonik [1].



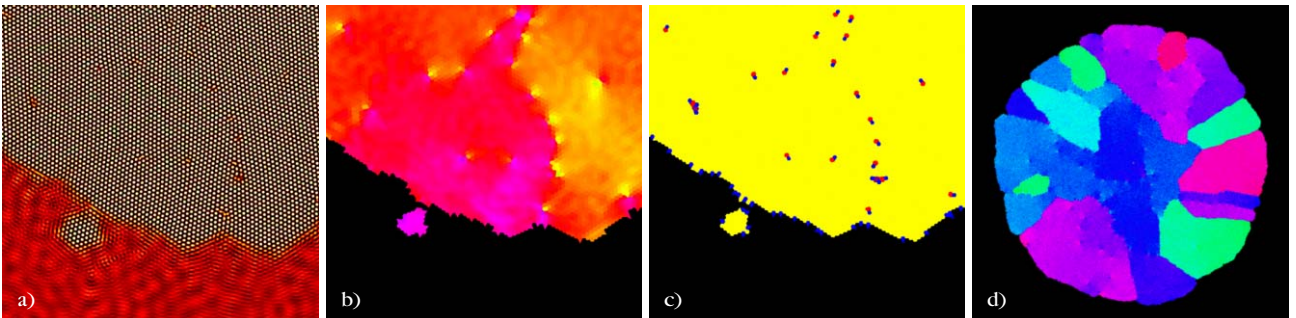
5. *ábra.* Súlyzó alakú háromdimenziós szferolitok a kísérletekben (balra) és kialakulásuk fázismező-elméleti szimulációja (jobbra). Az utóbbi esetben a színek az eredeti orientációtól való szögeltérést mutatják.



6. *ábra.* Orientációeloszlás a szferolitokban a polarizált transzmissziós fénymikroszkópia alapján [9] (balra és középen) és a fázismező-elméleti szimulációban (jobbra).



7. *ábra.* Új orientációk képződése a szferolitot határoló kristályosodási fronton: orientációs hibák az orientációsmezőmodellben. A különféle színek eltérő kristálytani orientációkat jeleznek, ahol a szín változik szemcsehatár található, ami koherens diszlokációfálnak tekinthető.



8. *ábra.* Új orientációk képződése a kristályosodási fronton a molekuláris fázismezőmodellben: a)–c) részecskesűrűség-, orientáció-, illetve Voronoi-térképek egy nagyobb szimuláció 20 nm × 20 nm területéről. d) Szferolitszerű alakzat orientációs térképe egy 200 nm × 200 nm-es szimulációban.



FIZIKA ÉS FIZIKUSOK AZ IPARBAN ÉS GAZDASÁGBAN

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat és az MTA Fizikai Tudományok Osztálya 2017. december 1-jén kerekasztal-beszélgetést szervezett az MTA székházában *Fizika és fizikusok az iparban és gazdaságban* címmel. Bár mintegy tíz évvel ezelőtt *Patkós András* már kezdeményezett hasonló rendezvényt, az eltelt tíz évben nem sok változás történt az egyetemeken és akadémiai kutatóintézetekben, illetve az iparban dolgozó fizikusok közötti intézményes kapcsolat, az utóbbiak fizikus közéletbe történő integrálása terén. Az MTA 11. osztályához tartozó közel nyolcszáz köztestületi tagnak legfeljebb egy-két százaléka tevékenykedik az iparban. Az ELFT tagságában sem jobb az arány. Pedig az ipar és a gazdaság, valamint az egyetemi és kutatóintézeti szféra közötti tudás- és technológiatranszfer mindkét oldal számára egyre fontosabb, s ebben a fizikusok jelentős szerepet játszhatnak.

A *Solyom Jenő* által moderált kerekasztal-beszélgetésben *Fáth Gábor*, a Morgan Stanley ügyvezető igazgatója, *Horváth Ákos*, az MTA Energiatudományi Kutatóközpont főigazgatója, *Kazi Károly*, a BHE Bonn Hungary Elektronikai Kft. ügyvezető igazgatója, *Major Péter*, a Mediso Kft. kutatás-fejlesztési igazgatóhelyettese, *Richter Péter*, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem egyetemi tanára, *Rovni István*, a Paks II. Atomerőmű Zrt. reaktorfizikus főszakértője és *Szabó Gábor* egyetemi tanár, a Szegedi Tudományegyetem rektora vett részt. A kerekasztal-beszélgetést vita követte, amelyben mások is elmondhatták véleményüket.

Többen az egyik alapproblémaként azt említették, hogy a diploma után közvetlenül az iparba kerülők számára szinte lehetetlen a fokozatszerzés. Nemcsak a publikációs tevékenység korlátozott, de a szabadalmi bejelentésben sem érdekeltek a kis cégek, mert védelem helyett inkább annak kijátszására nyit lehetőséget. Az ipar és az egyetemek közötti átjárás ma csak egy irányban működik. Követendő példaként történt utalás arra, hogy annak idején a Műegyetem Atomfizika tanszékét az Egyesült Izzó, személy szerint *Aschner Lipót* támogatásával hozták létre, és annak vezetője, *Bay Zoltán* egyúttal az Egyesült Izzó kutatólaboratóriumában is dolgozott.

Diákok alkalmazásának, szakdolgozati vagy doktori témák kiírásának akadálya az, hogy az iparban „más időskálán” dolgoznak, más a célfüggvény, mint az alap kutatásban. A probléma felvetése után gyorsan kell a válasz, és maga a probléma is megváltozhat az egyik pillanatról a másikra. Az ipar nem az érdekes problémák megoldását honorálja, hanem megelégedett vásárlókat akar látni, akik újra az ő termékeit veszik. Ennek ellenére lehetséges akár hosszú távú együttműködést is kialakítani ipari és egyetemi partnerek között, de ehhez nagyon fontos a kettejük közötti bizalom.

Abban viszont nem volt egyetértés, hogy szükség lenne-e változásra a fizikusképzésben. *Szabó Gábor* szellemes kifejezést használva mondta, hogy nagyon káros lenne speciális feladatokra „egyszer használható, eldobható fizikusokat” képezni. Többen hangsúlyozták, hogy a fizikusok egyik előnye éppen a komplex problémák megoldására való felkészültségéből adódik.

A felszólalásokban és a rendezvény formális befejezése után – pogácsa és üdítő mellett – folytatott beszélgetésekben elhangzott az igény, hogy ne tíz év múlva legyen a következő ilyen alkalom, hanem az iparban dolgozó fizikusok szerveződjenek össze, alkossanak szakcsoportot a társulaton belül, ami lehetőséget biztosítana közös problémáik megbeszélésére, javaslataik szervezett megjelenítésére.


Solyom Jenő

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat havonta megjelenő folyóirata.

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

Főszerkesztő:
Lendvai János

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

Dendrites megszilárdulás kétkomponensű molekuláris fázismező-elméletben (szimuláció ~268 millió rácsponton) – Tegze György és Gránásy László, MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont.

Az első belső borítón:
Ábrák Gránásy László írásához.

Fizika és fizikusok az iparban és gazdaságban (<i>Sólyom Jenő</i>)	401
<i>Gránásy László</i> : Számítógépes anyagtudomány: tükristályoktól a komplex polikristályos alakzatokig <i>Mi lehet a bűtere annak, hogy nagyon eltérő molekulageometriájú rendszerekben a megszilárdulás során hasonlóság alakulnak ki?</i>	403
<i>Bíró Tamás Sándor</i> : Túl az exponenciális faktoron <i>Academia Europaea székhelyében a szerző a nemextenzív termodinamikáról kialakított személyes nézeteit mutatja be.</i>	407
<i>Raics Péter</i> : Az „atom-rozsda” gamma-spektrometriája és az atomerőművek biztonságos működése <i>Az atomerőművek primer körében keletkező korróziótermékek felületi aktivitásának hosszú idejű monitorozásával a világon egyedülálló adatbázis keletkezett, ami lehetővé teszi a működő reaktorok üzemidő-hosszabbításának megalapozását, segíti a Paks2 blokkok működtetését, növelheti biztonságát.</i>	412
A FIZIKA TANÍTÁSA	
<i>Kántor Balázs, Kelkó Balázs, Lányi Zsófia</i> : Nehézségi gyorsulás értékének meghatározása, napelemcella vizsgálata <i>A National Instruments myDAQ eszköznél használata tanulókísérletekben.</i>	417
IN MEMORIAM...	
<i>Horváth András, Radnóti Katalin</i> : 75 éve lett kritikus a chicagói reaktor, 115 éve született Wigner Jenő <i>A láncreakció felfedezése és az első atomreaktor története.</i>	421
<i>Radnai Gyula</i> : A másképp gondolkodás bűvöletében <i>100 éve született David Bohm, a XX. század egyik jelentős magyar származású fizikusa.</i>	429
HÍREK – ESEMÉNYEK	
Búcsú Fehér Istvántól (<i>Andrási Andor</i>)	436
<i>J. Sólyom</i> : Physics and physicists in the industry and economy <i>L. Gránásy</i> : Computational materials science: from whiskers to complex polycrystalline patterns <i>T. S. Bíró</i> : Beyond the exponential factor <i>P. Raics</i> : Gamma spectroscopy of “nuclear rust” and the safe operation of nuclear power plants	
TEACHING PHYSICS	
<i>B. Kántor, B. Kelkó, Zs. Lányi</i> : Measurement of gravitational acceleration and investigation of a solar cell	
IN MEMORIAM...	
<i>A. Horváth, K. Radnóti</i> : Chicago reactor critical 75 years ago – Eugene Wigner born 115 years ago <i>Gy. Radnai</i> : Fascination of thinking differently	
EVENTS	
István Fehér, 1932–2017 (<i>A. Andrási</i>)	





Az 1988-ban alapított Academia Europaea (AE) 2017-es éves konferenciáját szeptember elején Budapesten rendezte a Magyar Tudományos Akadémián. A konferenciához kapcsolódóan a Fizika és Műszaki Tudományok Szekciók közös szimpóziumán az AE tizenkét új tagja tartott székfoglaló előadást. A nyolc országból érkezett előadók között volt az AE négy új magyar tagja, *Bíró Tamás Sándor*, *Gránásy László*, *Gyulai József* és *Kamarás Katalin*. Felkértük őket, hogy a *Fizikai Szemle* számára írják meg eredetileg angolul tartott előadásuk magyar változatát. A négy cikkből kettőt a jelenlegi, kettőt a következő számunkban közlünk.

SZÁMÍTÓGÉPES ANYAGTUDOMÁNY: TŰKRISTÁLYOKTÓL A KOMPLEX POLIKRISTÁLYOS ALAKZATOKIG

Gránásy László

MTA Wigner FK Szilárdtestfizikai és Optikai Intézet

A polikristályos anyagok, mint például technikai ötvözetek, a kerámiák, a polimerek, különféle ásványok, egyes élelmiszerek stb. fontos szerepet játszanak mindennapi életünkben, akár csak a biológiában és az orvostudományban. Az utóbbiaknál gondoljunk a fogakra, csontokra, a vesekőre, az artériákban kialakuló koleszterinlerakódásokra, illetve az Alzheimer-kór során az emberi agyban kialakuló amiloidplakkokra, amelyek szintén polikristályos képződmények.

A kristályokban az atomok vagy molekulák térben periodikus módon helyezkednek el. A polikristályos anyagok nagy számú kristályszemcséből épülnek fel, amelyek méret-, alak-, orientáció- és összetétel-eloszlása határozza meg az adott anyag fizikai és kémiai tulajdonságait. A létrejövő polikristályos szerkezetek morfológiája igen változatos, ám a különféle anyagcsaládokban kialakuló szerkezetek közt széleskörű hasonlóság figyelhető meg. Így például a fenyőfaszerrű, úgynevezett dendrites alakzatok egyaránt létrejönnek a hideg környezetben fűjt szappanbuborék fagyásakor, a fémötvözetekben, a kristályos polimerekben, jégvirágként, vagy éppen a megfagyott sörben. Hasonló a helyzet a polikristályos szferolitok esetén is, amelyek radiális irányban növekvő kristálysálakból állnak. Ezért – talán szokatlan módon – fagyott italokról polarizált fényrel készített fényképekkel [1] illusztrálok a polikristályos szerkezetek morfológiai sokféleségét (*1. ábra* az első belső borítón).

Ezek az alakzatok a kristálycsíra-képződés (másnépp nukleáció), a kristálynövekedés, illetve a szem-

cesdurvulás jelenségeinek kölcsönhatásával jönnek létre. Az, hogy igen eltérő molekulageometriájú rendszerekben, hasonló morfológiák jönnek létre, felveti egy általánosan alkalmazható matematikai modell lehetőségét.

Ilyen problémák vizsgálatával a számítógépes anyagfizika foglalkozik, amelynek célja a különféle anyagok viselkedésének megértése és megjósolása. Minthogy a szóba jövő folyamatok méretskálája az atomi méretektől a mérnöki gyakorlatban előforduló makroszkopikus méretekig terjed, a számítógépes anyagfizika mikro-, mezo- és makroskálákon alkalmazható módszerekre egyaránt támaszkodik. Ezek között, egyebek mellett, az első elvekből történő kvantummechanikai számolások, a klasszikus sűrűségfüggő-funkcionál-technika (statisztikus fizikai módszer a fázisátalakulások leírására), a molekuláris dinamika (a newtoni mozgásegyenletek megoldása alkalmas potenciálokkal kölcsönható tömegpontokra), a fázismező-elmélet (lásd alább részletesen), illetve a számítógépes folyadékmechanika (a Navier–Stokes-egyenletek numerikus megoldása megfelelő határfeltételek mellett) említendő.

Az *1. ábrán* látható polikristályos mikroszerkezetek a 10^{-6} – 10^{-2} méteres hossz-, illetve a 10^{-6} másodperctől percekig terjedő időskálán képződnek. Ezek leírására a fázismező-elmélet szolgál, amelynek két változata ismert: a molekuláris fázismező-elmélet (PFC = Phase-Field Crystal modell), illetve a kristályfolyadék fázisátmenetet lokálisan átlagolt rendparaméterrel, az úgynevezett fázismező segítségével leíró konvencionális fázismező-elmélet (PF = Phase Field). Ezen elméleteket és eredményeiket több korábbi cikkben tárgyaltuk a *Fizikai Szemle* oldalain [2–5]. A molekuláris elméletben az anyag lokális állapotát időátlagolt részecskesűrűséggel jellemezzük. Ez a molekulák vándorlása miatt a folyadékban homogén, míg a kristályban csúcsokkal rendelkezik a molekulák helyén, amely csúcsok elrendezése a kristálytani orientációt is rögzíti (*2. ábra*). Ezzel szemben a konvencionális fázismező-elméletekben a sűrűségcsúcsok

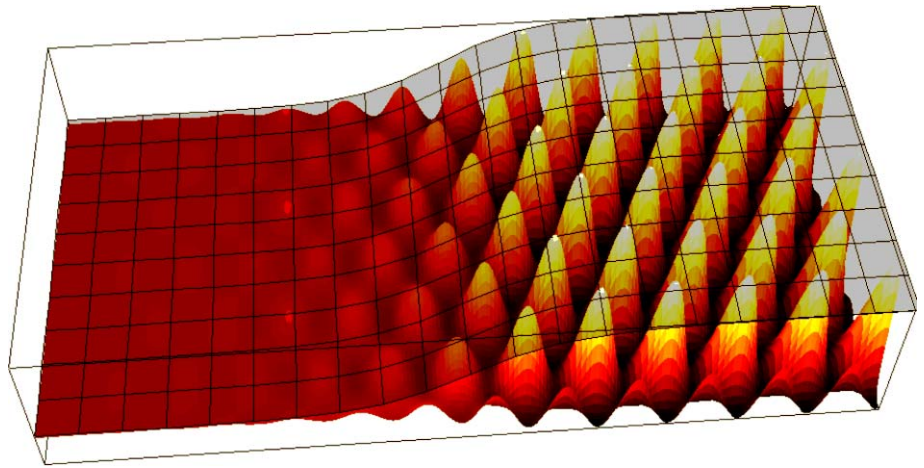


Gránásy László fizikus az MTA doktora, az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont tudományos tanácsadója, az Academia Europaea tagja. Diplomát és PhD-fokozatot az ELTE-n szerzett. Több európai, amerikai és japán egyetem, kutatóintézet ösztöndíjasa, vendégkutatója, professzora. Fő érdeklődési területe a komplex megszilárdulási folyamatok térbeli modelljezése atomi skálán működő és lokálisan átlagolt (coarse grained) módszerekkel.

burkolóját (amit a 2. ábrán látható háló szemléltet) használjuk annak jelzésére, hogy melyik fázisban vagyunk. Ekkor azonban egy újabb, úgynevezett orientációs mezőre van szükségünk, hogy megadjuk a lokális kristálytani orientációt. A polikristályos anyagok leírásának további lehetősége a multifázismező-elmélet, amelyben minden kristályszemcséhez (orientációhoz) külön fázismezőt rendelünk, ami az adott szemcsében 1, azon kívül 0 és a szemcse határán, e két érték között folytonosan megy át. Munkánk során mindhárom megközelítést használtuk, de leglátványosabb eredményeinket az első két modellsalád továbbfejlesztésével/alkalmazásával értük el.

A kristály-folyadék rendszer szabadenergiája kifejezhető a molekulásűrűséggel, illetve a fázismező segítségével. A lokális állapot időfejlődésének leírására – a szabadenergiából kiindulva, a statisztikus fizika szabályainak megfelelően – az adott rendszer sajátosságainak megfelelő mozgásegyenletek származtathatók. A rendszer időfejlődését általában más, lassan változó mezőkhöz (például hőmérséklet, összetétel, illetve orientáció) csatoljuk. A mozgásegyenletek bonyolult, erősen nemlineáris, sztochasztikus parciális differenciálegyenlet-rendszerek, amelyek megoldása általános esetben csak numerikus (véges differencia, véges elem, illetve spektrális) módszerek alkalmazásával lehetséges. A polikristályos szerkezet kialakulásának leírásához a matematikai modellen túl meglehetősen részletes információra van szükségünk az adott anyag jellemzésére (az egyes fázisok szabadenergiája a hőmérséklet és összetétel függvényében, a felületi szabadenergiák és anizotrópiák, illetve az időskálákat meghatározó diffúziós együtthatók), amelyek bemenő adatként rögzítik a modellparamétereket. Végül a numerikus problémamegoldáshoz számítástechnikára van szükség, ami ebben az esetben CPU és GPU klasztereket, illetve szuperszámítógépeket jelent. Amennyiben mindez rendelkezésre áll, lehetőség nyílik a polikristályos mikroszerkezet megjóslására. A fentiek szematikusan ábrázolása a 3. ábrán látható.

A teljes folyamat csak néhány anyagcsalád (egyes fémötvözetek) esetén volt megva-



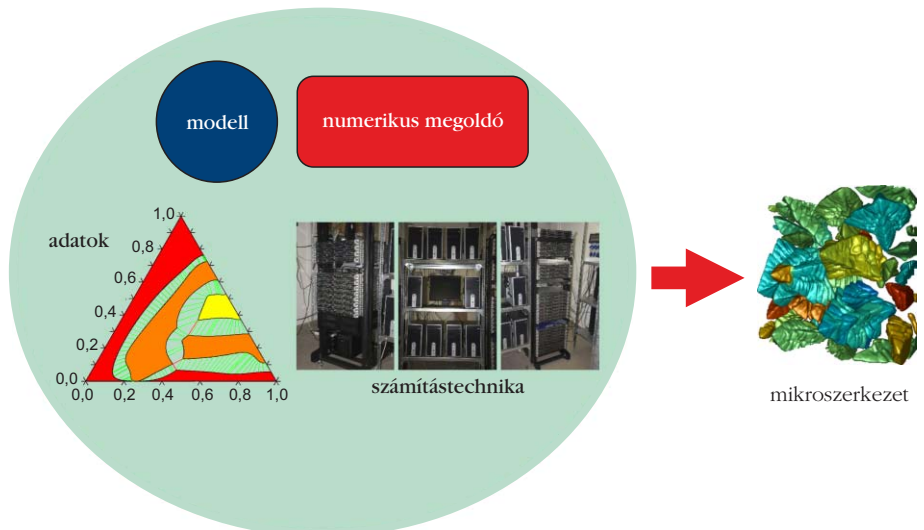
2. ábra. Az időátlagolt molekulásűrűség térbeli változása a kristály-folyadék határon. A kristály-folyadék átmenetet leíró strukturális rendparaméter, a fázismező, ennek megfelelő változását a felület fölé rajzolt háló jelzi.

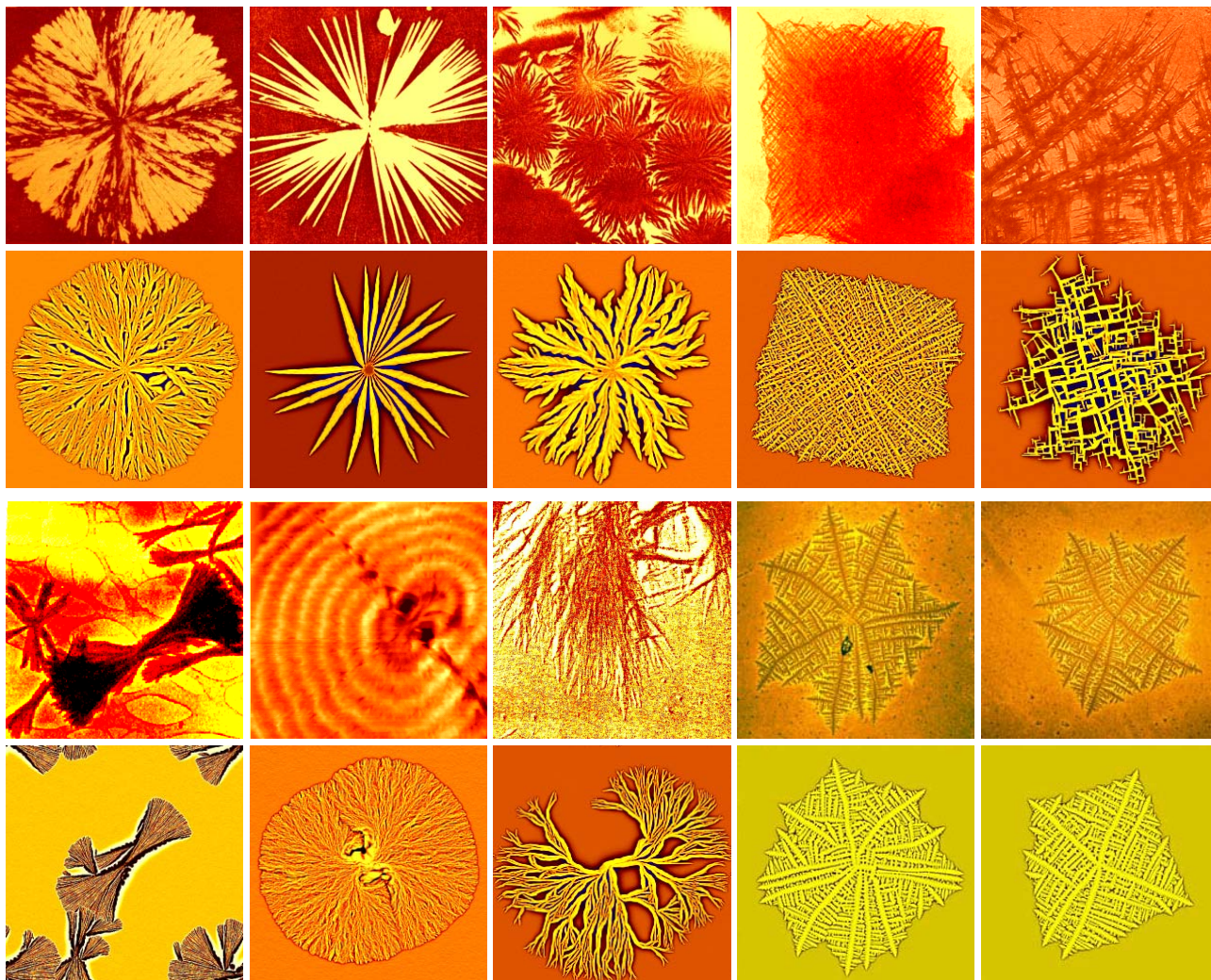
lósítható, ahol elegendően részletes információ áll rendelkezésre. Ezeknél megvalósulhatott a tudásalapú anyagtervezés.

A fenti megközelítés „elke” az alkalmazott matematikai modell. Ha értő szemmel vizsgáljuk a polikristályos alakzatokat, akkor a modell az alábbi fizikai jelenségeket kell tartalmazza: (1) Diffúziós instabilitások (amelyek a dendrites szerkezetek kialakulását vezérlik). (2) Növekedési centrumok nukleációja az olvadáspontja alá hűtött folyadékokban, ami történhet homogén módon a folyadékbeli véletlen atomi mozgásokkal, vagy heterogén módon valamely idegen felület (a folyadékot tartalmazó edény fala, lebegő részecskék stb.) segítségével. (3) Új kristályszemcsék nukleációja a növekvő kristály felületénél (a továbbiakban „front menti nukleáció”), amely folyamat elsősorban a polikristályos növekedési formák, mint például a szferolitok, kialakulásánál játszik meghatározó szerepet.

Az elmúlt másfél évtizedben fokozatosan felépítünk egy olyan orientációs mezőn alapuló modellt,

3. ábra. A polikristályos mikroszerkezetek számítógépes szimulációjának szematikusan ábrázolása.





4. ábra. Polimerfilmekben megfigyelt polikristályos növekedési formák (első és harmadik sor) és fázismező elméleti szimulációjuk (második és negyedik sor). Ezen bonyolultabb alakzatok kialakulásában a véletlen események fontos szerepet játszanak, így az elmélet és szimuláció között csak statisztikus hasonlóság várható.

amely két, illetve három dimenzióban tartalmazza mindezeket az elemeket. Modellünket sikerrel alkalmaztuk olyan bonyolult polikristályos növekedési formák leírására, mint a különféle sferolitalakzatok (4. ábra és az 5. ábra az első belső borítón) [6], az idegen részecskék hatására kialakuló rendezetlen, úgynevezett „szédelő” (dizzy) dendritek [7] (4. ábra), illetve a fraktálszerű polikristályos aggregátumok [8]. Ugyancsak sikerrel írtuk le a polimerrétegek megkarcolásának, illetve átszúrásának hatását a kristályosodás morfológiájára [8]. Ahol kísérleti adat áll rendelkezésre [9] az orientációeloszlásra, ott jó egyezés figyelhető meg a kísérlet és elmélet között (6. ábra az első belső borítón).

Természetes módon vetődik fel a kérdés, hogy az új orientációk milyen mikromechanizmussal jelennek meg. Az orientációs mező modellben akkor lépnek fel, ha az orientációs rendeződés lassú a növekedéshez képest, s így orientációs hibák fagynak be a növekvő kristályba (7. ábra az első belső borítón). Ezek a hibák feltehetően diszlokációk megjelenéseként értelmezhetők a molekuláris skálán. Ennek tisztázása

érdekében vizsgálatokat végeztünk a molekuláris skálán működő fázismező-elmélet keretében, az egyszerűség kedvéért egyelőre két dimenzióban [10]. Nagy túlhűtéseknel (mélyen az olvadáspont alatt) kétféle mechanizmust figyeltünk meg: (1) diszlokáció (kristályhiba) sorok képződése, amely valószínűleg a kristályos fázisba befagyott feszültségek hatására jön létre, illetve (2) a front közelében történő nukleáció, amely – megfigyeléseink szerint – a front előtt kialakuló sűrűség hullámok interferenciája miatt lép fel. A kétféle mechanizmus jól látható a 8. ábrán (az első belső borítón), amelyen a részecskesűrűség-térkép, az orientációs térkép (a $g_0 = \sum \exp(i\theta_k)$ komplex strukturális rendparaméter fázisszögét mutatja, ahol θ_k a k -adik szomszéd irányába mutató vektor dőlésszöge), valamint az úgynevezett Voronoi-sokszöganalízis eredménye látható. Az utóbbi esetben a molekulákból szomszédjaikhoz vezető szakaszok feléhez berajzolt merőleges vonalak belső burkolója egy sokszöget ad meg (a Voronoi-sokszög), amelyet a szomszédok n számának meghatározására használhatunk. Az ábrán sokszögeket a szomszédok szám függvényében színez-

tük ki: az $n = 4, 5, 6$ és 7 eseteket rendre szürke, piros, sárga és kék színekkel jelöltük. Ebben a megfogalmazásban a diszlokációk 5 és 7 szomszédral rendelkező (piros-kék) molekulákból álló párokként jelentkeznek. Megjegyezzük, hogy a *7. ábrán* látható szimuláció a 10 mikronos méretskálán zajló eseményeket mutat, míg a *8. ábra a)–c)* paneljein 20 nanométeres skálán zajló folyamatok láthatók. A nagyobb molekuláris szimulációkban ($\sim 0,2$ mikron) megfelelő körülmények közt szferolityszerű polikristályos alakzatok jönnek létre (*8.d ábra*).

Érdeemes megjegyezni, hogy a molekuláris fázismező által megjósolt front előtti nukleációs folyamatot velünk lényegében egyidőben japán kutatók is megfigyelték nagyméretű háromdimenziós molekuláris dinamikai szimulációkban [11].

A komplex polikristályos morfológiák leírása mellett sikeresen alkalmaztuk az orientációs mezőn alapuló modellünket olyan ipari szempontból érdekes anyagok fejlesztése során, mint a lágymágneses anyagok, ólommentes önkénő csapágyanyagok, magas olvadáspontú anyagok gázturbinalapátokhoz, illetve eutektikus megszilárdulással előállított különleges optikai tulajdonságú, úgynevezett metaanyagok. Ezek a fejlesztések nemzetközi együttműködésben, kutatóintézetekből és ipari cégekből álló konzorciumok keretében történtek. A fentiek mellett főbb kutatási irányaink közé tartozik a kristálycsíra-képződés vizsgálata molekuláris skálán [10, 12, 13], illetve a folyadékáramlás megszilárdulásra gyakorolt hatásának feltárása [10]. A közeljövőben azon fontos kérdés tisztázását tervezzük, hogy az anyagtudományban felhalmozott ismeretek milyen mértékben vihetők át a biológiai rendszerekben zajló kristályosodási folyamatokra.

További, a fentiekhez kapcsolódó eredmények (publikációk, számítógépes animációk) találhatóak csoportunk honlapjain [14].

Végül szeretnék köszönetet mondani munkatársaimnak, elsősorban *Pusztai Tamásnak, Tóth Gyulának, Tegze Györgynek, Börzsönyi Tamásnak, Pod-*

maniczky Frigyesnek, Rátkai Lászlónak és Korbuly Bálintnak, akik nélkül ezek az eredmények nem vagy nehezebben születtek volna meg, valamint külföldi együttműködő partnereimnek *James A. Warrennek és Jack F. Douglasnak* (National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, USA).

Irodalom

1. <https://www.pinterest.com/jamesmsims/crystalline-dreams>
2. Gránásy L., Pusztai T., Börzsönyi T.: A polikristályos megszilárdulás térelméleti modellezése. *Fizikai Szemle* 55 (2005) 203–211.
3. Pusztai T., Bortel G., Tóth G., Gránásy L.: Komplex kristályos morfológiák három dimenzióban. *Fizikai Szemle* 56 (2006) 412–415.
4. Tegze G., Tóth G., Gránásy L.: Kristályos önszerveződés határfeleleteken: kétdimenziós kristályok. *Fizikai Szemle* 62 (2012) 185–187.
5. Szállás A., Rátkai L., Pusztai T., Gránásy L.: Helikális mintázat eutektikus ötvözetben. *Fizikai Szemle* 63 (2013) 333–337.
6. Gránásy L., Pusztai T., Börzsönyi T., Warren J. A., Douglas J. F.: A general mechanism of polycrystalline growth. *Nature Materials* 3 (2004) 645–650.
7. Gránásy L., Pusztai T., Warren J. A., Douglas J. F., Börzsönyi T., Ferreira V.: Growth of „dizzy dendrites” in a random field of foreign particles – *Nature Materials* 2 (2003) 92–96.
8. Gránásy L., Szállás A., Korbuly B., Tóth G. I., Környei L., Pusztai T.: Phase-field modeling of polycrystalline solidification: From needle crystals to spherulites – a review. *Metallurgical and Materials Transactions A* 45 (2014) 1694–1719.
9. Gatos K. G., Minogianni C., Galiotis C.: Quantifying crystalline fraction within polymer spherulites. *Macromolecules* 40 (2007) 786–789.
10. Podmaniczky F., Tóth G. I., Tegze G., Gránásy L.: Hydrodynamic theory of freezing: nucleation and polycrystalline growth. *Physical Review E* 95 (2017) 052801.
11. Shibuta Y., Sakane S., Miyoshi E., Okita S., Tanaka T., Ohno M.: Heterogeneity in homogeneous nucleation from billion-atom molecular dynamics simulation of solidification of pure metal. *Nature Communications* 8 (2017) 10.
12. Gránásy L., Podmaniczky F., Tóth G. I., Tegze G., Pusztai T.: Heterogeneous nucleation of/on nanoparticles: a density functional study using the phase-field crystal model. *Chemical Society Reviews* 49 (2014) 2159–2173.
13. Gránásy L., Tóth G. I.: Crystallization: colloidal suspense. *Nature Physics* 10 (2014) 12–13.
14. <http://www.szfi.hu/~grana/crystal.html> és <http://www.phasefield.hu>



TÚL AZ EXPONENCIÁLIS FAKTORON

Bíró Tamás Sándor

MTA Wigner FK Részecske és Magfizikai Intézet

Ebben az írásban személyes nézeteimet prezentálom a nem-extendív termodinamikáról, amelyben az általánosított kanonikus és nagykanonikus faktorok helyettesítik az exponenciális függvényt. Ha a megszokott $\exp(-E/T)$ faktort, amely az E energiájú állapotok relatív előfordulási arányát adja meg a statisztikai sokaságban adott T abszolút hőmérséklet esetén, általánosítjuk, elsősorban matematikai kihívásokkal nézünk szembe: milyen más képletek teljesítenek hasonló feltételeket, hogyan viszonyulnak a termodinamika törvényeihez, mi az általános alak stb. Azonban legalább olyan fontos, hogy a formalizmust fizikai jelenségekre építsük, az új függvényformák és paramétereik jobb megértése, esetenként intuitív származtatása kedvéért. A fizikai világban számos példának kell léteznie egy-egy hasznos képlet, illetve annak általánosítása mögött. Ez motivál arra, hogy cikkemet egyszerű példákkal kezdjem és fokozatosan általánosítsak, hogy végül néhány alternatív entrópiaformulát is bemutathassak.

Fázistér, entrópia és kanonikus súlyfaktor

Ludwig Boltzmann a bécsi Zentralfriedhofban van eltemetve. Síremlékére vésték élete legfontosabbnak tartott képletét: $S = k \log W$. A k állandót később, Max Planck javaslatára, Boltzmann-állandónak nevezték el. A W jelentése a képletben vitatott. Sokan a „Wahrscheinlichkeit”, valószínűség szó kezdőbetűjeként értelmezik, de az állapotok számát jelenti egyenletes valószínűség-eloszlás, $P_i = 1/W$, $i = 1, 2, \dots, W$, esetén. Ha kombinatorikusan számolunk, akkor ez az utak száma (út = Weg), ahogyan egy adott makroállapot (klasszikus fizikában megfigyelt állapot) felépíthető a mikroállapotok sokaságával.

Bármelyik tábor is követnénk, tény, hogy a folytonos teret és időt használó mechanikai szemlélet ezt a mennyiséget a fázistérfogattal, a fázistérben hosszú idő alatt bejárt absztrakt térrész térfogatával helyettesíti. Persze W itt is egy szám, a fázistérfogattal és az ele-

mi fázistércella térfogatának aránya. Hogy ez miért csak egész szám lehet, arra a klasszikus fizika nem ad választ, s a kvantumfizika sem precíz. Ez a tény nem akadályozza meg a fizikusokat abban, hogy a fázistérfogattal használják.

A fázistér egy pontszerűnek képzeltek fizikai objektum mozgását a térbeli koordinátáival és impulzusának komponensekre bontott adataival jellemzi: ez a pont mozog, ahogy az idő telik és az objektum helyzete, sebessége változik. Fázistérfogattal az is amit egy-egy ilyen objektum hosszú (nagyon hosszú) idő alatt bejár, s az is amit ilyen pontoknak nagyszámú halmaza foglal el. Energiát nem disszipáló fejlődésekre ez a térfogat, Ω , állandó. Energiát disszipáló, azaz hőcserével járó folyamatokra és rendszerekre, változhat. Kémi golyócskáknak képzeltek atomokból álló gázok esetén, az úgynevezett kinetikus elméletben, igazából csak az impulzuskomponensek számítanak: miközben a teljes kinetikus energia állandó, egy-egy részecske impulzusának egy-egy komponense, például ütközések révén változik.

A fázistérben ezért az entrópia arányos a fázistérfogattal logaritmusával:

$$S(E) = \log \Omega(E), \quad (1)$$

ahol E jelöli a teljes kinetikus energiát és az entrópiát a Boltzmann-állandó egységeiben mérjük.¹ Einstein a képlet fordított használatát vezette be:

$$\Omega(E) = e^{S(E)}. \quad (2)$$

Egyszerű fázistérfogatok

Kinetikus modelleket tekintünk, amelyekben n részecske összesen E energián osztozik. Ez különféle feladatokat jelent aszerint, hogy a részecskék hányféle irányban mozoghatnak. Nagyenergiás gyorsító kísérletekben jellemző a részecskesugarak, úgynevezett *jetek* megjelenése, amelyben egy adott összenergia praktikusán egyetlen dimenzió mentén oszlik egyedi impulzusokra. Ilyen esetekben annyi impulzuskomponens van, ahány részecske, és ezért ennyi dimenziós a fázistér, $\dim = n$. Ugyanakkor a jetben mozgó részecskék, úgynevezett partonok, sebessége megközelíti a fénysebességet. Olyan ez, mintha mozgási energiájuk sokkal nagyobb lenne a nyugalmi tömegenergiájuknál, ezért a

$$\sum_i |p_i| = E$$

összeget adja meg a teljes energia.

¹ A modern elméleti fizika tele van hasonló trükkökkel, egészen a Planck-hossz bevezetéséig.

Bemutató előadás az Academia Europaea budapesti közgyűlésén, Fizika és Technika Szekció ülése, 2017. szeptember 3.



Bíró Tamás Sándor elméleti fizikus, az MTA Wigner FK RMI igazgatóhelyettese, tudományos tanácsadó. Kutatási területe a nehézion-fizika, a kvark-gluon plazma, amely sokszor extrém sűrű és forró, erősen kölcsönható rendszerekben térelméleti és statisztikus fizikai módszerek alkalmazását is megköveteli. Ezt jól tükrözi a Springer kiadó *Fundamental Theories of Physics* sorozatában megjelent könyve, *Is There a Temperature? – Conceptual Challenges at High Energy, Acceleration and Complexity*.

Másrészt a megformálódott nehéz részecskék, a hadronok az ilyen kísérletekben gyakorlatilag nem-relativisztikusan mozognak, viszont az összelőtt sugár (beam) merőleges síkban szabadon. Az ütközés tömegközponti rendszerében álló (közel nulla rapiditású) hadronokat kiválogatva, a megfelelő modell egy kétdimenziós ideális gáz. Ekkor

$$\frac{\sum_i |p_i|^2}{2m} = E$$

adott és összesen $2n$ összeadandó van.

Az efféle feladatok közös megoldása egy olyan fázistérfogot kiszámítása, ahol az x_i komponensek (a részecskék valamely irány szerinti impulzuskomponensei) egy bizonyos képlet szerinti összege egy n dimenziós térben vett „sugarat” ad meg. Ez az úgynevezett „ n -labda” hipertérfogata az L_p norma szerint, az alábbi egyenlőség alapján:

$$\left(\sum_{i=1}^n |x_i|^p \right)^{1/p} \leq R(E). \quad (3)$$

Ez a térfogat általánosan kiszámítható, az eredmény

$$\Omega_n^{(p)}(R) = \frac{\Gamma\left(\frac{1}{p} + 1\right)^n}{\Gamma\left(\frac{n}{p} + 1\right)} (2R)^n. \quad (4)$$

Itt a $\Gamma(a)$ Euler-féle gamma-függvény a faktoriális-szorzat általánosítása; definiáló tulajdonsága, hogy $\Gamma(a+1) = a\Gamma(a)$ és $\Gamma(1) = 1$.

Soroljuk fel a legérdekesebb eseteket! Az egydimenziós jet esetén a norma az abszolút értékek összege, ez a $p = 1$ eset a (3) képletben. A kétdimenziós, tömeges modellben a sugár $R(E) = (2mE)^{1/2}$, a dimenzió $2n$ és a norma $p = 2$. Míg az előbbi két komponens (x_1, x_2) esetén egy „káró” formájú területet mutat, az utóbbi a jól ismert kört. Ezen alakzatok sokdimenziós általánosítása a keresett fázistérfogot. Végül, csak az összehasonlítás kedvéért, a $p = \infty$ norma, más néven maximumnorma is kiszámítható; ez a hiperkocka, a $2E$ oldalú négyzet általánosítása.

$$\Omega_n^{(1)}(E) = \frac{1}{n!} (2E)^n \quad \text{jet,}$$

$$\Omega_{2n}^{(2)}(\sqrt{2mE}) = \frac{1}{n!} (2\pi mE)^n \quad \text{transzverz,} \quad (5)$$

$$\Omega_n^{(\infty)}(E) = (2E)^n \quad \text{hiperkocka.}$$

Most képzeljük el, hogy az n -ből, ϵ kinetikus energiával kiválasztunk (detektálunk) egyetlen részecskét. Ennek mekkora az esélye? A statisztikus faktor, ha a fázistérfogot egyenletesen töltött, a megfelelő kis és nagy térfogatok függvénye. Az egyetlen részecske ϵ energiával, és ettől függetlenül $n-1$ részecske összesen $E-\epsilon$ energiával arányaiban kisebb fázistérfogatot

foglal el, mint n részecske összesen E energiával. Hiszen kiróttunk egy plusz feltételt, és az eredeti esetet az összes lehetséges ϵ értékre összegezve, a valószínűségekkel súlyozva, kaphatjuk vissza.

A kiválasztás valószínűsége, a kanonikus statisztikus faktor, a következő arányból származik:

$$r_n^{(p)} = \frac{\Omega_1^{(p)}(\epsilon) \Omega_{n-1}^{(p)}(E-\epsilon)}{\Omega_n^{(p)}(E)}. \quad (6)$$

Ez a különböző, fent felsorolt esetekben az alábbiak szerint adódik:

$$\begin{aligned} r_n^{(1)}(E) &= \frac{\epsilon}{E} n \left(1 - \frac{\epsilon}{E}\right)^{n-1}, \\ r_{2n}^{(2)}(\sqrt{2mE}) &= \frac{\epsilon}{E} n \left(1 - \frac{\epsilon}{E}\right)^{n-1}, \\ r_n^{(\infty)}(E) &= \frac{\epsilon}{E} \left(1 - \frac{\epsilon}{E}\right)^{n-1}. \end{aligned} \quad (7)$$

Különleges módon a $p = 1$ extrém relativisztikus és a $p = 2$ nem relativisztikus eset ugyanarra a fázistérfogot arányra vezet egyetlen részecske kiválasztásakor.

A Boltzmann–Gibbs-faktor

Most lássuk, hogyan lesz ebből a Boltzmann- és Gibbs-féle exponenciális faktor. Ebben az egydimenziós jetet az extrém relativisztikus partonokkal és a kétdimenziós ideális gázt a nehéz hadronokkal – szerencsés módon – egyazon képlettel írhatjuk le. Továbbá mindkettő egyetlen deriválással származtatható a hiperkocka esetből is:

$$r_n^{(1)} = r_{2n}^{(2)} = -\epsilon \frac{\partial}{\partial \epsilon} \left(1 - \frac{\epsilon}{E}\right)^n. \quad (8)$$

Az alap statisztikus faktor, amivel tovább foglalkozunk, tehát

$$\rho_{n,E}(\epsilon) = \left(1 - \frac{\epsilon}{E}\right)^n. \quad (9)$$

A tankönyvekből ismert esetet az $n \rightarrow \infty$ és $E \rightarrow \infty$ határátmenet adja, rögzített $E/n = T$ értékek mellett:

$$\bar{\rho}_{Gibbs} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 - \frac{\epsilon}{nT}\right)^n = e^{-\epsilon/T}. \quad (10)$$

Azonban nem ez a határátmenet az egyetlen lehetőség arra, hogy megkapjuk az exponenciális faktort! Kis rendszerekben sem n , sem E nem elég nagy a tankönyvi esethez, mégis sokszor tapasztaljuk, hogy az exponenciális statisztikus faktor „működik”. Az ok az alábbi lehet.

Képzeljük el, hogy ütközési eseményről eseményre más és más számú hadron keletkezik, azaz n értéke fluktuál. Az éppen n részecskés eset valószínűsége

(előfordulási aránya a sokszor megismételt, de egymástól független kísérleti mintában) legyen P_n . Ekkor az összesített adatokban előtűnő statisztika alapfaktorra a fentiekben elemzett tényező átlaga:

$$\bar{\rho} := \langle \rho_{n,E}(\varepsilon) \rangle = \sum_{n=0}^{\infty} P_n \left(1 - \frac{\varepsilon}{E}\right)^n. \quad (11)$$

Fontos, hogy itt nem végezzük el a „termodinamikai” határátmenetet.

Mi lehet a részecskeszám, s ezzel a kinetikus modell-beli fázistér fogat dimenziójának eloszlása? Sok minden kipróbálható, de részesítsük előnyben az egyszerű feltevéseket. Az n természetes szám legegyszerűbb (egyetlen paramétert tartalmazó) eloszlása a Poisson-eloszlás. Ennek eredménye

$$\bar{\rho}_{\text{POI}} := \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\langle n \rangle^n}{n!} e^{-\langle n \rangle} \left(1 - \frac{\varepsilon}{E}\right)^n = e^{-\langle n \rangle \varepsilon / E} \quad (12)$$

megint csak egy Boltzmann–Gibbs-faktor, ráadásul a „kinetikus” hőmérséklettel: $T = E/\langle n \rangle$. Ez az eredmény még $\langle n \rangle < 1$ esetén is igaz!

Túl az exponenciálison

A fázistér fogat fluktuáló dimenziója azonban más eloszlású is lehet. Történetesen a nagyenergiás jetekben keletkező hadronok számának eloszlását sokkal jobban illeszti a két paraméteres, negatív binomiális eloszlás:

$$P_n = \binom{n+k-1}{n} f^n (1+f)^{-n-k}. \quad (13)$$

Ebben az esetben $\langle n \rangle = fk$ és a kinetikus energia statisztikájára a következő súlyfaktort kapjuk:

$$\bar{\rho}_{\text{NBD}} = \left(1 + \frac{\langle n \rangle}{k} \frac{\varepsilon}{E}\right)^{-k}. \quad (14)$$

Ez az eredmény a *Tsallis–Pareto-eloszlás*, ugyanazzal a hőmérséklettel, mint a Poisson-esetben, $T = E/\langle n \rangle$; ugyanakkor egy $-k$ -adik hatvány szerinti lecsengéssel az exponenciális helyett. Az előző eredményt a $k \rightarrow \infty$ eset mindenestre visszaadja.

Összefüggés a hőmérséklet-fluktuációval

Mostantól általános P_n eloszlásokat vizsgálunk, és speciálisan a Boltzmann–Gibbs- (12), illetve általánosan a Tsallis–Pareto- (14) energiaeloszlásokat csupán közelítéseknek tekintjük. A kívánt közelítő egyenlőség,

$$\bar{\rho}(\varepsilon) = \sum_{n=0}^{\infty} P_n \left(1 - \frac{\varepsilon}{E}\right)^n \approx \left[1 + (q-1) \frac{\varepsilon}{T}\right]^{-\frac{1}{q-1}} \quad (15)$$

mindkét oldala sorbafejthető egy kis $\varepsilon \ll E$ szerint. A négyzetes tagig elmenve az alábbi általános összefüggéseket kapjuk:

$$\frac{\langle n \rangle}{E} = \frac{1}{T} \quad \text{és} \quad \frac{\langle n(n-1) \rangle}{E^2} = \frac{q}{T^2}. \quad (16)$$

A híres Tsallis-paraméter, q ebben az összefüggésben az n fluktuáló dimenzionalitás úgynevezett második skálázott faktoriális momentumának adódik,

$$q = \frac{\langle n(n-1) \rangle}{\langle n \rangle^2}. \quad (17)$$

Felhívjuk a figyelmet, hogy q csak a dimenzionalitás eloszlásának tulajdonságaitól függ, a teljes E energiától független, ezért *nem mikrokanonikus tulajdonság*.

A hőmérséklet a fenti esetekben a kinetikus definícióval adódott, az átlagértékhez kapcsolódva. Azonban úgy is tekinthetjük, mint minden n -re egy adott β fluktuáló mennyiségből származó átlageredményt. Az általános, $\Omega(E) = e^{S(E)}$ fázistér fogatból kiindulva az entrópia-energia összefüggés vezérli a statisztikus eloszlásokat. A statisztikai alapfaktorunk most egy általános értelemben vett átlag, egy „szuperfaktor”:

$$\bar{\rho}(\varepsilon) = \langle e^{S(E-\varepsilon) - S(E)} \rangle. \quad (18)$$

Megint kifejtve és összehasonlítva a – Boltzmann–Gibbs esetet is magában foglaló – Tsallis–Pareto-közelítéssel kapjuk a T és q paraméterek általános értelmezését:

$$\begin{aligned} \left\langle 1 - \varepsilon S'(E) + \frac{\varepsilon^2}{2} (S''(E) + S'(E)^2) + \dots \right\rangle &= \\ &= 1 - \frac{\varepsilon}{T} + \frac{q\varepsilon^2}{2T^2} + \dots \end{aligned} \quad (19)$$

A vezető tagok azonosítása révén

$$\frac{1}{T} = \langle S'(E) \rangle, \quad q = \frac{\langle S''(E) + S'(E)^2 \rangle}{\langle S'(E) \rangle^2}. \quad (20)$$

Az $S(E)$ állapotegyenlet deriváltjait összehasonlítva a termodinamikai mennyiségekkel a végső konklúzió a q paramétert a véges teljes hőkapacitás (C) miatti méreteffektusok és a $\beta = S'(E)$ derivált fizikai fluktuációiból következő variancia egymásnak feszülő összjátékaként értelmezi:

$$q = 1 - \frac{1}{C} + \frac{\Delta \beta^2}{\langle \beta \rangle^2}. \quad (21)$$

Ez egyaránt eredményezhet $q > 1$ és $q < 1$ értékeket. Ha valaki ragaszkodik (vagy valahonnan „tudja”) a $q = 1$ eredményt, ami a Boltzmann–Gibbs exponenciális faktornak felel meg, akkor arra a következtetésre jut, hogy a reciprok-hőmérséklet varianciája követi a *Landau* és mások által becsült szabályt:

$$\frac{\Delta \beta}{\langle \beta \rangle} = \frac{1}{\sqrt{C}}. \quad (22)$$

Ez a sokat idézett „egy per négyzetgyök nagy N ” szabály. A természetnek azonban nem minden jelensége esik ezen szabály hatálya alá.

Nem-additív kompozíció

A Boltzmann sírkövén (is) megtalálható logaritmikus formula fő motivációja az, hogy a W mennyiségek szorzata mellett additív; a logaritmus függvény a szorzatot összegre képezi le. Ez egy logikus alapeset és megfelel az exponenciális statisztikai súlyok alkalmazásának is. Elméletileg azonban más entrópiaképlet is elképzelhető, amely korrekciókat jelent az eredetihez. Ez a szorzatra nem lesz összeg, illetve, ha valamire összeg lesz, az nem a valószínűségek szorzata. Az optimális termodinamika ebben az esetben nem feltétlenül a szorzat valószínűségé, hanem valamilyen korrelált eseté.

A nem összeadódás a független részrendszerekből építkező nagyobb rendszerekre különösen érvényes lehet, amikor komplex rendszerek fizikájával kell szembenézni. Milyen az értelmes korrekció és mekkora? Matematikailag bármilyen művelettel (képlettel, csoportszorzattal) is helyettesítjük az összeadást, értelmes termodinamikához ezen szabálynak asszociatívnak kell lennie. Ha így van, akkor a szabály „lefordítható” egy másik, az S eredeti entrópiától monoton függő, $K(S)$ mennyiség összeadására. $S_{12} = S_1 \oplus S_2 = h(S_1, S_2)$ megfelel $K(S_{12}) = K(S_1) + K(S_2)$ -nek.

Ez megmutatja az utat az entrópia „deformációjához”:

$$K(S) := \sum_i p_i K(\ln -p_i). \quad (23)$$

Deformált entrópia véges fázisú esetben

Ha a fentiekben egy deformált entrópiából indultunk volna ki, akkor más statisztikus alapfaktort kaphatunk volna:

$$\bar{p}_K(\epsilon) = \langle e^{K(S(E-\epsilon)) - K(S(E))} \rangle. \quad (24)$$

Most is a lineáris és négyzetes tagok megfeleltetésével egy Tsallis–Pareto-eloszlás T_K hőmérséklet- és q_K paraméter-értelmezését kapjuk:

$$q_K = \left[1 + \frac{K''}{K'^2} \right] \left(1 + T^2 \Delta \beta^2 \right) - \frac{1}{C} \frac{1}{K'}. \quad (25)$$

Olyan $K(S)$ deformációt van értelme választani, amely $q_K = 1$ -re vezet, hiszen eredményül egy additív entrópiájú rendszert szeretnénk. Vagyis a $K(S)$ megfelelő választásával kompenzáljuk a $q \neq 1$ eredményt, amit $S(E) = \log \Omega(E)$ alapján kaptunk. Ez a kívánság a $K(S)$ függvényre vonatkozó differenciálegyenletre vezet.

Különlegesen érdekes a differenciálegyenlet megoldása abban az esetben, ha a teljes hőkapacitást egy S -től független állandónak (de nem végtelennek) tekintjük: ez az „ideális gáz” koncepciójának általánosítá-

sa. Ugyanakkor a fluktuációk miatti β -variancia is S -től függetlenül rögzített legyen. A megoldásként adódó megfelelő $K(S)$ deformációs függvény, használva a

$$h_\alpha(x) := \frac{e^{\alpha x} - 1}{\alpha} \quad (26)$$

jelölést, az alábbi:

$$K(S) = h_\lambda^{-1}(h_\mu(S)). \quad (27)$$

A deformáció inverz függvénye a μ és a λ felcserélésével adódik:

$$K^{-1}(\sigma) = h_\mu^{-1}(h_\lambda(\sigma)). \quad (28)$$

Itt

$$\lambda = \frac{\Delta \beta^2}{\frac{1}{T^2} + \Delta \beta^2} \quad \text{és} \quad \mu = \frac{1 - \lambda}{C}.$$

Végeredményül egy $K(S)$ -re alapozott új entrópiaképlet adódik, amely nem akkor additív, amikor az $\ln p_i$ valószínűség-logaritmusok:

$$S_{\lambda, \mu}^{\text{add}} = \frac{1}{\lambda} \sum_i p_i \ln \left[1 + \frac{\lambda}{\mu} (p_i^{-\mu} - 1) \right]. \quad (29)$$

A fentebb elemzett Tsallis–Pareto-paraméter kifejezhető eme általánosabb képlet paramétereivel:

$$q = \frac{1 - \mu}{1 - \lambda}.$$

Végezetül bemutatunk néhány, speciális esetben adódó entrópiaképletet. Legfontosabb a $q = 1$ eset, amikor

$$\frac{\Delta \beta}{\langle \beta \rangle} = \frac{1}{\sqrt{C}}.$$

Ekkor természetesen a jól ismert Boltzmann–Gibbs–Planck–Shannon-képlet adódik,

$$S_{\lambda = \mu} = - \sum_i p_i \ln p_i. \quad (30)$$

Egy másik határeset szerint $q \ll 1$, vagyis a relatív fluktuációk sokkal kisebbek a szokásosan feltételezettnél,

$$\frac{\Delta \beta}{\langle \beta \rangle} \ll \frac{1}{\sqrt{C}}.$$

Ekkor

$$S_{\lambda \ll \mu} = \frac{1}{1 - q} \sum_i (p_i^q - p_i). \quad (31)$$

Ezen képlet kiterjedt használatát *Constantino Tsallis* 1988-ban javasolta. Megjegyezzük, hogy ez az ered-



1. ábra. Humoros rajz a tipikus tudós századokon átívelő alakjának evolúciójáról (forrás: internet).

mény a Rényi-entrópia monoton függvénye, ugyanazzal a q paraméterrel.

Végezetül fenti eredményünket az ellenkező, $\lambda \gg \mu$ határesetben is megvizsgáljuk, amikor a fluktuációk miatti hőmérséklet-variancia messze túllépi a végesméret-effektusokat,

$$\frac{\Delta \beta}{\langle \beta \rangle} \gg \frac{1}{\sqrt{C}}.$$

Ebben az esetben

$$S_{\lambda \gg \mu} = \frac{1}{\lambda} \sum_i p_i \ln(1 - \lambda \ln p_i). \quad (32)$$

Megjegyezzük, hogy mivel λ egy nulla és egy közötti mennyiség, extrém nagy variancia (illetve nagy méretben sem elhanyagolhatóan fluktuáló dimenziójú fázistér-fogakat betölteni igyekvő kinetikus rendszerek) esetén veszi fel a $\lambda = 1$ értéket. Ehhez az esethez egy paramétermentes entrópiaképlet tartozik, amely a szokásos képletet csak 1-hez közeli p_i valószínűségek közelében adja, a kis valószínűségű járulékok inkább duplán logaritmikusak.

$$S_{\lambda=1} = \sum_i p_i \ln(1 - \lambda \ln p_i). \quad (33)$$

A megfelelő kanonikus egyensúlyi eloszlások egy duplán exponenciális lecsengést mutatnak, hasonlóan a Gompertz-eloszláshoz.

A tudós és a tudomány evolúciója

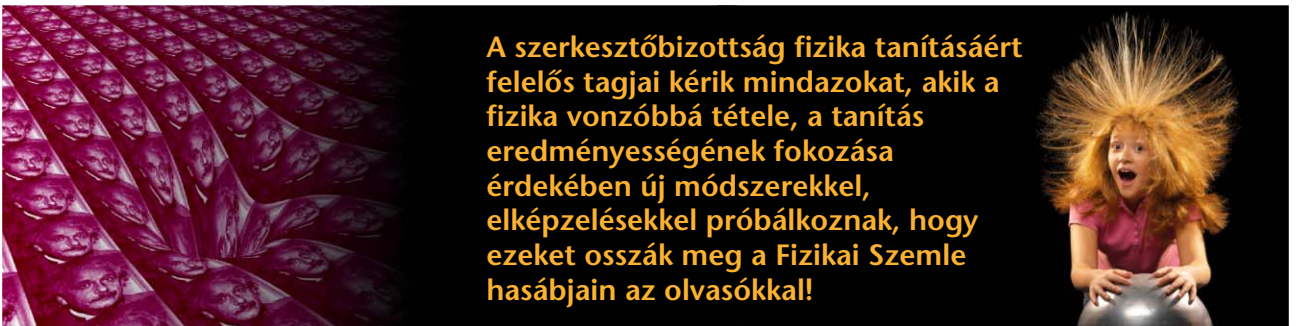
Mára már megszoktuk, hogy minden változik, fejlődik. Ez fokozottan igaz a tudományos elméletekre, modellekre, gondolkodásmódra. A klasszikustól eltérő statisztikák és statisztikus faktorok dinamikus modellekben és komplex rendszerek leírásában már jó pár évtizede tért nyertek, elterjedésük folyamatosan tart előre. Az entrópiaképlet szent tehenéhez azonban eddig csak kevesek mertek nyúlni, hazánkban jól ismert kivétel volt *Rényi Alfréd*, s később tanítványai. Amíg azonban az informatikában és matematikában mindig is megengedett volt általánosított új képletekkel előállni, az elméleti fizika konzervatívabb e téren. Itt csak az „igaz” képleteket illeti csodálat. Minimum találni kell olyan jelenségek, amire az új képletek a réginél alkalmasabb (optimalizáltabb, hatékonyabb) leírást adnak.

A nem-extenzív rendszerek megléte tény. A fluktuációknak a hagyományosan feltételezettől eltérő voltát azonban esetről esetre kell tudni. Az általánosan használható és ugyanakkor egyszerűbb képletek, mint az exponenciális és a hozzá tartozó logaritmus, lehetnek az általánosabb képletek többnyire jól használható közelítései. A nem-exponenciális eloszlások gyakran megjelennek komplex rendszerek, különösen hálózatok vizsgálatok; eklatáns példa a tudományos cikkek idézeti számainak az eloszlása. Nemrég a kolozsvári Babeş-Bolyai Egyetem kutatóival, *Néda Zoltánnal* és *Varga Leventével* közösen kutatva megmutattuk, hogy ez az eloszlás, hasonlóan a Facebook-megosztások eloszlásához, ugyanazt a Tsallis-Pareto-alakot követi. Az egyetlen megszorítás, hogy minden esetben az átlaggal leosztott számot kell figyelni.

Reméljük, hogy amint ezt a karikaturista az 1. ábrán jelezte, a tudós típusának (átlagának, túlnyomó többségének) századról-századra történő image változásával a tényekhez és elméletekhez való, hosszan kiérlelt viszonyunk tartalmilag nem a teljes fordulat, hanem az általánosítás és a megfelelő feltételekhez kötött megítélés felé halad. Köszönöm, hogy az Academia Europaea méltónak talált a tagjai közé meghívásra, és hogy most meghallgattak.

Irodalom

1. <http://arxiv.org/abs/1707.07912>
2. <http://arxiv.org/abs/1701.05347>
3. <http://arxiv.org/abs/1611.06698>
4. <http://arxiv.org/abs/1610.09973>



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

AZ »ATOM-ROZSDA« GAMMA-SPEKTROMETRIÁJA ÉS AZ ATOMERŐMŰVEK BIZTONSÁGOS MŰKÖDÉSE

Raics Péter

DE Kísérleti Fizikai Tanszék és

Quantechologies Kutatási és Fejlesztési Kft., Debrecen

Csom Gyula írja: „Az atomenergetikai berendezések üzemzavarait kiváltó okok között a korrózió előkelő helyet foglal el.” ([1], 405. o.). Ezt – sajnos – a 2003-as paksi események drága leckéje is igazolta [2]. Mi köze egy atommagfizikával foglalkozó fizikusnak ehhez, amit elvileg a vegyészek témájaként illik emlegetni? Túl azon, hogy fizikai folyamatok képezik a kémiai (és biológiai) jelenségek alapjait, a korszerű vizsgálati eljárások mindenhol a fizikusok által fejlesztett módszereken alapulnak. A továbbiakban leírt nem-magfizikai folyamatok pontatlansága miatt a szerző előre is elnézést kér, mert az atomerőművekben mintegy három évtized során szerzett tapasztalatait csak az egyszerűsítő fizikusi elmével próbálja értelmezni, főleg a kétkörös nyomottvízes reaktorokra (VVER, PWR) vonatkozóan.

Érdekes a kérdés: milyen technikai feladatok megoldása teszi lehetővé a nukleáris energia nagy léptékű és gazdaságos felszabadítását háborús vagy békés célokra? A fizikai elv a maghasadás és a fúzió, amelyek lényeges tulajdonságait a legegyszerűbb eszközökkel (például GM-cső) már az 1930-as években kiderítették, ám a műszaki megvalósításhoz a „hagyományos” technológiákat kellett jelentősen továbbfejleszteni és alkalmazni. Az egy- és kétfokozatú bombáknál a hatás teljes kifejlődéséhez megfelelő ideig együtt kell tartani a tölteteket. Vajon a békés célú energiafelszabadításhoz milyen műszaki fejlesztések szükségesek? A fúziós energiatermelés ipari méretű megvalósítása rendkívül bonyolult műszaki-technológiai problémák megoldatlansága miatt (évtizedek óta) késik.

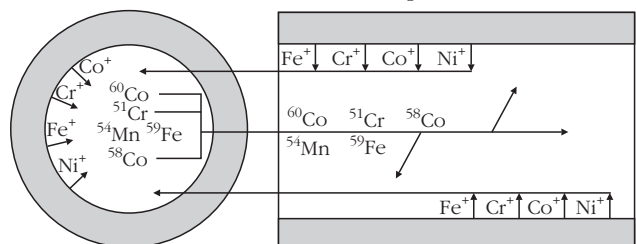
A maghasadásos atomerőmű reaktorának biztonságos működését, a teljesítmény szabályozhatóságát és egyenletességét – sok más tényező mellett – a neutronelnyelő bór változó koncentrációjú savas oldata biztosítja [3]. A primer körben a víz hőmérséklete 270–300 °C, amihez 123 bar nyomás tartozik. Ilyen körülmények között még a csak néhány százalékos bórsav is igen agresszív, annak ellenére, hogy különféle adalékokkal igyekeznek csökkenteni hatásait,

továbbá a primer kör belső acélfelületei különleges védőréteggel vannak ellátva („plattírozás”). A sokfajta egyéb kölcsönhatás, a nagy sebességgel áramló hűtővíz (10 000-es nagyságrendű Reynolds-szám!), valamint rezgések és anyagbeli feszültségek miatt – a kémiai mellett – mechanikai eredetű korrózió (erózió) is fellép. Mindezt a hatalmas sugárzás hatásai – mind a hűtővízben, annak adalékaiban, szennyeződésein és azok kölcsönhatásaiban, mind a felületek anyagában – befolyásolják. Ehhez jönnek még a magreakciók elemátalakító hatásai, amelyek további kémiai folyamatokat indítanak el, megváltoztatják a pH-t, ami újabb adalékokat követel [4], de ezek kellemetlen hatásait kompenzálni kell ..., jaj! Az atomerőművek vízüzeme a biztonság egyik fontos záloga és egyúttal művészet. Ebben közreműködni a fizikus számára tanulást, sok izgalmas feladatot és egyben megtiszteltetés is jelent.

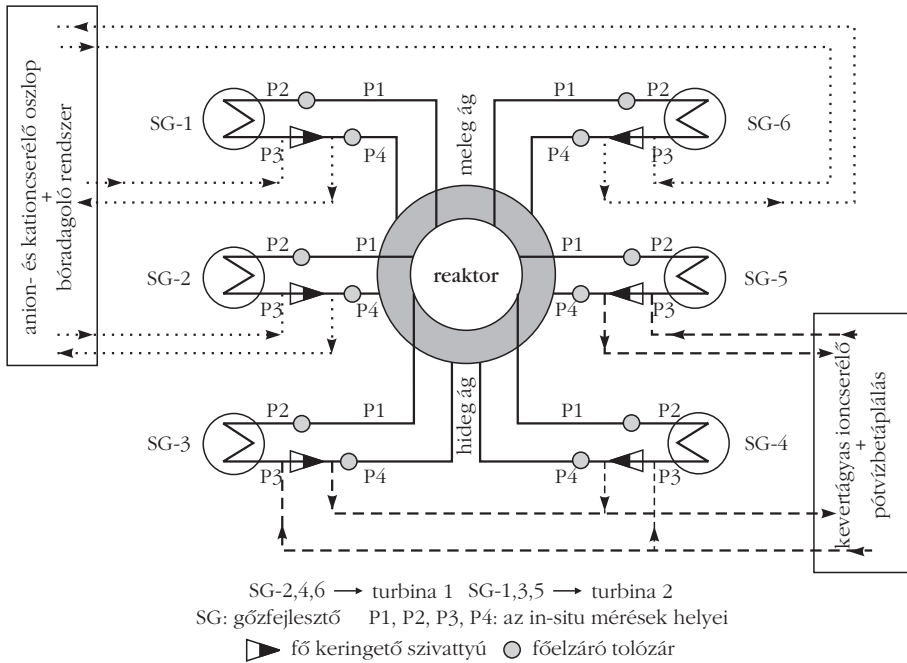
Az atommagreaktorok primer körében lejátszódó folyamatok

Az 1. ábra a hűtővízben megjelenő atomok/ionok kémiai, illetve izotópjaik magfizikai folyamatait mutatja. Az acélból és egyéb anyagokból (fűtőelemek Zr/Nb ötvözetű fala, tömitések, hegesztések-forrasztások [1]) származó korróziótermékek mellett még a fűtőelemek burkolatának hajszálrepedésein keresztül kijutó hasadási termékek is bekerülnek a vízáramba. Ez a „leves” a reaktor neutronterében felaktiválódik és a primer körben kering. A leálláskor bekövetkező hőmérséklet-csökkenés folytán az izotópok jelentős része lerakódik a csövek belső falán, a „nem-fixált szennyeződés” pedig a folyadékfázisban marad. Az előbbi „kívülről” csak gamma-sugárzása révén észlelhető, az utóbbi összetételét az atomerőmű vegyi laboratóriumaiiban speciális mintavételi eljárást használó kémiai és nukleáris technikákkal vizsgálják. A koncentrációtól, korróziótól és a hőmérséklettől függően

1. ábra. Korrózió eredetű radioizotópok keletkezése a primer körben. reaktor (neutronforrás) primer kör



Raics Péter 1967-ben szerzett fizikus diplomát a debreceni Kossuth Lajos Tudományegyetemen. A Kísérleti Fizikai Tanszéken kezdett dolgozni, ahol nyugdíjba vonulása óta is óraadó. Egyetemi tankönyvek, jegyzetek társszerzője. Kutatómunkája a magreakciók kísérleti vizsgálata, részecskefizika és ezekhez eszközfelállítás. Három évtizede foglalkozik az atomerőmű-biztonság mérés technikájával. Segíti a fizikatanárok továbbképzését, tudományt népszerűsítő előadásokat, kísérleti bemutatókat tart.



2. ábra. A paksi VVER-440/213 blokk primer körjének egységeinek kapcsolása és a mérési pontok. Szaggatott és pontozott vonalak: a részáramú berendezések csatlakozása a fővízkörhöz (folytonos vonal).

a kötegekben egymástól 1 mm-re lévő elemek falán kampány közben is történhet kiválás, ami a víz áramlását akadályozva a hűtés veszélyes romlását és a teljesítmény jelentős csökkenését okozhatja (Paks, 2003 [2]). A közeljövő 3+ generációs erőműveiben (például Paks2) már sok olyan megoldást alkalmaznak, amelyek ezeket a veszélyeket lényegesen csökkentik, de a vízkémia kihívásai továbbra sem tűnnek el: a hatalmas primer kör felületek a korrózió kiinduló helyei (forrásai) és egyúttal végállomásai, bonyolult és állandóan változó kölcsönhatások a folyadék és szilárd fázis között, mindkettőt befolyásolja a hatalmas és időtől-tértől függő sugárzási környezet [4].

A továbbiakban az MVM Paksi Atomerőmű Zrt. négy VVER-440/213 típusú reaktorblokkján a Vegyészet Osztály felkérésére 1985 óta végzett méréseink alapján mutatjuk be a korróziós és hasadási termékek helyszíni (*in-situ*) gamma-spektrometriájával kapott eredményeinket, a 122 reaktorév tapasztalatait.

Mérési helyszínek és a Pakson alkalmazott technika

Az atomerőművek működésének alapjai, valamint a paksi egységek felépítésének részletei az atomerőmű honlapján [5] tanulmányozhatók. Az egyenként 500 MWe (1485 MWh) teljesítményű paksi blokkok méréseink szempontjából érdekes néhány adata: a 6 darab gőzfejlesztőben lévő hőátadó csövek összfelülete 12 552 m² (közel két focipálya), a primer kör vízzel érintkező része 17 552 m² területű, teljes térfogata 205 m³.

A 2. ábrán a primer körjének elemek leegyszerűsített kapcsolatai és az *in-situ* gamma-spektrometria 24 pontjának elhelyezkedése látható a fővízkör csövein.

Blokkonként a hatból egy gőzfejlesztő tengelye mentén 17 helyen történik gamma-spektrometria. A kevertágyas ioncserélő oszlop függőleges aktivitáseloszlása 10 magasságban kerül meghatározásra. A dózisprofil minden egységen felvesszük. Időnként a pótvízszivattyú-rendszer analízisére is szükség van.

A geometriától és a várható sugárterhelésnek megfelelő hatásfokú HpGe-detektorok kerülnek alkalmazásra, az optimális spektrumszerkezet figyelembevételével. Szükség esetén különlegesen nagy érzékenységű multikristályos („clover” elrendezésű) HpGe-rendszereket használtunk. A hordozható detektorok ólomvédelemmel és kollimátorral felszerelve észlelik a gamma-sugárzást, amelynek spekt-

rumából a vizsgálandó egységek belsejében felhalmozódott radioaktív izotópok fajtája és mennyisége megállapítható. A detektorok előerősítőjét a digitális jelfeldolgozó egységgel 100 m-es kábelleveg kapcsolja össze: így csak a spektrométer helyzetének beállításához szükséges a nagyobb dózisu helyszínen tartózkodni. A 3. ábrán egy 10 cm³ érzékeny térfogatú mobil HpGe-detektor analizálja a gamma-spektrumot a primer kör egyik pontján.

A blokkonként három helyszínen felvett mintegy 100 gamma-spektrum kiértékelésének végeredménye felületi aktivitás (Bq/cm²), illetve aktivitáskoncentráció (Bq/cm³), amelyek tömegsűrűségé számíthatók át (például g/cm³). A komplex felületi hatásfok a mért *I* csúcshintenzitásokat kapcsolja az *A/F* (Bq/cm²) fajlagos (felületi) aktivitáshoz. A következő kifejezés egyszerűsített formában megadja, hogy valamely *r* pont-

3. ábra. *In-situ* gamma-spektrometria a primer körjének fővízkör 3. pontján. Az Pb-árnyékolás és kollimátor a HpGe-detektorral egy szét-szedhető asztalon van elhelyezve. (A fényképet a Paksi Atomerőmű Vegyészet Osztálya készítette és bocsátotta rendelkezésünkre.)

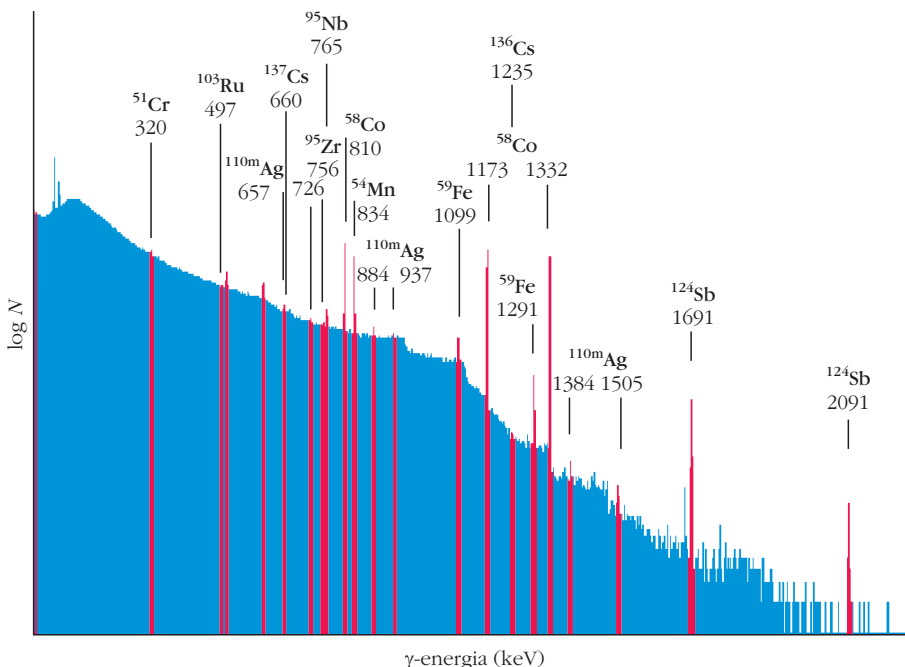


ban lévő dF felületű forrásból a γ elágazási arányú, E energiával rendelkező foton μ súlyozott abszorpció tényezőjű anyagokon áthaladva és η hatásfokkal detektálódva időegység alatt milyen csúcsterületet ad (K : egyéb korrekciók).

$$dI = \left(\frac{A}{F}\right) \gamma K(E) \eta(E, r) e^{-\mu(E)r} dF.$$

Különböző elrendezésekre végeztünk szimulációkat, amelyeket valós mérési eredményekkel validáltunk. A gyakorlatilag ellenőrizhetetlen külső háttér miatt páros mérések történnek. Az izotópok minden jelentős vonalát felhasználva számítjuk ki az aktivitásokat, így ellenőrizve a hatásfok energiafüggését. A számlálási veszteségek korrekciója nagy aktivitásoknál a 40%-ot is elérheti. A statisztikus hibák a csúcsok intenzitásától, spektrumbeli helyzetétől, valamint a háttértől függenek, és széles határok között változva néhány százaléktól akár $\pm 200\%$ -ig terjedhetnek (1σ bizonytalanság értelemben). A szisztematikus hibát – beszámítva a helyszíni mérés nehéz körülményeinek néhány bizonytalan tényezőjét – $\pm 30\%$ alattinak becsljük. Az egyes izotópokra vonatkozó általános érzékenységet, minimálisan detektálható aktivitást nehéz megadni a helyről-helyre változó összetételű spektrum Compton-kontinuuma miatt (4. ábra), továbbá függ a felezési és hűlési idő viszonyától is (a mérések többnyire a leállás után 2 héttel kezdődnek). Néhány jellemző érték egy 10 cm^3 -es detektorra: ^{60}Co (1173 és 1332 keV) $\sim 30 \text{ Bq/cm}^2$; ^{51}Cr (351 keV): $\sim 2000 \text{ Bq/cm}^2$. Az említett szélsőséges határok – nem beszélve az elektromosan és fülsüketítően zajos, meleg és sugárveszélyes környezetről, ahol néha radioaktív folyadék ömölhet, vagy nagyobb vastárgy zuhanhat a mérőeszközökre (is) – jól mutatják a mérések nehézségeit.

4. ábra. A primer körüli hurok egyik pontjában mért gamma-spektrum.



Eredmények és értelmezésük

A 4. ábrán a primer körüli főkeringtető hurok egyik pontján felvett, nyitott kollimátorral analizált gamma-spektrum látható. A nyert felületi aktivitások egyes pontokbeli arányai, a vizsgált három egység közötti eloszlásai, továbbá az egész időbeli változásai a vízkémiát és a felületek állapotát, folyamatait jellemezhetik – gondolja a fizikus.

Az észlelt atommagok eredete

A különböző helyeken végzett méréseink során mintegy 30 nuklidot tudtunk azonosítani. A fontosabb izotópok felezési ideje és származási eleme korrózió miatt többnyire (n, γ) , esetleg (n, p) magreakciókkal:

- az acélból eredően ^{51}Cr (27,7 nap; Cr), ^{54}Mn (312,2 nap; Fe), ^{59}Fe (44,6 nap; Fe), ^{58}Co (70,78 nap; Ni), ^{60}Co (5,27 év; Co),
- fűtőelemek Zr/Nb ötvözetű burkolatából: ^{95}Zr (64,0 nap; Zr), ^{95}Nb (35,1 nap; Nb és $^{95}\text{Zr} \beta^-$)*,¹
- fém tömítés, hegesztés/forrasztás, ... (?): ^{110m}Ag (250,4 nap; Ag),
- védőbevonat: ^{124}Sb (60,3 nap; Sb)**,
- adalékanyagból, szennyezésből: ^{24}Na (14,96 óra; ^{23}Na) és
- reakcióban keletkezettek közül p-indukált további folyamatokkal ^7Li -izotópokon: ^7Be (53,3 nap).

Jellegzetes hasadási termékek (a megelőző stabil izotóp által védett nuklidoktól eltekintve):

- direkt úton: $^{95}\text{Zr}/^{95}\text{Nb}^*$, ^{103}Ru (39,35 nap), ^{131}I (8,04 nap), ^{137}Cs (30,08 év), $^{140}\text{Ba}/\text{La}$ (12,75 nap / 1,68 nap), ^{141}Ce (32,5 nap), $^{144}\text{Ce}/\text{Pr}$ (284,9 nap / 17,3 min),
- hasadási termék + (n, γ) reakcióból: ^{124}Sb (60,3 nap; ^{123}Sb)**, ^{134}Cs (2,06 év; ^{133}Cs), ^{136}Cs (13,16 nap; ^{135}Cs), ami a ^{137}Cs keletkezését is befolyásolja.

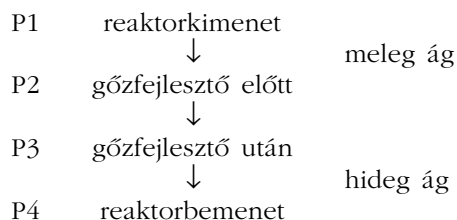
A ^{54}Mn és a ^{59}Fe egyaránt a vastól származik, így két különböző reakcióval és nagyon eltérő élettartammal mérik ugyanazt az elemet, amivel a keletkezés idejére – esetleg a korróziós folyamat kiindulási helyére, vagy a transzport irányára a hurkok és a gőzfejesztők között – lehet következtetni. A ^{60}Co izotóp adja a felületi aktivitás $\sim 40\%$ -át (tömegben 90% -át) és két nagy energiájú fotonjával pedig a dózisteljesítmény $\sim 60\%$ -át. A hasadási termékek egészségre legveszélyesebbike a fűtőelemek borításának meghibásodása folytán könnyen kiszabaduló ^{131}I .

¹ A * és ** jelölésű nuklidok mind korróziós, mind hasadási terméként keletkezhetnek.

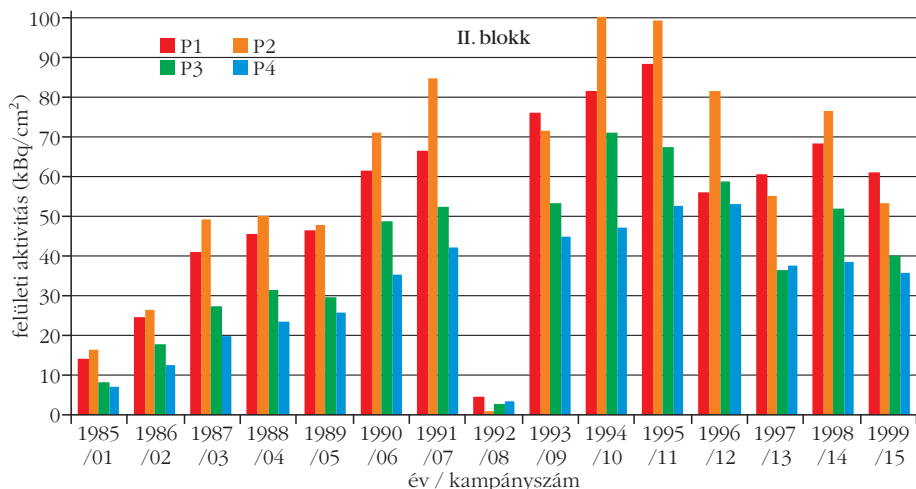
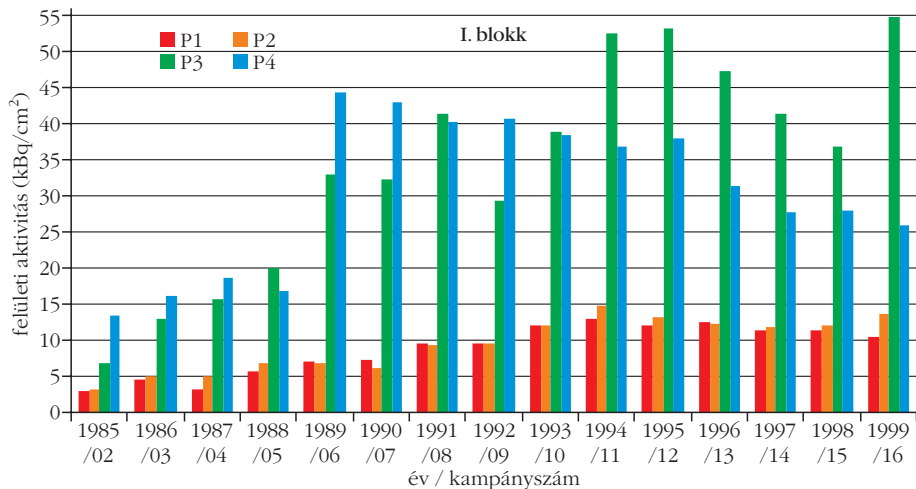
A reaktorok primer körében lévő anyagmennyiségek, a hatalmas neutron-sűrűség és az éves besugárzási idő teszi érthetővé a másodlagos folyamatok nem elhanyagolható szerepét. Ennek ellenére a ${}^7\text{Be}$ 477 keV-es gamma-vonalának észlelése megrázó élmény a magfizikus számára, hiszen a ${}^7\text{Li}(p,n)$, a ${}^6\text{Li}(p,\gamma)$ és a ${}^{10}\text{B}(p,\alpha)$ proton-indukált reakciók hozzájárulnak jelentős aktivitással! Vagyis, a lassító közegben az (n,p) szórás első ütközésekor keletkező nagy energiájú protonok fluxusa egészen elfogadható teljesítményű töltőtárcsacskegyorsítót utánoz.

Hideg-meleg ági aszimmetriák

A 2. ábrán jelölt pontok egyik értelmezése a hőhordozó csökkenő hőmérséklete szerint:



5. ábra. A hurkok pontjaira összegzett felületi aktivitások hideg ág – meleg ág viszonyának időfűgése az I. és II. blokk kampányaiban.



A hőmérséklet az oldékonyt befolyásolhatja a felületek anyaga és állapota szerint. Az 5. diagram a ${}^{60}\text{Co}$ aktivitását ábrázolja az idő (kampányszám) függvényében úgy, hogy egy évben a hurkokra összegzett pontbeli értékek vannak feltüntetve két blokkra. Egyértelműen látszik a hideg-meleg ági aszimmetria, de a két egységre nézve éppen fordított irányban. Az I. blokk (és a III., IV.) esetén a hideg ágban sokkal nagyobb a felületi szennyezettség, mint a melegben („normális” viselkedés), a II. bloknál viszont éppen fordítva („inverzió”: az aszimmetria aszimmetriája). E markáns eltérést vegyész barátainkkal kezdetben – más jelenségekkel együtt – azzal magyaráztuk, hogy a II. blokk amúgy is „különc” az acél összetétele és/vagy a felületek passzválása szempontjából. Egy évtized alatt a különbség kezdett eltűnni, majd átfordult a korábban normálisnak mondott „hideg > meleg” viszonyba. Már majdnem sikerült megindokolnunk ezt is, amikor az I., majd a III. és IV. blokk kezdett inverziósan viselkedni. Van olyan év, amikor a két ág felületi aktivitása valamelyiknél majdnem egyenlő. Mivel – sokkal fontosabb szempontok miatt – a vízkémia ugyanúgy van beállítva mindegyik egységnél, és üzemviteli rendellenességek nem merülnek fel, így „ártatlan” felületi jelenségre gondolhatunk, amelynek okai egyelőre ismeretlenek.

Részáramú egységek okozta aszimmetria

A 6. ábra mind a 24 (6×4) mérési pont ${}^{60}\text{Co}$ -aktivitását különálló oszloppal mutatja a IV. blokk kampányaira. A „hideg ág / meleg ág > 1” (nagy értékek!) mindig teljesül, de ezen belül a 3. és 4. pontok felületi aktivitásának aránya eltérően alakul. A következő rendszeresség vehető észre:

a) a 3. pont aktivitása szignifikánsan *kisebb*, mint a 4. ponté az 1., 2. és 6. hurokban;

b) a 3. pont aktivitása szignifikánsan *nagyobb* a 4. pontbelinél a 3., 4. és 5. hurokban.

A magyarázatot a 2. ábra adhatja: a részáramú berendezések részére a fővízkörből a főkeringtető szivattyú után, a 4. pont (főelzáró tolózár) előtti elágazásból történik a vízkivétel, míg a visszatáplálást a szivattyú előtt, a 3. pontnál végzik. Az a) esetben az anion- és kationcserélő oszlopok és a bór-adagoló, a b)-nél pedig a kevertágyas ioncserélő és a pótvíz hatásainak eltéréseit feltételez-

hetjük. Mindenesetre, 5-10 éves állandósággal ugyanaz a kép látszik, tehát nem a leállások során végzett mérések alatti állapot tükröződik a fenti szisztematikában, hanem a felületen valahogyan kialakult rétegek stabilitása.

A $^{58}\text{Co}/^{60}\text{Co}$ aktivitásarány, azaz a Ni/Co korrózió viszonya a 6. eloszláshoz hasonló aszimmetriát mutat.

Üzemzavarok észlelése, előrejelzése

A működés alatti hibákra – az in-situ módszer sajátosságai miatt – csak a leállás után lehet következtetni. A méréseket hosszabb időn át végezve viszont lehetőség van hibakeresésre és a következő kampány végén a beavatkozásra.

A *pótvíz oxigénmentesítése* hibájának a ^{59}Fe aktivitására gyakorolt hatását mutatja a 7. ábra. A *Részáramú egységek okozta aszimmetria* alfejezetben tárgyaltakhoz hasonló elemzéssel a 3., 4., 5. hurkok 4. pontjai kiugró aktivitásának okát a részáramú pótvízrendszer és a kevertágyas ioncserélő működésében kell keresnünk. Mivel az 1., 2., 6. hurkok másik részáramú berendezéshez tartozó pontjai nincsenek érintve, így a vízben oldott oxigén – elégtelen szűrés miatti – korróziónövelő hatása („extra korrózió”) feltételezhető.

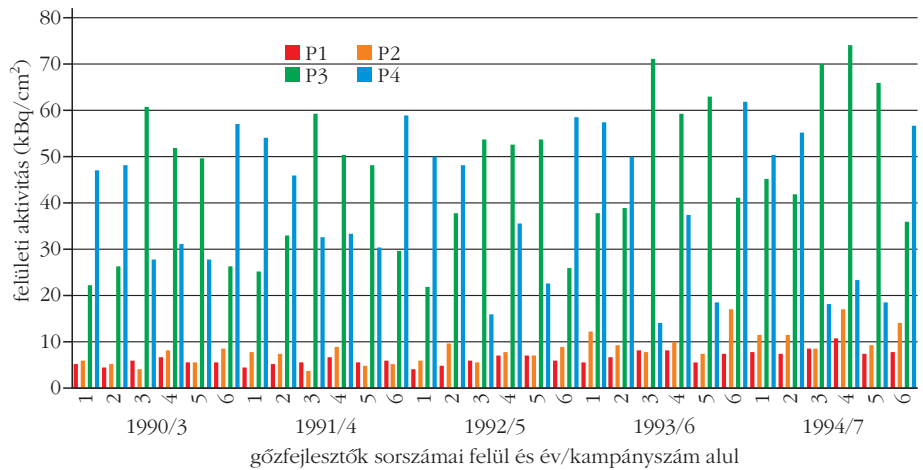
Évek múlva, az egyik főjavításnál, a főkeringtető szivattyúk megbontásával elérhetővé vált a 4. pontok környezete és a hurkok belső falán a feltételezés vizuálisan megerősítést nyert.

A *primer körbe került idegen anyag* ^{59}Fe – ^{54}Mn és a nikkelt jellemző ^{58}Co aránya nem egyezett a korábbiakkal, amiből a II. blokk üzemzavarának módjára lehetett következtetni.

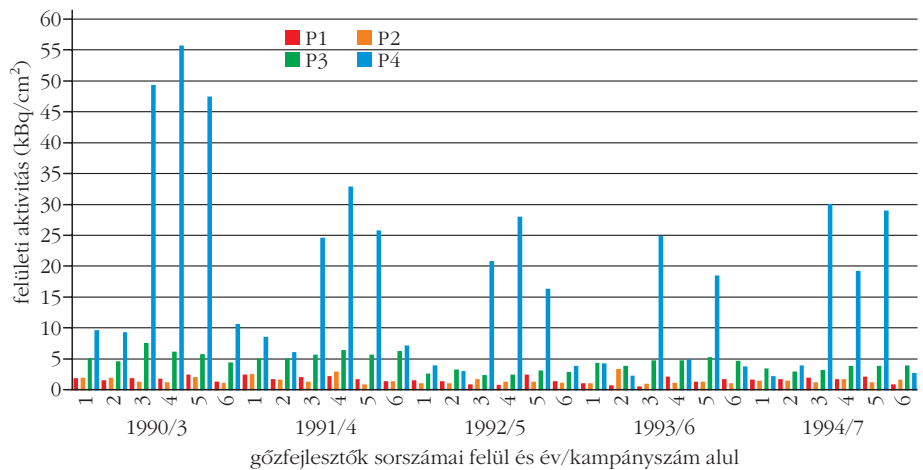
A 2003. évi súlyos üzemzavarhoz vezető, *nem megfelelő dekontaminálás miatti nagyléptékű korróziót* az I. blokk 2002. évi leállításánál az in-situ gamma-spektrometria kimutatta. Az ismert történet szerint [2] a fűtőelemek felülete annyira elszennyeződött, hogy az újraindított reaktort 3 hónap után le kellett állítani és töltetcserét kellett végrehajtani.

Pótvízrendszerbeli korróziótermékek analízise

2012/2013-ban, illetve 2015/2016-ban az I. és IV. blokk pótvízrendszerén végeztünk méréseket. A leg-



6. ábra. A ^{60}Co felületi aktivitása a IV. blokk primer körüli P1–P4 pontjaiban.



7. ábra. A IV. blokk primer körüli P1–P4 pontjaiban a ^{59}Fe nuklid mért felületi aktivitásai.

nagyobb felületi aktivitást az ^{110m}Ag izotóp adta 50–200 kBq/cm² értékben a csőhálózat mérési helyétől függően. A mérési sorozat értelme az ezüst nagy aktivitása okának kiderítése volt. A hurkokon korábban nem észlelt izotópok is megjelentek: ^{24}Na , ^7Be .

Különleges feladatok

Az in-situ gamma-spektrometriát a francia, német, angol erőművekben a 70-es, 80-as években kezdték alkalmazni. Hazai felhasználásra – a paksi kollégák javaslatára – ezek alapján dolgoztuk ki és alkalmazzuk ma is a Debreceni Egyetem szervezésében. Később igény mutatkozott külföldi mérésekre, gyors reagálású beavatkozásokra. Ezekhez szükség volt egy rugalmasabb szervezeti formát létrehozni. A mai Quantechнологies Kutatási és Fejlesztési kft. az Egyetemmel szerződéses viszonyban létrehozta a Nukleáris Biztonsági és Technikai Laboratóriumot a speciális igényű feladatok megoldására: külföldi mérések, itthoni különleges fejlesztések, adatfeldolgozás, komplex munkák.

Az *ittthoni rutintechnikát Németországban alkalmaztuk* meghívás alapján a 90-es évek közepén, há-

rom kampányt követő mérésre az azóta leállított, 1225 MWe teljesítményű Biblis-A erőműben. A Paksi Atomerőművel összehasonlítva jó érzéssel mondhatjuk, hogy az atomenergetikai kultúra, a nukleáris biztonság tekintetében nincs különbség a két ország között. A primer körüli felületi aktivitások, dózisteljesítmény a paksihoz viszonyítva – az eltérő anyagösszetétel miatt – 3–4-szeres volt.

A paksi 2003. évi súlyos üzemzavar elbárításában alapvető feladatunk a fűtőelemek dehermetizációjának következtében kiszabadult hasadási termékek megkeresése, felületi aktivitásának meghatározása, az 1. akna falának vizsgálata, a dekontaminálás előkészítése és detektoros ellenőrzése volt. Ehhez a nagy hatásfokú „clover” spektrométert is igénybe vettük, amely négy darab 100 cm³-es HpGe-detektort tartalmazott. Bevezettük a – maga nemében – nagy térfogatú (2,25 cm³) CdZnTe (CZT) gamma-spektrométer alkalmazását.

Legnagyobb fejlesztésünk a víz alatti gamma-spektrometria volt a 10 és 100 cm³-es detektorokhoz, valamint a CZT-hez. A transzuránok alfa-spektrometriai vizsgálatára olyan módszert hoztunk létre, amely vákuumkamra nélküli in-situ vizsgálatokat tett lehetővé.

A két kiépítés nagyaktivitású bulladékokat tartalmazó kútjainak feltárására olyan technikát fejlesztettünk, amellyel meg lehetett állapítani a 8 m mély csövekben tárolt radioaktív anyagok összetételét és aktivitását, őket dózisteljesítmény szerint szét lehetett válogatni.

A FIZIKA TANÍTÁSA

NEHÉZSÉGI GYORSULÁS ÉRTÉKÉNEK MEGHATÁROZÁSA, NAPELEMCELLA VIZSGÁLATA

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat és a National Instruments (NI Hungary Kft.) által kiírt pályázaton az NI myDAQ mérőeszköz és a hozzá tartozó LabVIEW szoftver segítségével kellett olyan fizikai kísérleteket megvalósítani, amelyek az iskolai oktatásban is felhasználhatók. Mi nem rendelkezünk ilyen eszközzel, de a pályázatra való jelentkezés után iskolánk kölcsönszerződéssel kapott egyet a hozzá tartozó szenzorkészlettel és szoftverrel. Pályamunkánkban három olyan kísérletet dolgoztunk ki, amelyek a fizika érettségi vizsgán is szerepelnek.

A pályázatra két tanulóból és egy fizikatanárból álló három fős csapattal lehetett nevezni. Csapatom

Összefoglalás, kitekintés

Az atomerőművek primer körében keletkező korróziótermékek felületi aktivitását 33(!) éve rutinszerűen mérjük Pakson. Különböző feladatok rugalmas kezelése csak folyamatos kutatás-fejlesztés-innováció révén vált lehetővé. Méréseinkkel a világon egyedülálló adathalmaz keletkezett, amely részletes feldolgozás esetén lehetővé teszi a primer körüli felületek tulajdonságainak rövid és hosszú távú előrejelzését, az üzemidő-hosszabbítás megalapozását és ellenőrzését. A kísérleti technika és kiértékelési eljárások segíthetik a tervezett Paks2 blokkok működtetését, növelhetik biztonságát. Előzetes terveket készítettünk a felkészülésre, amelyek a jövő szakembereinek képzését is tartalmazzák.

Köszönetnyilvánítás

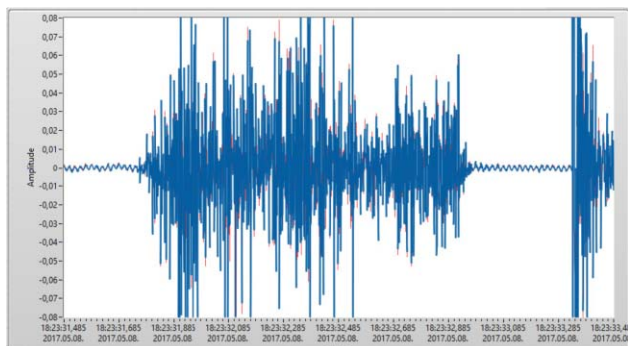
A fenti kutatások és eredményeik nem jöhettek volna létre a Paksi Atomerőmű több évtizedes sokoldalú segítségével, a Vegyészeti Osztály és a kapcsolódó szervezetek munkatársainak a biztonság érdekében folytatott tevékenységére, a feladatok megoldásához igényelt állandó közös gondolkodás kölcsönös igénye nélkül.

Irodalom

1. Csom Gy.: *Atomerőművek üzemtana, I. kötet: A reaktorfizika és technika alapjai*. Műegyetemi Kiadó, Budapest (1997).
2. Szatmáry Z.: Súlyos üzemzavar a Paksi Atomerőműben. *Fizikai Szemle* 53/8 (2003) 266–271.
3. Csom Gy. (szerk.): *Atomerőművek üzemtana II.: Az energetikai atomreaktorok üzemtana*. Műegyetemi Kiadó, Budapest (2005).
4. V. V. Geraszimov, A. J. Kaszparovics, O. J. Martinova: *Atomerőművek vízüzeme*. Műszaki Kiadó, Budapest (1981).
5. www.atomeromu.hu/hu/rolunk/Technika/HogyMukodik/Lapok/default.aspx

Kántor Balázs, Kelkó Balázs, Lányi Zsófia
Komáromi Jókai Mór Gimnázium

diákjai már három éve indulnak az NI által szervezett VISUAL Thinking LabVIEW programozási versenyen, és ennek során kerültek kapcsolatba a myDAQ mérőeszközzel. Erre a pályázatra is a diákok beszéltek rá, mert a versenyhez való felkészüléshez jól jött, hogy előben is használhattuk az eszközt. Ezen kívül szeretnénk volna kipróbálni, hogy az iskolában fizikaórákon vagy szakkörön, miként vehetjük hasznát egy ilyen mérőműszernek. Pályázatunkkal 2. díjat nyertünk, ami azt jelenti, hogy a pénzjutalom mellett tárgyjutalomként megtarthatjuk a myDAQ mérőeszközt. A díjátadóra Debrecenben, a Science on Stage fesztiválon került sor, ahol a fesz-



1. ábra. A Waveform Chart segítségével kirajzolt grafikonon megmutatja, hogy a golyó mikor gurul, esik és koppan a földre. Viszont a nyers adatokat a program még nem tudja értelmezni.

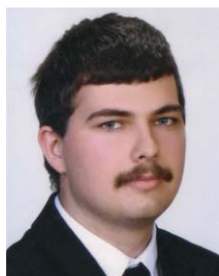
tivál nyílt napján a National Instruments SportTech programjának keretében bemutatót tartottunk az érdeklődők számára.

1. kísérlet: nehézségi gyorsulás értékének meghatározása hangfelvétel segítségével

Az emelt szintű érettségi vizsgán szereplő kísérletet valósítottuk meg a myDAQ segítségével. A kísérletben egy állványon rögzített csempelapon kell egy golyót elgurítani. A golyó a gurulás során hangot ad, majd esés közben a hang megszűnik, végül a golyó a földre



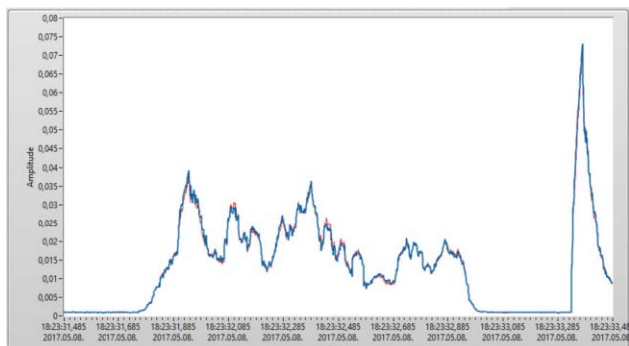
Kántor Balázs ebben a tanévben végez a Komáromi Jókai Mór Gimnáziumban, a B-iThunterz csapat alapító tagja. Programozással először a VISUAL Thinking verseny kapcsán kezdett el komolyabban foglalkozni. Mechatronikai mérnök szakon szeretne továbbtanulni.



Kelkó Balázs a 2016/2017-es tanévben végzett a Komáromi Jókai Mór Gimnáziumban, jelenleg a BME mérnök-informatikus hallgatója. 2014-ben alapító tagja volt a gimnázium B-iThunterz csapatának, amely az alapításától kezdve minden évben résztvevője az NI VISUAL Thinking versenynek. Ez a csapat alkotta a jelenlegi pályázat keretét is.



Lányi Zsófia 2005 óta dolgozik a Komáromi Jókai Mór Gimnáziumban, ahol matematikát, fizikát és informatikát tanít. A pályázat miatt ismerkedett meg a myDAQ eszközzel, amivel az iskolában jelenleg sakkkört keretek között foglalkoznak.



2. ábra. A mért adatok abszolút értékével és a Filter alkalmazásával már a program is jól elkülönítheti az egyes mozgási szakaszokat.

érkezéskor hangosan koppan. Az esés idejét egy hangrögzítő szoftver segítségével kell meghatározni, majd a csempe magasságának felhasználásával kiszámítjuk a nehézségi gyorsulás értékét.

Választásunk azért esett erre a kísérletre, mert elővégzéséhez csak a myDAQ eszközre és a hozzá kapott mikrofonra van szükség.

A kísérletben a kerámialapot különböző magasságokba helyezve hangfelvételt kell készíteni. A gurulás és a koppanás közötti csendes szakasz mérésével meghatározhatjuk a golyó esésének idejét, majd ebből kell kiszámítani a nehézségi gyorsulás értékét.

A golyó esésére felírhatjuk a

$$s = \frac{g}{2} t^2$$

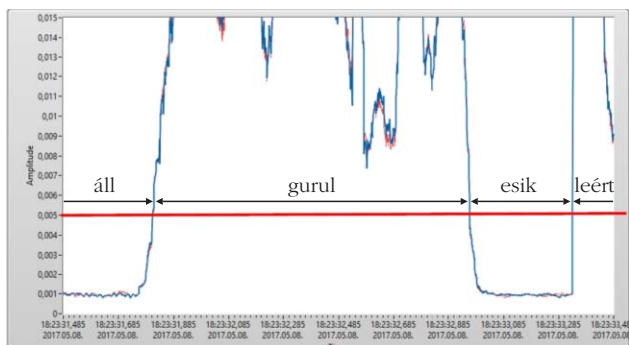
négyzetes úttörvényt, ahol s a t ideig tartó esés magassága. Majd ebből kiszámíthatjuk a g nehézségi gyorsulást:

$$g = \frac{2s}{t^2}$$

Ehhez a kísérlethez egy olyan programot akartunk írni, amelynek bemenő adata csak az esés magassága. A program pedig a hangfelvétel, azaz a golyó leérkezése után meghatározza a golyó esésének idejét, kiszámítja g értékét és a mérés relatív hibáját.

Először kipróbáltuk, hogy mit tud az eszköz. A mikrofont csatlakoztattuk a myDAQ audióbemenetére, és

3. ábra. A jól megválasztott küszöbérték (0,005) élesen elkülöníti az egyes mozgásokat.



készítettünk egy felvételt. A Waveform Chart segítségével az 1. ábrán látható grafikont kaptuk. A grafikonról szépen leolvasható, hogy a golyó mikor melyik mozgási szakaszban van, de ezekből az adatokból nehéz lett volna megírni a programot.

A mért adatok abszolút értékét vettük, és Filtert alkalmaztunk. A szűréssel megszűntek a nagy „ugrások”, és a golyó mozgásának különböző fázisai jól azonosíthatók lettek, ezt a mutatja a 2. ábra.

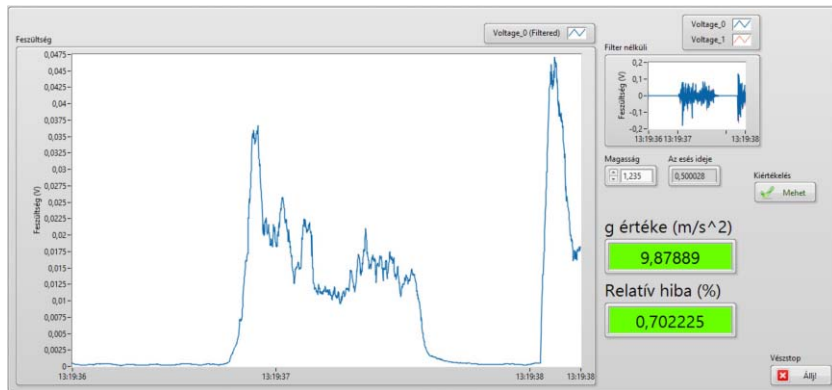
Programunk lényege az volt, hogy a golyó mozgását 4 szakaszra bontottuk, ezek közül a gurulás előtti állapot és az esés csendes, míg a csempén guruló, illetve földet érve koppanó golyó hangot ad. E szakaszok a mérés folyamán egy jól megválasztott küszöbérték (0,005) átlépésekor váltanak át a másikba (3. ábra). A mérés indulásakor a golyó álló helyzetben van, majd a küszöbérték átlépésével a program észleli, hogy elkezdődött a gurulás (a gurulás hangja mindvégig a küszöb fölött tartja a mérést). A guruló hang megszűnésének – és így a csendes esés kezdetének – időpontját és a koppanás időpontját kell megjegyezni, e két időpont különbsége adja a golyó leesésének idejét.

Miután a program már megbízhatóan működött, olyan változatot készítettünk belőle, amelyet tanórai használatra terveztünk. A látványosabb megjelenítés mellett ebben a változatban egy „Kiértékelés” gomb található. A program elvégzi a mérést és kiírja az esés idejét, de nem mutatja meg g értékét és hibáját, hanem azt órai számolási feladatként a diákok határozzák meg. Ezután e gomb megnyomásával a képernyőn is láthatóvá válik a helyes eredmény (4. ábra).

2. kísérlet: nehézségi gyorsulás értékének meghatározása fonálingával

A második kísérlethez az első kidolgozása közben kaptunk kedvet. Először csak arra voltunk kíváncsiak, hogy mennyire pontosan tudunk lengésidejt mérni a myDAQ-kal (az eredmény minket is meglepett).

5. ábra. Mérésösszeállítás a nehézségi gyorsulás fonálingával való meghatározásához.



4. ábra. A nehézségi gyorsulást mérő program fizikaórai változata.

A kísérlet fizikai háttere: a fonálinga lengésidejéről tudjuk, hogy (kis kitérések esetén) egyenesen arányos a fonál hosszának négyzetgyökével és fordítottan arányos a nehézségi gyorsulás négyzetgyökével. Képlettel felírva:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}},$$

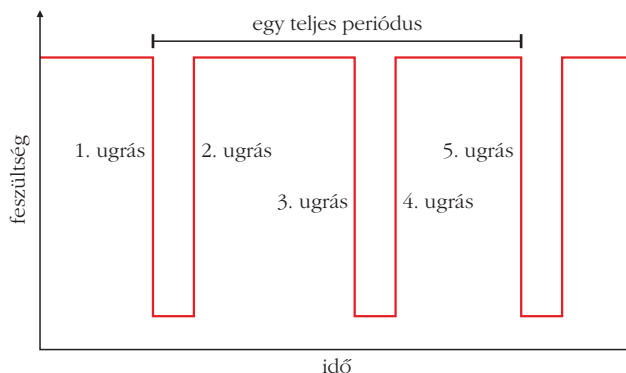
ahol T a lengésidejő, l a fonál hossza és g a nehézségi gyorsulás. T -t megmérve és l -t ismerve meghatározhatjuk g értékét:

$$g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}.$$

Az inga lengését a szenzorkészletben kapott Photo Interrupter segítségével vizsgáltuk.

Az inga aljára egy pálcikát (fogpiszkálót) ragasztottunk, amelyet olyan magasságba kell állítani, hogy lengés közben áthaladjon az optokapu érzékelője előtt (5. ábra). Amikor a pálcika a lengés során a kapu szarai közé érkezik, illetve amikor a takarás megszűnik, az optokapun mért feszültség értéke hirtelen megváltozik. Fontos, hogy csak e változásokat figyeljük, vagyis azokat az eseteket, amikor az aktuális és az előzőleg mért érték különbségének abszolút értéke 3 V-nál nagyobb értéket vesz fel. Az ilyen hirtelen feszültségugrások nyilvántartását egy számlálóval oldottuk meg, amelynek a kezdőértéke 0, majd

6. ábra. Az optokapun mérhető feszültség és az inga periódusideje közti kapcsolat.



minden ugrásnál 1-gyel nő. Egy teljes lengés idejét akartuk megmérni, az 5. hirtelen változás jelenti teljes periódus leteltét (6. ábra).

A program ekkor meghatározza a lengésidőt, majd kiszámítja a nehézségi gyorsulás értékét. A számláló nullázódik, és a program minden periódus letelte után kiszámítja a friss g értéket (7. ábra).

3. kísérlet: napelemcella vizsgálata

A harmadik kísérletben azt szeretnénk volna kipróbálni, hogy miként használható a myDAQ egy olyan elektromosságtani mérés során, amelyben folyamatosan változó értékeket kell kezelni.

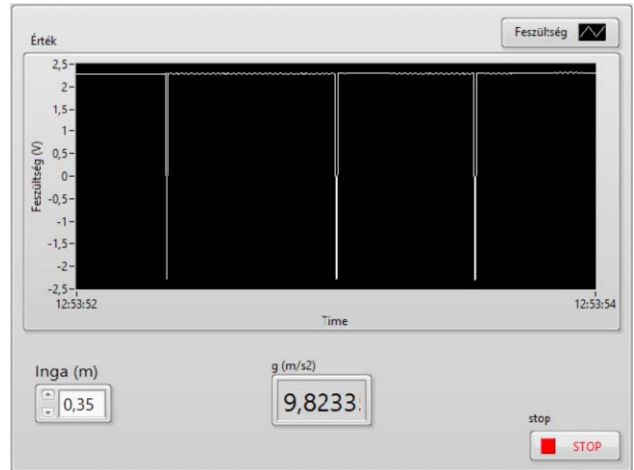
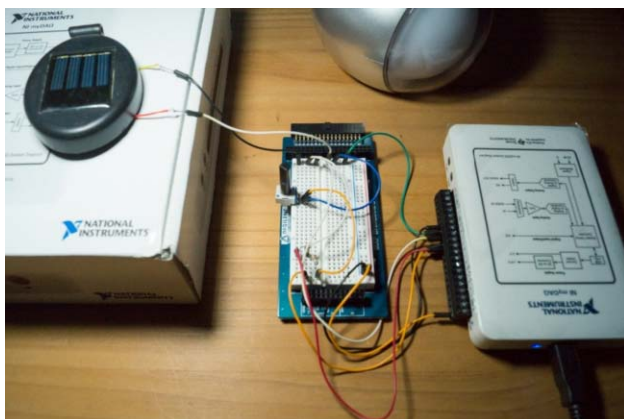
Ez a feladat is az emelt szintű érettségi vizsga kísérletei között szerepel. Egy változtatható ellenállás használva különböző ellenállásértékek mellett meg kell mérni a napelemcella feszültségét, valamint az áramkörben folyó áram erősségét. Grafikonon kell ábrázolni a feszültség-áramerősség karakterisztikát, majd a feszültség és az áramerősség összeszorozásával meg kell határozni a napelemcella teljesítményét. A teljesítményt az áramerősség függvényében kell ábrázolni, és le kell olvasni a maximális értékét.

Olyan programot szeretnénk volna írni, amely a változtatható ellenállás tekerése közben folyamatosan méri az áramerősséget és a feszültséget, kirajzolja a szükséges grafikonokat, és meghatározza a teljesítmény maximális értékét.

Eredeti elképzelésünk szerint a potenciométert egy szervomotorral tekertük volna, de ennek kidolgozása sajnos nem fért a szoros határidőbe, ezért a kézi forgatásnál maradtunk (8. ábra). Az áramerősség- és feszültségértékeket a program egy while ciklusban méri meg, amelyben egy késleltetést is alkalmaztunk. A kapott áramerősség-értékeket a grafikonokon milli-ampérben jelenítettük meg, a feszültséggel való szorzás után a teljesítményt milliwattban kaptuk.

Az első grafikonon a feszültség-áramerősség karakterisztikát ábráztoltuk, a másodikon pedig a teljesítményt jelenítettük meg az áramerősség függvényében, és megkerestük a teljesítményértékek maximumát (9. ábra).

8. ábra. Mérési összeállítás a napelemcella vizsgálatához.



7. ábra. Nehézségi gyorsulás meghatározása fonálingával.

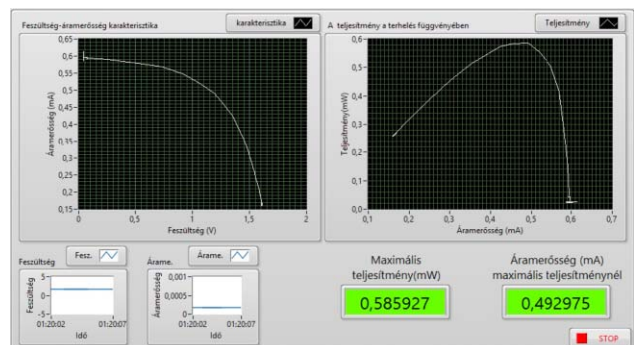
Összegzés

A pályamunka elkészítése során sokat kísérleteztünk a mérőeszköz és a szenzorok beállításával és a programok megírásával. Nagyon jó élmény volt a diákokkal csapatként dolgozni, egymást segíteni, ötleteinket megbeszélni.

A LabVIEW programban az tetszik a legjobban, hogy segítségével a diákok nagyon gyorsan elsajátítják a programírás alapjait, mert a kódok látványosan felépíthetők és könnyen változtathatók. Egy-egy programrészt kiemelhetünk subVI-okba, így elkerülve a túl sok vezeték, és ezzel elősegítve az egyszerűbb tájékozódást. A kódot megjegyzésekkel, illetve dokumentációval bővíthetjük, ezzel segítve a nyomkövetést. A vezetékeken „utazó” adattípusokat könnyű megkülönböztetni eltérő színük és méretük miatt.

A következő tanévben tervezzük, hogy szakköri keretek között foglalkozunk a LabVIEW programozással, itt tudnánk felkészülni a versenyekre, és egy ilyen szakkör nagy segítséget nyújtana a fizikából érettségiző diákoknak is. A továbbiakban szervomotor alkalmazásával szeretnénk tökéletesíteni a napelemcella vizsgálatát, és új kísérleteket szeretnénk megvalósítani a myDAQ segítségével.

9. ábra. A napelemcella feszültség-áramerősség karakterisztikája (balra) és teljesítménye az áramerősség – azaz a terhelés – függvényében (jobbra). A program megadja a maximális teljesítményt és a hozzá tartozó áramerősséget is.



75 ÉVE LETT KRITIKUS A CHICAGÓI REAKTOR, 115 ÉVE SZÜLETETT WIGNER JENŐ

Horváth András – BME Nukleáris Technikai Intézet
Radnóti Katalin – ELTE TTK Fizikai Intézet

Írásunkban a láncreakció felfedezését írjuk le eredeti dokumentumokra támaszkodva, majd bemutatjuk a 75 éve Chicagóban megépített első atomreaktor történetét. Az évforduló egyben lehetőséget ad arra is, hogy megemlékezzünk az idén 115 éve született Wigner Jenőről.

A láncreakció lehetősége

James Chadwick (1891–1974) 1932-ben fedezte fel a neutront. Szilárd Leó (1898–1964) abban az időben emigránsként már Angliában tartózkodott.

A londoni Imperial Hotel halljában a kezébe került a *The Times* 1933. szeptember 12-i száma, amely Lord Rutherford (1871–1937) egy, a Brit Tudományos Szövetségben tartott előadásáról is beszámolt. A szalagcím *Az atommag feltörése* volt, és az újság idézte is Rutherford szavait: „...mindenki, aki az atomenergia ipari léptékű felszabadításáról beszél, az holdkóros.”

Szilárd így emlékezett vissza a történetekre: „Ez a kategorikus kijelentés elgondolkodtatott, miközben London utcáit jártam. Emlékszem, hogy a Southampton sorhoz érve megállított egy piros közlekedési lámpa. Várnom kellett, hogy az úttesten átmehessek. Abban a

Készült a *Nukleon* című internetes folyóiratban korábban megjelent írás [7] alapján. A folyóirat engedélyével közöljük.



Horváth András a fizika alapszakot fizikus szakirányon az ELTE-n, a fizikus mesterszakot nukleáris technika szakirányon a BME-n végezte. A BME Nukleáris Technikai Intézetében dolgozik. Kutatási tevékenysége a reaktorfizika, mind a reaktorfizikai számítások, mind a kísérleti megvalósítások terén. Tantermi és laboratóriumi gyakorlatot tart a témával kapcsolatban. 2011 óta társ-szervezője az MNT Nukleáris Szaktáborainak, 2012 januárja óta pedig a *Nukleon* folyóirat technikai szerkesztője.



Radnóti Katalin az ELTE-n végzett kémiafizika szakos tanárként. A budapesti Kölcsey Ferenc Gimnáziumban nyolc éven keresztül tanított. Jelenleg az ELTE Fizikai Intézetében főiskolai tanár. Kutatási területe a fizika és a természettudományok tanításának módszertana. Publikációs tevékenysége is e témához kapcsolódik, tanári segédletek, tanulmányok, könyvek, könyvfejezetek. A *Nukleon*, a Magyar Nukleáris Társaság internetes folyóirata főszerkesztője.

pillanatban, amikor a lámpa zöldre váltott, hirtelen eszembe ötlött: ha találunk egy elemet, amelyet a neutron szétver, és eközben két neutron keletkezik, ilyen elemből elegendő mennyiséget összegyűjtve önmagát fenntartó láncreakció jöhetne létre.” [1, 109. o.]

Röviden ez a következőképpen írható:



Ezzel megszületett a *nukleáris láncreakció* alap gondolata. A láncreakció kifejezést Szilárd egyes kémiai folyamatokra alkalmazott szakkifejezésből kölcsönözte. („A történetben minden bizonyítással akadnak legendás elemek, hiszen sokak szerint Szilárd Leót a piros közlekedési lámpák nem voltak képesek megállítani.” [1])

Szilárd ezzel az ötletével felkereste Ernest Rutherfordot. Válasz helyett a teljesen felingerelt lord kidobta az irodájából. Napok múlva is csak azt hajtogatta, hogy ez az ötlet mekkora badarság.

Ezek után Szilárd meglátogatott néhány fizikust, hogy pénzt szerezzen a kísérletek megkezdéséhez olyan elem felkutatására, amely a neutronokat képes megkettőzni. Megkeresett több cégvezetőt is, köztük a General Electric vezetőjét és Polányi Mihály közvetítésével a budapesti Tungstram gyár igazgatóját, Aschner Lipótot is, de egyik esetben sem járt sikerrel. A sikertelenség egyik oka az lehetett, hogy Szilárd a tárgyalópartnereknek nem mondott el mindent, ugyanis attól tartott, hogy ha a nukleáris láncreakció lehetősége, és annak pusztításra való alkalmazhatósága nyilvánosságot kap, akkor az rossz kezekbe kerülhet.

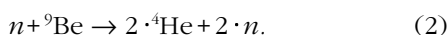
Rutherford lesújtó véleménye az atomenergia hasznosításáról.

<p>HOPE OF TRANSFORMING ANY ATOM</p> <p>What, Lord Rutherford asked in conclusion, were the prospects 20 or 30 years ahead?</p> <p>High voltages of the order of millions of volts would probably be unnecessary as a means of accelerating the bombarding particles. Transformations might be effected with 30,000 or 70,000 volts. Two methods of attack would be open: one by intensive streams of particles of relatively low voltages, the other by the use of higher voltages up to 5,000,000 volts, which ought to be sufficient to break down any atom on this earth, and he believed that we should be able to transform all the elements ultimately.</p> <p>We might in these processes obtain very much more energy than the proton supplied, but on the average we could not expect to obtain energy in this way. It was a very poor and inefficient way of producing energy, and anyone who looked for a source of power in the transformation of the atoms was talking moonshine. But the subject was scientifically interesting because it gave insight into the atoms.</p>	<p>RUTHERFORD COOLS ATOM ENERGY HOPE</p> <p>Sees 'Moonshine' in the Talk at Present of Releasing Power in Matter.</p> <p>NUCLEUS OFFERS PROBLEM</p> <p>Conversion of Energy Into Matter Is Reported at the Leicester Meeting.</p> <p>By WALDEMAR KAEMPFER. Special Cable to THE NEW YORK TIMES. LEICESTER, England, Sept. 11.—It was "atom-smashing day" at the meeting of the British Association for the Advancement of Science today. Lord Rutherford, Nobel Prize winner, who showed that the old infinitesimal, supposedly inextric-</p>
---	---

A sok hiábavaló próbálkozás után 1934. március 12-én szabadalmat jelentett be a neutronokkal kiváltott láncreakcióra. A szabadalmi leírásban a neutronokat megduplázni képes elem lehetőségeként Szilárd a berilliumot, a brómot és az uránt javasolta. A Brit Admirális a szabadalmat 440 023 szám alatt megadta, és Szilárd kérésére titkosította.

Szilárd szabadalmához 1934. június 28-án 630 726 szám alatt, majd 1936-ban 814 236-os számmal is nyújtott be kiegészítéseket, illetve pontosításokat. Megemlítette, hogy az önfenntartó láncreakció csak egy *kritikus tömeg* felett lehetséges, ugyanis az adott térfogatban keletkező neutronok számának felül kell múlnia a felületen át elszökő neutronok számát, ami csak egy minimális méret felett lehetséges.

1934-ben Szilárd a berilliumot tekintette a legreményteljesebb elemnek a láncreakció létrehozásához. Tudta, hogy a ^8Be instabil, rögtön két ^4He magra esik szét. A berilliumból egy neutron elnyelése után két neutron szabadul ki a következő reakció szerint:



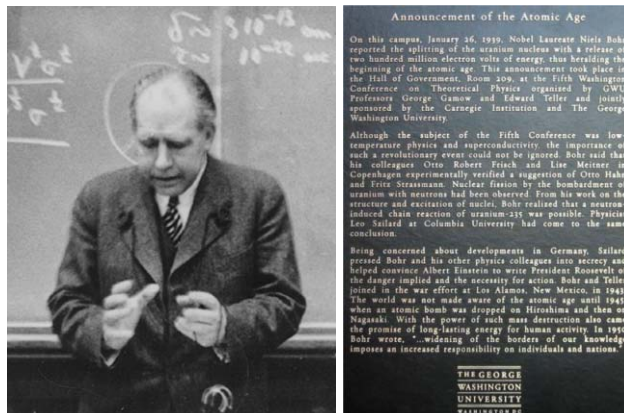
Akkor azonban már lehetett tudni, hogy ez a magreakció endoterm, tehát nem szabadíthat fel energiát. Ez azt is jelenti, hogy csak olyan neutronok tudják létrehozni, amelyek mozgási energiája egy küszöbértéknél nagyobb. Az, hogy a reakció endoterm azt is jelenti, hogy a reakció végtermékei összességében kisebb mozgási energiával rendelkeznek, mint a kezdeti állapot összes mozgási energiája. Ez az energia ráadásul meg is oszlik a végállapotban lévő négy atommag között, emiatt a keletkező neutronok mozgási energiája csak kisebb lehet, mint ami a reakció létrejöttéhez szükséges. Azaz, a reakcióból keletkező neutronok nem tudnak újabb ilyen reakciót létrehozni.

Szilárd néhányszor járt az Egyesült Államokban az 1930-as évek közepén és fontolóra vette, hogy elhagyja Európát, mivel a háború lehetősége egyre inkább körvonalazódott.

1938 szeptemberében a müncheni egyezmény idején egy előadásán vett részt az Egyesült Államokban, s látva Anglia politikai gyengeségét Németországgal szemben, eldöntötte: New Yorkba költözik. Amerikában elnyert egy pályázatot, hogy neutronduplázó magreakciókat keressen. Nem sikerült láncreakciót létrehoznia, így 1938. december 21-én a következő távirattal *visszavonta szabadalmát*: „Nem látszik szükségesnek, hogy szabadalmam érvényességét fönntartsák. Ezért szabadalmamat visszavonom. Szilárd Leó”

Amerika megismeri a maghasadást

A dán *Niels Bohr* (1885–1962) *Otto Frisch* (1904–1979) révén (aki nála dolgozott Koppenhágában) folyamatosan kapta a híreket a maghasadással kapcsolatos kísérletekről. Így arról is szinte első kézből értesült, amikor *Otto Habn* (1879–1968) és munkatársai Berlinben, 1938 végén felfedezték a maghasadást.



Bohr a maghasadást magyarázza, és az előadás emléktáblája: „Az atomkorszak bejelentése. 1939. január 26-án a Nobel-díjas Niels Bohr ezen a campuson számolt be az urán atommag hasításáról 200 millió elektronvolt energia kibocsátásával, ezzel beharangozta az atomkorszak kezdetét. Ez a bejelentés a Government Hallban történt, a 209. szobában, a George Washington University professzorai, George Gamow és Teller Ede által szervezett Ötödik Washingtoni Elméleti Fizikai Konferencián, melyet a Carnegie Intézet és a George Washington University együttesen támogatott.”

Bohr a Drottingholm gőzös fedélzetén 1939. január 7-én indult Amerikába és 16-án érkezett meg New Yorkba. Utazásának célja az volt, hogy néhány napig Princetonban tanítson és kísérletezzen, és később részt vegyen egy, az alacsony hőmérsékletek fizikájával foglalkozó elméleti fizikai konferencián Washingtonban. A konferenciát *George Gamow* (1904–1968) és *Teller Ede* (1908–2003) szervezte január 26. és 28. között.

A New York-i kikötőben *John Archibald Wheeler* (1911–2008) fogadta. Vámvizsgálatra várva Bohr elmondta neki, hogy az addig oszthatatlannak hitt atom kettéhasadt. Így Amerikában Wheeler értesült elsőként a maghasadás híreről. Később így jellemezte a kapott hír hatását: „Úgy éreztem magam, mint Ádám, aki felé az Úr kinyújtja ujját Michelangelo freskóján a Sixtus-kápolnában: az Úr átadta az üzenetet!”

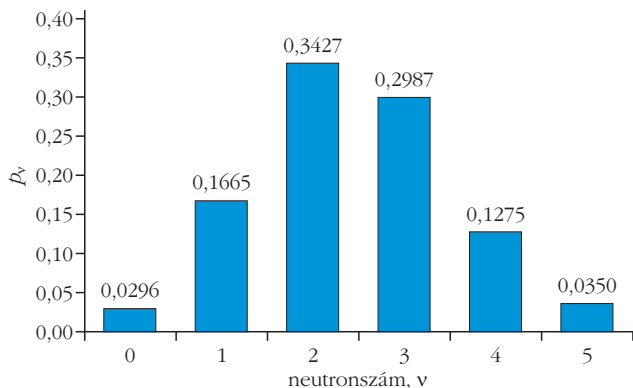
A washingtoni konferencia előzetes programját az elnöklő Gamow megváltoztatta, és Bohrnak adta meg a szót, ezzel a maghasadás került az érdeklődés középpontjába. A táblánál Bohr és *Enrico Fermi* (1901–1954) diszkutálták a jelenséget. Az előadás emlékét a George Washington Egyetem 209-es számú előadóterménél tábla őrzi.

A konferencia befejezésének napján több laboratórium hozzászólt a maghasadás kimutatásához és több újság címlapon számolt be az eseményekről.

A láncreakció megvalósítása

Amikor Szilárd Leó értesült a Bohr által Európából hozott hírekről, 1939. január 26-án a következő szöveggel táviratot küldött az Angol Admirális szabadalmi osztályára: „... kérem, tekintsek korábbi levelemet tárgyatlannak...”

Az Angol Admirális türelemmel és megértéssel kezelte Szilárd ellentmondásos lépéseit, és a 814 236 számú szabadalmát fenntartották.



Az ^{235}U hasadásában keletkező neutronok v számának valószínűségi eloszlásfüggvénye.

Ezek után Szilárd meglátogatta jó barátját, *Wigner Jenőt* (1902–1995), aki akkor épp kórházban feküdt. Wigner így emlékezett vissza a történetekre: „Hat hete kórházban feküdtem sárgasággal. Szilárd Leó eközben a lakásomban lakott. Majd minden nap meglátogatott a kórházban, hogy kedves magyar beszéddel felvidítson. Egyik nap az ágyamhoz lépett, és ezt mondta: Wigner, azt hiszem, hogy most meglesz a láncreakció. Arra gondolt, hogy a maghasadás lehetővé teszi a neutron-láncreakciót. Először ellentmondtam, de csakhamar beláttam, hogy igaza van.” [3, 122–123. o.]

Wigner Jenő 1902. november 17-én született Budapesten. 1925-ben vegyészmérnöki diplomát szerzett. Berlinben találkozott az atommagfizika másik magyar géniuszával, Szilárd Leóval, akihez azután egész életét végigkísérő, szoros barátság fűzte. Az 1963-as fizikai Nobel-díjat Wigner Jenő kapta – megosztva *Maria Goeppert Mayerrel* (1906–1972) és *Johannes Hans Daniel Jensennel* (1907–1973) – „az atommagok és az elemi részek elmélete terén, különösen pedig az alapvető szimmetriaelvek felfedezésével és alkalmazásával elért eredményeiért” indoklással.

A magfizika területén tett alapvető felfedezései a következők:

- A bariónszám megmaradása, miszerint a neutron átalakulhat protonná és viszont, de ezek nem eshetnek szét könnyebb részecskékre.

- A nukleonok közti rövid távú, erős kölcsönhatás az atommag belsejében, amely megmagyarázza, hogy miért nő meg jelentősen a kötési energia értéke, amikor a két részecskéből felépülő deutériumról a 4-es tömegszámú héliumra térünk át.

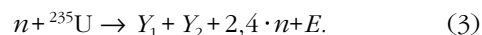
- A mágikus számok léte, amely azt jelenti, hogy bizonyos atommagok sokkal stabilabbak, mint a többi. Egyes proton-, illetve neutronszámok, mint 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 ki vannak tüntetve, az ezeket tartalmazó magok stabilabbak, gyakoribbak [2–4].

Nem sokkal később Bohr és Wheeler közölték tanulmányukat a maghasadás elméleti leírásáról. Wigner erre így emlékezett: „Amikor elolvastam, örömmel láttam, hogy az uránatommag stabilitása tekintetében Szilárd és én több tekintetben messzebb jártunk, mint Bohr és Wheeler. Szilárd helyesen jóslta, hogy a maghasadás során neutronoknak is ki kell lépniük,

amiben Bohr és Wheeler kételkedett. Ők nem hitték, hogy nukleáris láncreakció megvalósítható, vagy ha esetleg mégis, akkor csakis igen alacsony hőmérsékleten.” [3, 124–125. o.]

1939. március 3-án Szilárd Leó Wigner Jenővel és *Walter Henry Zinn* (1906–2000) kanadai fizikussal New Yorkban a Columbia Egyetemen egy rádium-bezillium neutronforrásból származó neutronokat paraffinban lelassítottak.

A lassú neutronokkal uránt bombáztak, így bőven tudtak maghasadást előidézni. Az urán megszaportotta a neutronokat, hasadásonként legalább két neutron keletkezését figyelték meg:



A sikeres kísérletek után, március 9-én Szilárd felhívta Tellert, és a következőt mondta: „...megtaláltam a neutronokat!”

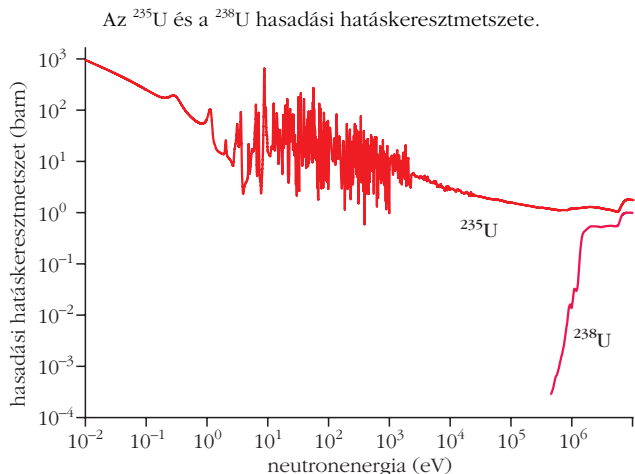
Szilárd éberségi okokból magyarul beszélt, mivel meg volt győződve róla, hogy lehallgatják.

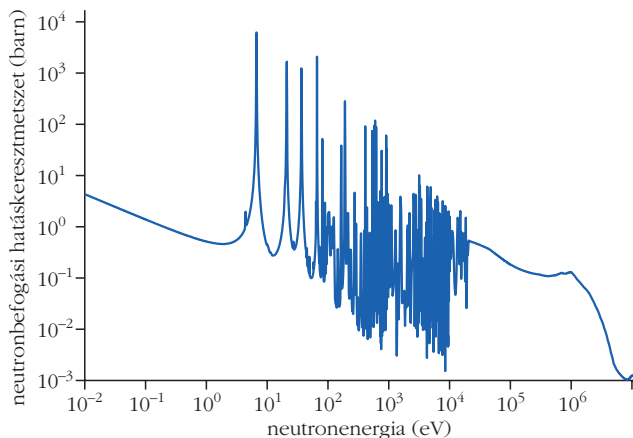
A (3) egyenletből látható, hogy az ^{235}U hasadásában nem pontosan két darab neutron keletkezik, hanem átlagosan 2,4. A hasadásban keletkező neutronok v száma 0 és 5 között változhat (ez az adat 1955-ig titkos volt!).

Ellenőrzésként Fermi és *Carl David Anderson* (1905–1991) ugyancsak vizsgálni kezdték az urán hasadását, de ők nem észleltek nagyszámú neutronkibocsátását. Ekkor Szilárd javaslatára ők is paraffinnal lassították a neutronokat, ettől megszaportak a maghasadások, megfigyelhetővé váltak a hasadásban keletkező gyors neutronok is. Ekkor már vitathatatlannak volt, hogy *lehetséges a láncreakció*.

A nukleáris reaktor ötlete

Bohr és Wheeler megállapították, hogy a természetes uránban a kis mennyiségben (0,71%) előforduló ^{235}U sokkal nagyobb valószínűséggel hasad, mint a 99,28%-ban található ^{238}U izotóp. A ^{238}U csak nagy energiájú neutronokra hasad, viszont a ^{235}U bármilyen





Az ^{238}U neutronbefogási hatáskeresztmetszetének rezonanciái.

energiájúakra. (Tanulmányuk 1939. szeptember 1-jén jelent meg, ezen a napon tört ki a II. világháború.)

Bonyodalmat okoz az is, hogy a neutronok a hasadásban átlagosan 2 MeV energiával keletkeznek. Ha a reaktor elegendő mennyiségben tartalmaz könnyű atommagokat, akkor a neutronok többsége termikus energiára lassul. Mivel a hatáskeresztmetszetek a termikus energiájú neutronokra a legnagyobbak, így az ilyen reaktorokban a láncreakciót a termikus neutronok tartják fenn. Ezért ezeket *termikus reaktoroknak*, a bennük lévő neutronlassító anyagokat pedig *moderátornak* nevezzük.

Figyelembe kell venni, hogy az átlagosan 2 MeV energiájú keletkező neutronok lassulás közben nemhasadó atommagokba befogódhatnak. Ebből a szempontból a legfontosabbak az ^{238}U rezonanciái. Ha a lassuló neutron energiája egy rezonanciaenergia közelébe esik, akkor nagy valószínűséggel befogódik, és egy ^{239}U mag keletkezik.

Fermi és Szilárd azon töprengtek, hogy miként lehet megvalósítani a neutron-láncreakciót. Szilárd arra gondolt, hogy a hasadásban keletkező gyors neutronokat az ^{238}U -ban való befogódásuk előtt az uránon kívül kell lassítani, majd a lassú neutronokat visszaengedni az uránba, hogy ott az ^{235}U -t elhasítsák.

Szilárd javaslata szerint az ilyen *atomreaktor* természetes urán hasadóanyaggal, és természetes víz moderátorral működhetne.

A *Physical Review* már 1939 júniusában publikálta ezt az elképzelést. A Csehországból kivándorolt *George Placzek* (1905–1955) a publikáció hatására kiszámította, hogy a vízben lévő hidrogén túl sok neutronot fog be a következő magreakció során:



Placzek moderátornak víz helyett héliumot ajánlott (a hélium magfizikai szempontból is teljesen zárt héjjal rendelkezik), de Szilárd ezt gáz halmazállapota és a nagyon kicsi sűrűsége miatt alkalmazhatatlannak találta, így ő *grafit moderátort* javasolt. Elképzelése szerint az uránt grafitba kell ágyazni úgy, hogy az urángolyók sugara olyan kicsi legyen, hogy belőlük ütközés nélkül lépjenek ki a neutronok. Grafitból viszont olyan sok

kell, hogy benne minden neutron lelassuljon, mielőtt újra uránt ér. Számításainak eredménye biztató volt, ezért az urán-grafit reaktor ötletével felkereste Fermi. Fermi azt válaszolta, hogy ő is gondolt a grafitra, mint moderátorra, de számításai szerint az nem működne. Fermi urán és grafitpor homogén keverékét tétélezte fel, amiben valóban nem működne a láncreakció, mivel az ^{238}U a lelassulás előtt befogná a gyors neutronokat. Tehát Fermi és Szilárd ötlete „csak” annyiban tért el egymástól, hogy Szilárd javaslata az *inhomogén urán-grafit reaktor* volt. Így 1939 júliusára ígéretesnek tűnt a reaktor megvalósíthatósága. Azt, hogy mekkora legyen a reaktor, egyikük sem tudta. Úgy gondolták, hogy grafitömböket grafitömbökre raknak, és közéjük urándarabokat tesznek mindaddig, amíg el nem érik a kritikus méretet.¹

Fermi és Szilárd közösen dolgozott tovább az inhomogén reaktor tervein, *Divergens láncreakció uránból és grafitból álló összetett rendszerben* címmel dolgozatot is írtak, de egyelőre nem jelentették meg. 1944. december 19-én szabadalmat kértek rá, amit csak 1955-ben, 2 708 656 szám alatt, Fermi halála után kaptak meg.

Az amerikai atomprogram beindul

Szilárd sürgette, hogy kísérletileg ki kell próbálni, vajon a grafitömbökből és urángolyókból elég sokat összehalmozva meg lehet-e valósítani az önfenntartó láncreakciót.

Ez közel sem volt olyan egyszerű, mint amilyennek tűnt. Az Egyesült Államokban nem lehetett nagy tételben uránhoz jutni, valamint a kapható grafit meg sem közelítette a kívánt tisztaságot. A reaktorhoz szuper-tiszta grafitra volt szükségük, amihez viszont rengeteg pénz kellett. Szilárd Leó tanulmányaiból emlékezett arra, hogy a grafit gyártásánál általában bórkarbid (B_4C) elektródokat használnak. Emiatt személyesen tárgyalt a gyárral, hangoztatta a rendkívüli tisztaság fontosságát, ugyanis a szennyező atommagok (*reaktortörmégek*, ez esetben a bór) neutronelnyelése elfojtana a láncreakciót. Az első tájékoztató kísérleteket Fermiék már 1941 júliusában a Columbia Egyetemen elvégezték. Az eredmények ígéretesek voltak, a tiszta grafit nagyon kevés neutronot nyelt el. Anyaghiány miatt a kísérletek csak lassan folytak, de Fermi szeret-

¹ A német fizikusok is foglalkoztak atomreaktor építésével. (A német vezetés nem erőltette *atombomba* építését, mert az *Heisenberg* tanúsága szerint több évet vett volna igénybe, a vezetés pedig világháború megnyerésében bízott.) Az első gondolat itt is grafit neutronlassító volt, de az I. G. Farben kémiai gyár szennyezett grafitot szállított, azon pedig *Bothe* kiábrándítóan magas neutronelnyelést mért. Ezért nehézvízlassítóra tértek át. Nehézvíz előállítására norvégiai nehézvízgyárat használtak, amíg azt angol ejtőernyős kommandósok szét nem robbanták. Háborús viszonyok közepette lassan ment a reaktorépítés. Az utolsó reaktorelrendezést 1945 tavaszán Haigerlochban egy söröspincében állították össze, de abban még nem alakult ki láncreakció, amikor az amerikai csapatok megérkeztek. Utólag kitudt, hogy volt elég urán és volt elég nehézvíz. Ha a németeknek lett volna még egy-két hetük, rájöttek volna, hogy a nehézvízbe lógó uránfüzéreket közelebb helyezve egymáshoz beindulna a láncreakció [2].



Stagg Field nyugati szárnya, az első atommáglya otthona.

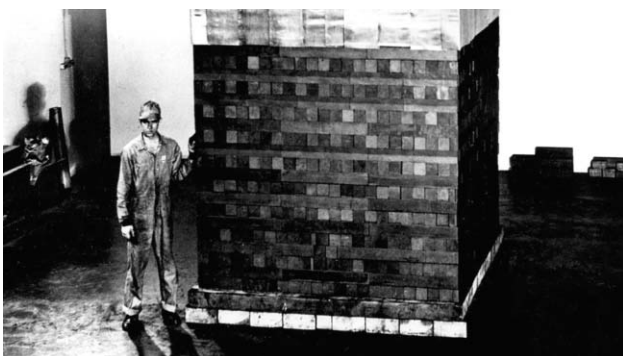
te volna valahogy meggyorsítani a munkát. Meg volt győződve róla, hogy egy kisebb máglya viselkedéséből sokkal több információhoz juthatna, és ez segítené nagyobb építését.

A folyamatosan érkező grafitból és uránból elkezdtek építeni a máglyát. Lassacskán nőtt a fekete fal, mígnem elérte a mennyezetet. Ez a méret közel sem volt olyan nagy, hogy benne önfenntartó láncreakció alakulhasson ki. Fermi szerette volna megtudni, mennyivel növelhető a máglya teljesítménye, ha a levegőt kiszívják belőle. Arra gondolt, ha az ételt a konzervdoboz megóvjá a levegőtől, akkor a máglyát is megóvhatja egy nagy „konzervdoboz”. A fémdobozt részletekben készítették, majd amint a máglyát körbevették vele, kiszívták belőle a levegőt. A neutronvesztésre tett hatás észrevehető volt, de nem jelentős, így Fermi arra gondolt, hogy metánt, nem abszorbeáló gázt kellene nyomni a grafit lyukacsiba, így fokozva a máglya teljesítményét.

Csakhogy a levegővel kevert metán felrobbanhat (sújtólég), és Fermi nem akart több kockázatot vállalni. Ráadásul balesetek is történtek. Zinn kinyitott egy tóriumporos dobozt, az fölrobbant a kezében, a kesztyűje pedig tüzet fogott. Zinn keze és arca súlyosan megégett, hetekig kórházban kellett fekdünie. Nyilvánvalóvá vált, hogy abban a laboratóriumban nem lehet a végső sikerig folytatni a kísérletet.

1941. december 8-án az osztály élére *Arthur Compton* (1892–1962), a Chicagói Egyetem Fizika tanszékének vezetőjét nevezték ki.

Gyűlnek a nagytisztaságú grafitéglák.



1942 januárjában Compton úgy döntött, hogy a reaktor tervének kivitelezése érdekében az egész társaságot a „veszélyes” atlanti partról Chicago városába, egy fedél alá kell telepíteni. A program itt a *Metallurgiai Laboratórium* fedőnév alatt működött.

Chicago

1942 tavaszán Compton Chicagóba hívta Fermi és Wignert. Később Teller is csatlakozott a csoporthoz, az ő feladata a reaktorban keletkező ^{14}C esetleges környezeti hatásának vizsgálata volt.

A legjobb hely, amit Compton a máglya építéséhez talált, a Chicagói Egyetem stadionjához tartozó Stagg Field nyugati szárnya alatt lévő fedett tenispálya volt. *Robert Maynard Hutchins* (1899–1977), a Chicagói Egyetem igazgatója kitiltotta az amerikai futballt az egyetem területéről, úgyhogy a Stagg Fieldet csak ritkán használták. A fedett pálya 9 méter széles, 20 méter hosszú és több mint 8 méter magas volt. Anderson felelt az anyagok odaszállításáért.

A szállítás üteme bár állandó, de nagyon lassú volt. Az urán beszerzése mindig akadályokba ütközött. Amíg az anyagokat várták, Anderson meglátogatta a Goodyear gyárat, hogy megrendeljen egy négyszögletű ballont. A Goodyear tisztviselői nem hallottak még négyszögletű ballonról, nem hitték, hogy le tudják gyártani. Anderson megadta a pontos részleteket, és a Goodyear vállalta, hogy készít egy gumírozott szövetből gyártott négyszögletű ballont. A szállítást csak jó néhány hónappal későbbre vállalták. Összehajtván hatalmas csomag volt, mikor azonban kiterítették, a padlótól a mennyezetig ért. Minderre azért volt szükség, mert New Yorkban látták, hogy beburkolt máglyával, amiből kiszivattyúzták a levegőt, jobb eredményeket lehetett elérni. Egy akkora máglyát, amekkorát építeni terveztek, lehetetlen lett volna lemezzel burkolni, viszont belerakhatják egy négyszögletes ballonba, amiből szükség esetén ki lehet szívni a levegőt. Úgy gondolták, hogy ezzel a megoldással csökkenteni lehet a máglya kritikus méretét.

A padozatra egy kis Ra-Be neutronforrást helyeztek. Erre grafitömböket helyeztek (mint máglyába a fahasábokat), amelyekbe kis urángolyók voltak beágyazva.

Fermi és Zinn is részt vett az építésben, fűrészelték és cipelték a grafitömböket. Szilárd Leó az ilyen munkát lealacsonyítónak érezte, amit jobb asszisztensekre és technikusokra bízni.

Fermi 25 különböző urán-grafit elrendezést próbált ki, mérték, hogy miként változik a neutronok száma a neutronforrástól távolodva. Ha egy-egy réteg a neutronok N számát k -ad részére csökkentette, akkor n réteg fölött a kezdeti N_0 számú neutronból

$$N_n = N_0 k^n \quad (5)$$

neutron maradt. Az volt a kérdés, hogy elérhető-e a $k \geq 1$ érték. A különböző elrendezéseknél mért ada-

tok alapján Wigner következtetett arra, hogy milyen lesz az a reaktor, amelyben a láncreakció már önmagát fenntartja. Végül egy felfelé keskenyedő hasábalak vált be, így a máglya nem érte el a mennyezetet. A tervezett utolsó rétegek sosem kerültek a helyükre, mert a máglya a számítottnál előbb érte el a kritikus méretet. Légüres térre sem volt szükség, így a gumibalont sosem zárták be.

A háromszáztizenöt tonna grafitban összesen hat tonna uránt és negyvenöt tonna urán-oxidot halmoztak fel.

A máglya szabályozását a reaktorba tolható, illetve onnan kihúzható, kadmiumból készült neutronnyelők rudak biztosították. (A ^{113}Cd kitűnő neutronnyelő, százszor nagyobb valószínűséggel fog be kis energiájú neutron, mint például a szomszédos ^{113}In .) Mikor a máglyába újabb elemeket tettek, a kadmiumrudakat óvatosan kihúzták, és mérték, hogy a máglyába bevitt neutronforrás által termelt neutronokat milyen mértékben sokszorozza. Amíg a máglya szubkritikus volt ($k < 1$), a következőképpen okoskodtak: ha a neutronforrás időegység alatt S_0 neutront juttat a máglyába, akkor l neutron-élettartamnyi idő (1 ciklus) elteltével ennek k -szorososa marad a máglyában. Tehát kezdetben S_0 neutron, az 1. ciklus végén $S_0 \cdot k$ neutron, a 2. ciklus végén $S_0 \cdot k^2$ neutron, míg az i -edik ciklus végén $S_0 \cdot k^i$ neutron lesz a rendszerben.

Nagy számú ($i \rightarrow \infty$) neutronciklus elteltével a rendszerben lévő neutronok teljes S száma:

$$S = S_0 + S_0 \cdot k + S_0 \cdot k^2 + \dots + S_0 \cdot k^i + \dots = \sum_{i=0}^{\infty} S_0 \cdot k^i. \quad (6)$$

Ezen végtelen mértani sor összege:

$$S = \frac{S_0}{1 - k}. \quad (7)$$

Ez a mértani sor csak akkor konvergens, amikor a máglya szubkritikus ($k < 1$). Minél kisebb a k , azaz a rendszer minél messzebb van a kritikusságtól, annál kevesebb időt kell várni, hogy a teljes forrásereiséget elértek lehessen tekinteni. Amikor átlépték a $k = 1$ értéket, a forrásereiség nem stabilizálódott, hanem exponenciális függvény szerint növekedni kezdett. Ez jelezte azt, hogy megvalósult az önfenntartó nukleáris láncreakció. Ezért az ilyen kísérletet *exponenciális kísérletnek* nevezzük. A teljes forrásereiséget a külső neutronforrás erősségével elosztva ($k < 1$ esetén) kapjuk a rendszer *erősítési tényezőjét*:



Az első atommáglya első indítása (fénykép nem készült az eseményről).

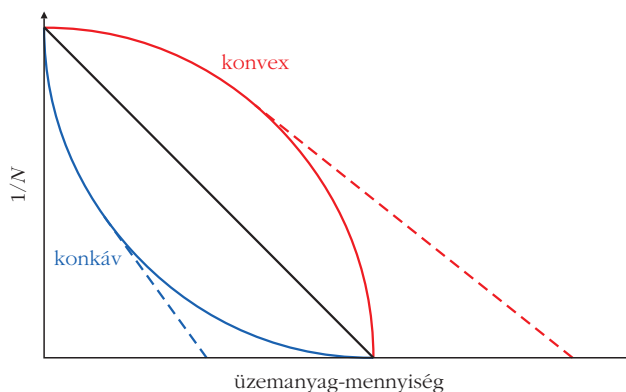
$$M = \frac{S}{S_0} = \frac{1}{1 - k}. \quad (8)$$

Subkritikus rendszerben k minden esetben 0 és 1 közé esik, ezért $M > 1$ adódik. Ha a neutrondetektor által időegység alatt mért neutronok N számának reciprokát a máglyában lévő urán tömegének függvényében ábrázoljuk, csökkenő görbét kapunk, amely a kritikus tömegnél metszi a vízszintes tengelyt.

Ideális esetben egyenest kell kapni, viszont k megváltozása erősen függ attól, hogy az adott hasadóanyagot melyik pozícióba helyezték. Ha a detektor a forráshoz és a zónához képest úgy van elhelyezve, hogy közvetlenül a forrás-neutronokat detektálja, nagy valószínűséggel konvex görbét kapunk. (A konvex görbe mentén haladni veszélyes dolog, mivel ez a kritikus tömeget felülbecsüli!) Ha a detektorok megfelelően vannak elhelyezve, akkor konkáv görbét kaphatunk. (Ez az eljárás a biztonság irányába mutat, mivel a konkáv görbe konzervatív becslést ad a kritikus tömegre.) Amíg a hasadóanyag tömege kisebb, mint a kritikus tömeg, a mért görbe extrapolációjával egyre jobb becslést kaphatunk a kritikus tömegre. Fermiék óta ezt az eljárást *kritikussági kísérletnek* nevezzük. (A reaktorok mellett a mai napig használják.)

A neutronok elszaporodásának megakadályozására tartalék rudak álltak rendelkezésre, amelyek egy kötő-

A kritikussági kísérlet grafikonja.





Az első atommáglyát beindító csoport 1946-ban a Chicagói Egyetemen. Elöl (balról jobbra): Enrico Fermi, Walter Zinn, Albert Wattenberg és Herbert L. Anderson. A középső sorban: Harold Agnew, William Sturm, Harold Lichtenberger, Leona Woods és Szilárd Leó. Hátul: Norman Hilberry, Samuel Allison, Thomas Brill, Robert Nobles, Warren Nyer és Marvin Wilkening. A jobb oldali képen a Ferminek adott chianti palackja.

len függtek a reaktor felett. A reaktor tetején három ember fejszével állt készenlétben (őket „öngyilkos osztag”-nak nevezték), hogy a neutronok túl gyors exponenciális szaporodása esetén elvágják a tartalék kadmiumrudak tartóköteleit, mire azok a reaktorba zuhanva azonnal leállítják a láncreakciót. (A mai reaktorok biztonsági leállító rendszerét az ő emlékükre ma is SCRAM-nek – Safety Control Rod Axe Man –, azaz fejszés embernek hívják.)

Az első grafitégla lerakásától a máglya elkészültéig mindössze hat hét telt el.

1942. december 2-án reggel mindnyájan felmászta a Stagg Field északi végén lévő balkonra, kivéve a máglya tetején álló három embert és egy fiatal fizikust, *George Leon Weil* (1907–1995). Az ő feladata volt, hogy utasításra kihúzza a kadmiumrudat a máglyából. Első lépésként a szabályozó rudakat – kivéve a Weil által kezeltet – húzták ki. Az önfenntartó láncreakció megakadályozásához az az egy rúd is elegendő volt.

A kísérlet kezdetén Weillel kihúzták a rúd egy részét, majd merevéseket végeztek, hogy megbizonyosodjanak, a máglya működésbe lépett-e.² A rudat úgy állították be, hogy négy méter még a máglya belsejében maradjon. A számlálók kattogni kezdtek, az írószerkezet tolla felszaladt, majd megállt azon a ponton, ahol Fermi jelezte. Fermi további utasításokat adott, és ahányszor Weil egyre jobban kihúzta a rudat, a számláló kattogása egyre sűrűbb lett. Ezzel el is ment a délelőtt, majd Fermi ebédszünetet rendelt el. Ebéd után mindenki újra elfoglalta helyét, majd a kísérlet

² Ebben az időben már tudott volt – *Richard Brooke Roberts* (1910–1980) és munkatársai 1939-es felfedezése nyomán –, hogy a hasadásban azonnal (kevesebb, mint 10^{-14} másodperc után) emittáló neutronok mellett később is bocsátódnak ki neutronok. Igaz, hogy ezek gyakorisága csak 0,65%. Ezek a neutronok egyes hasadási termékek β -bomlása után keletkeznek, ezért megjelenésük felezési ideje akár több tíz másodperc is lehet. A késő neutronok teszik lehetővé, hogy az atomreaktorokat szabályozni tudjuk, mivel meghosszabbíthatják a neutrongenerációk effektív generációs idejét. Ez a jelenség biztosítja, hogy a máglya enyhén szuperkritikus állapotba kerülése esetén is legyen elegendő idő a hasadások leállítására. (Szerk. megj.)

ismét lassú léptekkel haladt tovább, egészen fél négyig. Fermi még egyszer odaszólt Weilnek, hogy húzzon még ki körülbelül 30 centimétert. Tudta, hogy ennek már meglesz a hatása, és valóban, a *láncreakció beindult*, ezzel a máglya 1942. december 2-án délután kritikussá vált. Wigner Jenő, akit az első nukleáris reaktormérnöknek is neveznek, így emlékezett vissza erre a napra [5]:

„Szerda reggel a stadion alatt lévő nagy, 10-szer 20 méteres teremben már 8:30-kor gyülekezni kezdtünk. A terem közepén egy nagy halom fekete grafit volt, rajta fa tartórudak látszottak. A máglya alaprajza négyzet alakú volt, fölfelé kissé keskenyedve. A máglya tetején egy „öngyilkos-osztag” is volt, készen arra, hogy szükség esetén neutronelnyelő bóros vizet öntsön a reaktorba. A kísérlet 9:45-kor indult. Fermi figyeltem. Ő elrendelte a kadmium kontrollrúd fokozatos kihúzását. 11:30-ra majdnem megvalósult az önfenntartó láncreakció, de ekkor Fermi ebédszünetet rendelt el. 14:00-kor újra összegyűltünk. Fermi logar léccel a kezében számolt, mellette volt két közvetlen munkatársa, Herbert Anderson és Walter Zinn. Közélemben állt Arthur Compton, mi többiek – lehetünk negyvenen – távolabb helyezkedtünk el. Köztünk volt régi barátom, Szilárd Leó is. Számításai alapján 15:30-kor Fermi kiadta az utasítást, hogy a kadmiumrudat 25 centiméteres adagokban kezdjék kihúzni. A neutronszámláló egyre sűrűbben kattogott, a láncreakció már majdnem önfenntartó volt. Mire szinte az egész kadmiumrudat kihúzták, a számláló sűrűbben kattogott, mint bármikor annak előtte. Az önfenntartó láncreakció megvalósult! Az atommag energiáját felszabadítottuk és ellenőrzés alatt tartottuk. Mosoly jelent meg az arcokon, néhány taps is elhangzott. De főképp feszülten figyeltünk még 30 percen keresztül. A jelenet nem volt teátrális. Fermi olyan alacsony szinten működtette az atommáglyát, hogy senki nem volt veszélyeztetve. De működött a reaktor. 16:00 előtt pár perccel Fermi elrendelte a reaktor leállítását. A kadmiumrudat visszatolták, a láncreakció leállt. Tudtam, hogy a kísérlet sikerülni fog. Hiszen, ha megépítünk



Az első atommáglya szarkofágja.

egy kocsi és elé lovakat fogunk, ostorral a lovak közé suhintva elindulnak a lovak, és föltételezhetjük: a kocsi is meg fog indulni. Fermi megvalósította a reaktort és a lovak közé vágott. Nem csak ő lehetett képes megvalósítani a láncreakciót, de talán ő volt az, aki ezt ilyen gyorsan meg tudta csinálni.” [3, 141–145. o.]

Wigner Jenő átadott az olasz Ferminek egy palack chiantit. Minden jelenlevő ivott, köszöntők nélkül, csendben, papírpoharakból. Azután mindannyian aláírták a palackot borító szalmát. (Ez volt az egyetlen jegyzőkönyv, amit aznap készítettek.)

Később a társaság feloszlott, néhányan ott maradtak, hogy rendbe tegyék a mérőeszközök által szolgáltatott adatokat.

Arthur Compton felhívta a Nemzetvédelmi Kutató Bizottság kinevezett elnökét, *James Bryant Conantot* (1893–1978) és a következő beszélgetés zajlott le:

- *Az olasz hajós elérte az Újvilágot!*
- *És, hogy fogadták őt a beneszülöttek?*
- *Nagyon barátságosan.*

Még aznap délután egy fiatal fizikus, *Albert Watterberg* (1917–2007) észrevette az üres chiantis palackot, és úgy gondolta, hogy a rajta lévő aláírások miatt remek emlékek ígérkeznek. Mikor az atommáglya tíz éves évfordulójának ünneplésére készültek, a palack és Watterberg a Massachusetts állambeli Cambridgeben tartózkodott. Gyermeke születése miatt Watterberg

mégsem tudott részt venni az ünnepségen, így hajóra adta a palackot, és ezerdolláros biztosítást kötött rá.

Fermi és még néhány fizikus ajándékot kapott: egy láda Chiantit. Egy importáló cég így fejezte ki háláját az ingyen reklámért, amit a chiantinak szereztek.

Epilógus

Az első reaktort csak néhányszor tették kritikusná, és akkor is gyakorlatilag csak zérus teljesítményen járatták. Kis termikus teljesítménye (kezdetben 0,5 W, később 2 W) miatt hűtőközegre nem volt szükség. 1943 februárjában minden kísérletet beszüntettek, majd a reaktort elbontották és átszállították Red Gate Woods-ba az Argonne Nemzeti Laboratóriumba, Illinois államba. Ott újjáépítették az eredeti anyagokból, és körbevették sugárvédelmi falakkal, majd 1943 márciusában újra méréseket kezdtek végezni. Az átszállításra azért volt szükség, mert megítélésük szerint Chicagóban a közeli lakóházakat túl nagy sugárterhelésnek tette volna ki. Miután a kísérleteket befejezték, a nemzeti laboratórium területén egy nagy gödröt ástak, majd a reaktor részeit odahordták és eltemették. Később a talajmintavételek során azon a helyen magas ^{90}Sr tartalmat mértek [2].

Az első reaktor a hivatását betöltötte, ugyanis választ adott két alapvető kérdésre: egyrészt megmutatta, hogy a láncreakció makroszkopikus méretekben megvalósítható, másrészt bebizonyította, hogy a reaktorok szabályozhatók [6, 7].

Irodalom

1. Marx György: *Atommagközelben*. Mozaik Oktatási Stúdió, Szeged, 1996.
2. Marx György: *A marslakók érkezése*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 2000.
3. Marx György: *Wigner Jenő*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 2002.
4. Ropolyi László, Szegedi Péter (szerk.): Wigner Jenő válogatott írásai. *Principia Philosophiae Naturalis sorozat*. Typotex, Budapest, 2005.
5. Alvin M. Weinberg: Wigner Jenő, az első nukleáris mérnök. *Fizikai Szemle 52/10–11* (2002) 313.
6. U. S. Department of Energy: *The First Reactor*. Washington, 1982.
7. Horváth András, Radnóti Katalin: A Becquerel-sugaraktól a chicao-i reaktorig III. *Nukleon V/5* (2012) http://nuklearis.hu/sites/default/files/nukleon/Nukleon_5\5_125_Horvath.pdf

SZÁMÍTUNK RÁD, LÉGY



A FIZIKA BARÁTJA!

Támogasd adód 1%-ával az Eötvös Társulatot!
Új adószámunk: 19815644-2-43

A MÁSKÉPP GONDOLKODÁS BŰVÖLETÉBEN

100 éve született David Bohm fizikus

Radnai Gyula
ELTE Fizikai Intézet

...kitántorgott Amerikába másfél millió emberünk...

József Attila 1937 májusában fogalmazta meg e szavakkal a nemzet közös fájdalmát *Hazám* című versében.

A kivándorlás még a 19. században kezdődött, azokban az években, amikor ugyan fokozatosan javult Ausztria–Magyarország ipari/gazdasági helyzete, de ezzel együtt nőttek az életszínvonalbeli különbségek is az országban. Leginkább a vállalkozó kedvű fiatalok mentek el, persze nemcsak Magyarországról, hanem egész Kelet-Európából. A határok nyitottak voltak, a kivándorló emigránsok fő célja az Egyesült Államok, a korlátlan lehetőségek hazája volt. Nagyon sok példát lehetne említeni, a fizikusokhoz legközelebb álló példa talán *Nikola Tesla* (1856–1943), akinek még *Puskásék* adtak pénzt a hajóútra Budapesten, ma pedig szobra áll a Niagara-vízesés közelében. Nem kevesen voltak azok sem, akik egy idő után visszajöttek, s itthon adtak tippeket az itt maradottaknak.¹ Lényegesen többen voltak persze azok, akik kint maradtak.

Böhm Sámuel Mohácsról vándorolt ki 16 éves korában, még a 20. század elején.² Az első világháborút már Amerikában élte át, ahol egy Litvániából menekült zsidó lányt vett feleségül.³ Több gyermekük is született, az első 1917. december 20-án, ő a David nevet kapta. Böhmék akkor Pennsylvániában, egy bányavárosban éltek, amely a Wilkes-Barre névre hallgatott.

David itt járt iskolába, osztálytársai leginkább bányászcsaládok gyermekei közül kerültek ki. Nevét Böhmről ekkor már az angol nyelv számára is elfogadható Bohmra változtatták. 12 éves volt, amikor bekövetkezett a tőzsdekrach New Yorkban. Hamarosan csökkenni kezdett a termelés, nőtt a munkanélküliség, egyre nehezebben éltek a bányászcsaládok. Ezek az évek bizony nyomot hagytak a kamasz David lelkében. Ők ugyan nem szegényedtek el egészen, mivel saját bútörizletük volt, de az elszegényedettek megtapasztalt sorsa elkésérítette, és lelke befogadóvá vált az ezen változtatni törekvő szocialista (= társadalmi) eszmék számára. Amúgy is kissé álmodozó volt, kedvenc olvasmányai a tudományos-fantasztikus re-



A jó tanuló David Bohm.

gények voltak. Az iskolában kitűnt kreativitásával matematikából és fizikából, de félénk, kissé ügyetlen gyerekként semmit se örökölt apja gyakorlati érzékéből. Volt is vita otthon a továbbtanulásáról – apja inkább valamilyen gyakorlati pályára szeretne volna irányítani, nem sok sikerrel.

Oppenheimer mellett Berkeley-ben

Miután apja vállalta fia főiskolai tanítatásának anyagi terheit, *David Bohm* 1939-ben, 22 éves korában megszerezte a B.Sc. fokozatot Pennsylvániában az állami főiskolán (ez ma már egyetem) fizikából, majd – talán apja kívánságára – beiratkozott a keleti parton, a Los Angeles melletti Pasadena-ban működő CalTech-re, a Kaliforniai Műszaki Egyetemre. Egy évet el is végzett itt, de a régóta vágyott inspiratív szellemmel sajnos nem találkozott, és ez eléggé elkésérítette.



Radnai Gyula ny. egyetemi docens, a fizikai tudományok kandidátusa, matematika-fizika tanári szakon végzett 1962-ben. Az ELTE Kísérleti Fizika tanszékén kapcsolódott be a tanárképzésbe, a fizika hazai kultúrtörténetének kutatásába pedig *Simonyi Károly* ösztönzésére fogott a '70-es években. *Physics in Budapest* című – *Kunfalvi Rezsővel* közös – könyve, valamint a *Fizikai Szemlében* és a *Természet Világában* megjelent számos, ma már az interneten is elérhető publikációja hitelesíti ezt a tevékenységét.

¹ Magam is egy olyan helyen lakom, Rákosligetben, amely település a 19. és 20. század fordulóján keletkezett, s ahol egy visszajött, „amerikás magyar” beszélt rá az építetőket, hogy ne kutakat tervezzenek az udvarokba, kertekbe, hanem vízvezeték mind a hűsz megépítendő utcába. Ezeket az utcákat pedig ne emberekről nevezék el, hanem számozzák be őket, mivel ez a modern tendencia, Amerikában már így csinálják... Így lett Rákosligetben elsőnek vízvezeték a környéken, az utcák pedig számoztak – igaz, római számokkal.

² Az itthon maradt rokonság azután egyenesen Auschwitzba került 1944-ben. Senki se jött vissza közülük.

³ Litvánia 1919-ig a cári Orosz Birodalom része volt.

Első éves műegyetemi évfolyamtársaival nem volt képes szakmai vitákat folytatni, mert ezek a hallgatók nem vitapartner, hanem versenytársat láttak benne, miközben bentmaradásukért küzdöttek az egyetemen. Úgy látta, hogy az oktatók a gyakori dolgozat-írással csak leckéztették a hallgatókat, hosszadalmas számításokat igénylő házi feladatokkal csuklózatták őket, nyoma se volt annak az egészséges tudományos légkörnek, amire David Bohm számított és vágyott. Nem a numerikus feladatok megoldása okozott gondot számára, egyszerűen unta ezeket.

Az első tanévet követően kapcsolatot keresett és talált Kaliforniában a San Francisco melletti Berkeleyben működő tudományegyetemmel. Itt volt professzor akkor nemcsak Kalifornia, de az egész Egyesült Államok elismerten egyik legjobb elméleti fizikusa, *Robert Oppenheimer* (1904–1967). Sikertült átmennie erre az egyetemre, és 1941 tavaszán David Bohm már Oppenheimer témavezetésével Berkeley-ben kezdett doktori tanulmányokba és elméleti kutatásba. A téma nagyon izgalmasnak ígérkezett, ez ugyanis proton- és deuteronnyaláb ütközésekor fellépő szórásjelenségek elméleti vizsgálata volt. Izgalmas is lett, bár nem egészen úgy, ahogyan akkor Bohm gondolta.

1941. június 22-én támadta meg a náci Németország a Szovjetuniót, októberben a harcok már Moszkva közelében folytak. December 7-én bombázták le a japánok Pearl Harbort, ezután lépett be az USA a háborúba. Miközben Bohm a doktori disszertációján dolgozott 1942-ben, zajlott a világháború, amelyben ez év végére történt keleten a döntő fordulat, a sztálingrádi csata. 1942. december 2-án *Fermiéknek* sikerült beindítaniuk Chicagóban az atommáglyát, Los Alamosban pedig 1942 őszétől folyt az „atomváros” felépítése, ahová Oppenheimer 1943. márciusban költözhetett át. Körülbelül ekkorra lett készen Bohm doktori disszertációja Berkeley-ben.

Amikor kiderült, hogy a témának nemcsak csillagászati, hanem nagyon is földi, a készülő atombomba számára is hasznosítható alkalmazása lehet, az egyetemi „belügyi” adminisztráció azonnal titkosította a témát. Nemcsak publikálni, de még beszélni se lehetett Bohmnak arról, amin két évig dolgozott. Oppenheimernek szerencsére volt akkora tekintélye, hogy az egyetem az ő véleménye alapján megadta neki a doktori (PhD) fokozatot. Logikus lett volna, hogy ezután Bohm is elköltözik Los Alamosba, de ezt már Oppenheimernek se sikerült elintéznie. David Bohm ugyanis „biztonsági kockázatot jelentett” az Egyesült Államok számára.

Ifjú kommunisták között a RadLab-ban

Az Egyesült Államokban – több más országhoz hasonlóan – csak 1919-ben alakult meg a kommunista párt. A húszas években még csak néhány ezer tagja volt, ezek többsége is bevándorló, főleg kelet-európai emigráns. 1936-ra, a spanyol polgárháború idejére érték el a mintegy 50 ezer főt, és ekkorra már a tagok

több mint fele amerikai születésű volt, legfeljebb a szüleik voltak egykori bevándorlók. A munkásmozgalmi megmozdulásokat, sztrájkokat, utcai tüntetéseket a szakszervezetek szervezték. A kommunista párt főleg gyűléseket, találkozókat tartott, előadói esteket szervezett, amelyeken más érdeklődőket is szívesen láttak. Néhány elhívatott radikális párttag még Spanyolországba is eljutott, hogy harcoljon a köztársaságért. 1942-től kezdődően a Szovjetunió és az Egyesült Államok szövetségesek lettek a világháborúban. Ez egyrészt megkönnyítette az amerikai kommunisták helyzetét, másrészt kiszélesítette, merészebbé tette a szovjet kémtevékenységet az Egyesült Államokban. Azok a naiv, jóindulatú, liberális amerikaiak, akik a Szovjetuniótól remélték, hogy segít megállítani a náci világhuralmi törekvését, most elhívatott tagjai lettek a kommunista pártnak. Eszükbe se jutott, hogy aki mellettük ül egy taggyűlésen, esetleg a Szovjetunió számára továbbít titkos információkat.

Így volt ezzel David Bohm is, aki 1942-ben lépett be az amerikai kommunista pártba. Elhatározását megkönnyítette, hogy a Sugárzási Laboratóriumban, amelyet csak RadLab-nak emlegettek egymás között a fizikusok, és amelynek *Ernest Lawrence* (1901–1958) volt a vezetője Berkeley-ben, Oppenheimer több olyan doktorandusz tanítványával találkozhatott, akikkel meg tudott vitatni nemcsak fizikai, de politikai kérdéseket is, és akikkel legtöbbször sikerült közös álláspontra jutnia. Az is közös volt bennük, hogy legtöbbjük joggal aggódott kelet-európai zsidó rokonai életéért. Közülük David Bohm barátja lett a lengyel bevándorló *Giovanni Rossi Lomanitz* (1921–2002) elméleti fizikus, *Joseph Weinberg* (1917–2002) általános fizikus és *Max Friedman* (1915–?), aki a háború után *Ken Manfred* néven élt tovább, ha nem is tudjuk, meddig.

Mindegyikük belépett a kommunista pártba, és egyikük se juthatott el Los Alamosba, bár a RadLab-ban részt vettek az atombomba számára nélkülözhetetlen kutatásban, az uránizotópok – a ciklotront feltaláló Lawrence irányításával történő – elektromágneses szétválasztásában. A dolog szépséghibája, hogy Weinberget elérte a szovjet hírszerzés is, és később azzal vádolták, hogy titokban nemcsak információkat, de urán-235-öt is juttatott a szovjetekhez, bár ezt nem sikerült bebizonyítani...

Bohm kommunista párthoz való vonzódásához talán az is hozzájárult, hogy egy olyan fiatal lánnyal járt egy évig a marxista előadásokra, aki egyébként szintén rendelkezett magyar gyökerekkel. A lány pszichológiából jött doktorálni Berkeley-be. Akkori neve *Betty Goldstein* volt, de 1947-ben férjhez ment, felvette férje nevét, és *Betty Friedan* (1921–2006) néven később az amerikai feminista mozgalom egyik legismertebb alakja lett. Csupán az 1943-as évet töltötte Berkeley-ben, és hogy ezzel függ-e össze, nem tudni, de 9 hónapi párttagság után David Bohm kilépett a pártból. Később azt mondta, azért lépett ki, mert már unta az előadásokat. Nem juthatott el Los Alamosba, de Oppenheimer kérésére továbbra is végzett a Man-



Az 1947. évi Shelter-szigeti kvantummechanika-konferencia résztvevői (balról jobbra): Isaac I. Rabi, Linus Pauling, John H. van Vleck, Willis E. Lamb, Gregory Breit, Duncan MacInnes, Karl K. Darrow, George E. Uhlenbeck, Julian Schwinger, Teller Ede, Bruno Rossi, Arnold Nordsieck, Neumann János, John A. Wheeler, Hans A. Bethe, Robert Serber, Robert E. Marshak, Abraham Pais, Robert J. Oppenheimer, David Bohm, Richard P. Feynman, Victor F. Weisskopf, Herman Feshbach; hiányzik a képről: Hendrik A. Kramers.

hattan-terv keretében számításokat, akár csak *Szilárd Leó* Chicagóban. Fő kutatási területe a plazmafizika volt és maradt. Post doc-ként élt Berkeley-ben, egészen 1947-ig.

Einstein közelében Princetonban

1947. júniusban a háború utáni első amerikai fizikus-konferenciát a New Yorkhoz közeli Shelter-szigeten rendezték meg. Íme a résztvevők névsora: *Hans A. Bethe*, *David Bohm*, *Gregory Breit*, *Karl K. Darrow*, *Herman Feshbach*, *Richard P. Feynman*, *Hendrik A. Kramers*, *Willis E. Lamb*, *Duncan MacInnes*, *Robert Eugene Marshak*, *Neumann János*, *Arnold Nordsieck*, *Robert J. Oppenheimer*, *Abraham Pais*, *Linus Pauling*, *Isidor Isaac Rabi*, *Bruno Rossi*, *Julian Schwinger*, *Robert Serber*, *Teller Ede*, *George E. Uhlenbeck*, *John Hasbrouck van Vleck*, *Victor Frederick Weisskopf*, *John Archibald Wheeler*.

David Bohm nagyon jó benyomást tett, s ennek egyenes következményeként őstől már a Princetoni Egyetemen tarthatott előadásokat és folytathatta plazmafizikai kutatásait. Külön szerencse volt, hogy *Einstein* lakása melletti házban bérelt szobát és hamar összebarátkoztak. Einstein egyszer úgy nyilatkozott, hogy lélekben fiának tekinti Bohmot. Bohm érdeklődése fokozatosan toldott el a kvantumfizika irányába, és még egy kiváló kvantumelméleti tankönyvet is írt, amely 1951-ben jelent meg New Yorkban. Pedig a munkakörülmények igazán nem voltak ideálisak: 1949 nyarán az Amerika-ellenes Tevékenységet Vizsgáló Bizottság elé idézték kommunista múltja miatt, volt RadLab-os barátaival együtt. Ez volt a McCarthy-korszak – Bohm még vizsgálati fogságban is töltött egy fél évet! El lehet képzelni, hogyan hatott a börtön az egyébként félnék, gátlásos fiatal tudósra. Hiába mentették fel utána, hiába szeretne volna még *Einstein* is asszisztenséül fogadni, princetoni szerződését 1951

júniusában már nem újítták meg. Új állás után kellett néznie: *Einstein* ajánlásával először Manchesterbe pályázott, sajnos eredménytelenül.

Mit értékelt annyira *Einstein* *David Bohm*-ban? A kreativitását, a gondolati bátorságát biztosan. Azt, hogy mert „másképpen gondolkodni”. *Bohm* kvantumelmélet könyve mindenkinek tetszett, olyan jól magyarázta el benne az új fogalmak akkor már széles körben elfogadott koppenhágai, ortodox értelmezését. Mindenkinek tetszett, még *Einstein*nek is. Legkevésbé magának *Bohm*nak. Mire befejezte a könyvet, egyre jobban hitt a „rejtett

paraméterek” létezésében, amelyekről *Neumann János* már a 30-as években bebizonyította, hogy ezek matematikailag nem szükséges feltételei a kvantumelmélet törvényeinek. Lehet, hogy matematikailag nem szükségesek, de fizikailag mégis lehetségesek – gondolta. *Bohm* nem félt új elméletet felállítani, különösen akkor nem, ha ez nem ad más eredményt, mint a kvantumelmélet, éppen csak fizikailag érthetőbb, elfogadhatóbb magyarázatot fűz hozzá. Elővette újra *de Broglie* „vezérhullám”-elméletét, amely pedig még *Einstein*nek se tetszett, mert ezen vezérhullámoknak a fénynél is gyorsabban kellett volna terjedniük. Az azért szimpatikus lehetett *Einstein* számára, hogy már nem állt egyedül a kvantumelmélet ortodox értelmezésének bírálataival – lám, itt egy fiatal tudós, aki elkezdett hinni az *Einstein–Podolsky–Rosen* (EPR) paradoxonban...

A *McCarthy*-hisztéria viszont annyira megviselte *David Bohm* idegeit, hogy mindenképpen el akart menni az Egyesült Államokból. Kapóra jött a nála három évvel fiatalabb, orosz származású elméleti fizikus, *Jayme Tiomno* (1920–2011) hívása São Paulo egyeteméről, s *Oppenheimer*⁴ és *Einstein* ajánlólevelével sikerrel pályázta meg az ottani elméleti fizikai professzori állást.

Brazíliában – elhagyatottan

1951 ősztől 1954 végéig *David Bohm* São Paulóban, idegen nyelvi környezetben, számára megszokhatatlan éghajlat alatt töltötte napjait. Gyomorbántalmi voltak, az ottani ételek se tettek jót neki. Mindjárt az első időkben behívták az amerikai nagykövetségre és

⁴ *Oppenheimer* ellen akkor még nem indult politikai hajsz, *Tiomno* pedig azért is szimpatikus lehetett *Bohm* számára, mert ő is emigráns szülők gyermeke volt – mellesleg Princetonban *Wigner Jenő* volt a doktori témavezetője...

elvették útlevelét. Azt mondták, akkor kapja majd meg újra, amikor visszaindul az Egyesült Államokba. Ekkor döntötte el végleg, hogy amíg a McCarthy-korszak tart, nem fog visszamenni. Pedig már menyaszszonya is várta Princetonban. *Hanna Loewy* (1925–2007) Einstein egyik legközelebbi princetoni barátja, a prágai születésű *Erich Kabler* (1885–1970) bölcsész-professzor fogadott lánya volt, ismeretségük innen eredt. A csalódott Hanna kényszerűségből egy ideig még levelezgetett Daviddal, összetartozásuk azonban nemsokára távoli baráti kapcsolattá szelődött.

1952. januárban jelent meg a *Physical Review*-ban Bohm két cikke, amelyeket még Princetontól küldött be 1951-ben: *A kvantumelmélet javasolt interpretációja „rejtett változók” segítségével*, de nem aratott sikert a koppenhágai szemléletű fizikusok körében. Nem cáfolták, csak mint érdektelen, nem fontos elméletet elhallgatták. Bohm a plazma viselkedésének elméleti vizsgálatában volt otthon, innen jöttek értelmezési ötletei a kvantumelméletre. Ugyanakkor a kvantumelmélet is adott ötleteket a plazma viselkedésének még jobb leírására, így születtek a *PhysRev*-ben 1951–53-ban megjelent cikkei az elektronok kölcsönhatásának a plazmonfogalom bevezetésével történő tárgyalásáról. E cikkek társszerzője princetoni doktorandusza, *David Pines*⁵ (1924–) volt.

Brazíliában Einstein pótolta valamennyire Bohm számára az éltető intellektuális környezetet azáltal, hogy gyakran váltottak leveleket.⁶ Még leginkább azok a beszélgetések oldották valamennyire Bohm depresszióra hajlamos természetét, amelyeket a São Paulóba látogató fizikusokkal folytathatott. Közöttük volt Richard Feynman (1918–1988) és Isidor Rabi (1898–1988) is. Udvariisan meghallgatták Bohm nézeteit a kvantummechanikai sztochasztikus folyamatok feltételezett determinisztikus háttéréről, de nem lelkesedtek érte. Nem volt ugyanis semmi kísérleti bizonyíték arra, hogy a világűr olyan, az elektronnál is milliószor kisebb méretű részecskékkel van sűrűn betöltve, amelyek úgy vezérlik az elemi részecskék kvantummechanikai viselkedését, mint például a rendezetlenül mozgó vízmolekulák klasszikusan tárgyalható ütközései a vízben oldott festékszempcsék bolygó Brown-mozgását.

Tény, hogy Bohm nem tudott meghonosodni São Paulóban. Egy év után már portugálul tartotta egyetemi előadásait – csak éppen alig volt kinek. Amerikai állampolgárként még elutazni se tudott az országból más országba, mint az Egyesült Államokba – 1954-ben felvette hát a brazil állampolgárságot, s a kapott brazil útlevéllal, és Einstein ajánlásával Izraelbe utazott. Haifában, a Technionon jobb kísérleti körülményekben reménykedett, mint amilyenek Brazíliában álltak rendelkezésre.

⁵ A ma már idős professzor 1995 óta a Magyar Tudományos Akadémia tiszteleti tagja.

⁶ Einstein ezen 1951 és 1954 között Bohmhoz írt levelei 2017 (!) nyarán bukkantak fel újra, és keltek el jó drágán, egy jeruzsálemi árverésen.

Társakra találva Izraelben

1955. januárban érkezett meg David Bohm São Paulóból Haifába – egy 23°-os szélességi körön lévő városból egy 33°-osra – várható volt, hogy errefelé kellemebb lesz számára az éghajlat, hiszen messzebb került az Egyenlítőtől. De nemcsak ezért lett itt boldogabb. Mindjárt az első héten megismerkedett egy lánnyal, aki bátyjával önkéntesként érkezett Angliából 1948-ban, az első arab–izraeli konfliktus idején. *Saral Woolfson* gyógytornász volt, akkoriban a gyermekparalízis-járvány áldozatait gondozta Haifában. Egy év múlva összeházasodtak. Egészen eltérő volt az érdeklődési körük, gyerekük se lett, házasságuk mégis David Bohm haláláig, 35 éven át tartott. Saral Bohm azután se ment újra férjhez, 2016. áprilisban hunyt el Jeruzsálemben.

Haifában a Technion már jóval Izrael állam 1948-as kikiáltása előtt, még a század elején, a török hódoltság idején, de zsidó kezdeményezésre jött létre. Mái emlégetik Einstein 1923-as látogatását, nem sokkal Nobel-díjának átvételét követően, az akkor Palesztinához tartozó városban és intézetben. Gondosan ápolják azt a pálmafát, amelyet még Einstein ültetett el. Visszatérése után Einstein Németországban, majd később Amerikában is Technion Társaságot alapított – az ő ajánlása szabad utat biztosított Haifában Bohm kutatásai számára. S ami legalább ilyen fontos: Bohm okos tanítványokra lelt Haifában, akik követni tudták egyáltalán nem szokványos gondolatait. Legismertebb közülük *Yakir Aharonov* (1932–), aki orosz emigránsok gyermekeként született Haifában, s annyira ragaszkodott kedvenc tanárához, hogy Bristolba is követte, amikor a Bohm-házaspár 1957 nyarán úgy döntött, hogy áttelepülnek Angliába. Bohm és Aharonov már 1957-ben publikáltak egy közös cikket a *PhysRev*-ben, amelyben az EPR-paradoxon kísérleti bizonyítékait diszkuutálták, spinre átfogalmazva az eredeti állítást. A fizikátörténet váratlan fordulata, hogy a szerzők eredeti szándékával ellentétben ez a munka jelentősen hozzájárult a rejtett paraméterek létezésé elleni erősebb érv, a Bell-egyenlőtlenségek felfedezéséhez, amelyeket néhány évvel később *John Stewart Bell* (1928–1990) északír elméleti fizikus éppen a spinek nyelvén megfogalmazott EPR-paradoxon alapján ismert fel.

Az Aharonov–Bohm-effektus viszont egy olyan kvantumelméleti hatás, amelyet tényleg sikerült kísérletileg igazolni, ezért az egész világon elismerték a fizikusok. Pedig eléggé meglepő dolgot állít – de hát a kvantumelmélet bővelkedik a mindennapi gondolkodás számára meglepő állításokban. Nevezetesen azt sikerült kísérletileg is egyre pontosabban megmutatni, hogy a mágneses mező hatása ott is látható, ahol a térerősség nulla, és csak a vektorpotenciál van jelen, például egy ferromágneses tűkristályt kétfelől távolról megkerülő, majd összetalálkozó elektronnyaláb interferenciájában. Tehát, ahol a mágneses tér erősebb, csak a hozzá tartozó vek-



David Bohm Jiddu Krishnamurti indiai filozófussal.

torpotenciál értéke különbözik nullától. Az effektus újabban fontos alkalmazásra talált szupravezető áramkörök mágneses vezérlésében. A klasszikus Maxwell-elméletben a vektorpotenciál csupán egy matematikai konstrukció, a kvantumelméletben viszont – ezek szerint – reális fizikai jelentése, hatása van. Bristolban ez volt Aharonov doktori munkája, Bohm témavezetésével, és 1959-ben közösen publikálták.

Nem sokkal később újabb költözés következett, mégpedig Londonba. Amikor 1998-ban Aharonov fizikai Wolf-díjat kapott közös munkájukért, Bohm már nem élt.

Kreatív fizikusként és filozófusként Londonban

1961-től, 44 éves korától fogva – egészen 1987-es nyugdíjba vonulásáig – David Bohm Londonban a Birkbeck College⁷ elméleti fizikus professzora volt. A College a London University egyik „kara” volt, ma is az. „Dolgozók iskolájának” is nevezték, mert az esti oktatásra és képzésre specializálódott, ami persze nagyon jól megfelelt az intenzív, folyamatos kutatásra törekvő Bohmnak.

Bohm abban bízott, hogy a London University professzoraként alkalma lesz találkozni, eszmét cserélni más fizikusokkal, találkozni tehetséges, érdeklődő hallgatókkal. Ez a várakozása néhány esetben szerencsésen teljesült. 1961-ben vele együtt került a Birkbeck College oktatói sorába egy fiatal, akkoriban végzett tehetséges fizikus, *Basil Hiley* (1935–), aki még mint egyetemi hallgató hallgatta David Bohm egyik speciális előadását a kvantumelmélet sajátos felfogásáról, és felmerült benne a gondolat, hogy lehetne-e folyamatok fogalmára alapozni a fizikát. Hiley a következő évben, 1962-ben doktorált kondenzált anyagok fizikájából a King’s College-ban, s ettől kezdve három évtizeden át ő volt Bohm leghűségesebb vitapartnere, matematikai vonatkozású kutatásainak legfőbb bírálója és segítője. Sok közös publikációjuk

született, Bohm legutolsó, legkiérleltebb felfogású könyvét is együtt írták, de csak Bohm halálát követő évben, 1993-ban jelent meg *The Undivided Universe* címen.

Bohmot orvosi kérdések is foglalkoztatták, de itt is csak a nehezebbek. 1969-ben jelent meg először az amerikai idegsebész *Karl H. Pribram* (1919–2015) könyve, a *Brain and Perception*, amelyben a szerző azt hangsúlyozta, hogy az agyi folyamatok nem lokalizáltak zajlanak, ezért az érzékelés során keletkező információk se köthetők egyetlen helyhez az agyon belül. Hasonló a helyzet ahhoz, ahogyan a hologram rögzíti a képet. Ezt a fizikai analógiát dolgozta ki azután Bohm, így született meg az agy „holonom” modellje, és Bohm eredményeit Pribram bele is vette könyve későbbi kiadásába.

És nemcsak fizikával foglalkozott Bohm ezekben az évtizedekben. A 20. század modern fizikai elméletei, ezek értelmezési problémái mindig is felvetettek filozófiai kérdéseket. Ezek megoldásához nyitott egy járhatónak látszó utat Bohm számára a nála több mint húsz évvel idősebb indiai filozófus: *Jiddu Krishnamurti* (1895–1986), akivel személyesen megismerkedett, sőt, közös könyvük is született *The Ending of Time* címmel. Meglepő hasonlóság: Krishnamurtinak ugyanúgy ez lett az utolsó könyve, mint Bohmnak a Hiley társszerzőségével készült, fent említett publikációja. Igaz, Krishnamurti még megérte a közös könyv bemutatását, Bohm viszont már csak az együtt írt könyv befejezését érte meg – még azon a napon, 1992. október 27-én taxival hazafelé tartva szívinfarktust kapott és meghalt.

David Bohm életéről egykori barátja és munkatársa, *F. David Peat* (1938–2017) állított össze könyvet *Infinite Potential: The Life and Times of David Bohm* címen. Ebből az 1996-ban megjelent könyvből 90 perces dokumentumfilm is készült. Peat ugyanolyan széles érdeklődésű fizikus volt, mint Bohm; 1987-ben jelent meg közös könyvük *Science, Order and Creativity* címmel. Ebben az évben lett Bohm 70 éves. Születésnapjára még meglepetéskiadványt is összeállított Peat és Hiley *Quantum Implications: Essays in Honour of David Bohm* címmel.

1990-ben lett a Royal Society tagja.

Élete utolsó éveiben Bohm sok energiát fordított az általa „dialog”-nak nevezett társadalmi párbeszéd népszerűsítésére, elfogadtatására a széles közvéleménnyel, ennek érdekében rádiós és televíziós beszélgetéseket is kezdeményezett. Nagy feltűnést keltett a dalai lámával folytatott beszélgetése, amelynek nyomán a láma így nyilatkozott: „Ő az én egyik tudományos gurum...” Érdekes módon még 1992-ben bekövetkezett halála után is számos könyve és sok vele kapcsolatos kiadvány jelent meg, mintha egyfolytában jelen lett volna a világban. A 2002-ben megjelent *The Essential David Bohm* előszavát maga a dalai láma írta.

Idén nyáron Londonban közös Bohm–Prigogine-konferenciát rendeztek a két tudós születésének közös centenáriuma alkalmából.

⁷ Hazai vonatkozása is van a Birkbeck College-nak: itt volt professzor 1929-től 1948-ig *Dienes Pál* (1882–1952) magyar matematikus.

És Magyarországon?

Itthon 1960-ban lett fizikus és filozófus körökben igazából ismert David Bohm neve, ekkor jelent meg *Okság és véletlenség a modern fizikában* című könyve a Gondolat Kiadó Stúdium Könyvek sorozatában, 4200 (!) példányban. *Causality and Chance in Modern Physics* az eredetileg 1957-ben megjelent könyv címe, amelyet brazíliai és izraeli tartózkodása során állított össze. Ez lett második könyve, az 1951-ben New Yorkban megjelent *Quantum Theory* után. Kiadója a University of Pennsylvania Press volt, valószínűleg régi egyetemi kapcsolatait felhasználva küldte el nekik a kéziratot. A rövid előszó megírására Louis de Broglie (1892–1987) vállalkozott.

Miközben a könyvet írta, 1951-ben kezdődött brazíliai „száműzetése” alatt Bohm széles körű levelezést folytatott. Matematikából például *Miriam Lipschutz-Yevick* (1924–), „von Neumann” nagy tisztelője volt az egyik tanácsadója. A Hollandiában született hölgy 1940-ben, a náci elöl menekülve került át családosan az Egyesült Államokba, és az MIT-n doktorált 1947-ben matematikából. Bohm számára szimpatikus lehetett, hogy hozzá hasonlóan kiterjedt érdeklődési körrel rendelkezett – még verseket is írt. A fontos azonban az volt, hogy nehéz kérdésekkel fordulhatott hozzá matematikából.

A könyv magyarra fordítására azt követően került sor, hogy oroszra is lefordították. Így kerülhetett a magyar kiadás végére *Jakov Petrovics Terleckij* (1912–1993) szovjet elméleti fizikus hét oldalas utószava az orosz kiadásból. Ezzel együtt se volt könnyű feladata a magyar fordítónak, *Szalai Sándor* (1912–1983) szociológusnak, akit politikailag csak 1957-ben rehabilitáltak, miután 1956-ban kiszabadult 1950 óta töltött börtönbüntetéséből... Se a téma, se az orosz fordítás nem könnyítette meg a helyzetét, mégis kitűnő munkát végzett.

A *Fizikai Szemlében* 1962-ben jelent meg ismertetés a könyvről, F.Gy. (*Fáy Gyula?*) tollából. Ebben olvashatjuk: „A nagyon igényes mű, mely általános világnézeti problémák fejtegetésénél a népszerűsítő irodalom színvonalát meghaladja, elsősorban filozófus olvasók számára szolgálhat tanulságul. Ezt főleg az I., II. és V. fejezetekre mondhatjuk el, melyek a szakmaiaknál általánosabb (vagy szakmaiakat, de általánosabban megragadó) kérdéseket tárgyalnak. E fejezetek: Okság és véletlenség a természeti törvényekben; Okság és véletlenség a klasszikus fizikában – A mechanikus szemlélet; és: A természeti törvény általánosabb fogalma. Az öt fejezetből álló 12 íves könyv közbenső III. és IV. fejezete szakmai jellegű. E fejezetekben David Bohm-ból a »fizikus beszél«. A III. fejezetben a klasszikus fizika múlt századvégi helyzetének és teljesítőképeségének ismertetéséből kiindulva jó stílussal, mértéktartóan taglalja a kvantumelmélet kialakulásának főbb állomásait, finoman átszöve e taglalást a kauzalitás szempontjaival. A fotoelektromos effektustól, a Planck-féle sugárzási törvénytől kezdve, a Bohr-féle atommodellen, a de Broglie-féle anyaghullám-konceptión, a Davisson-Germer-kísérleten, és a Schrödinger-egyenleten keresztül, a hullámfüggvény Born-féle valószínűségi értelme-

zéséig és a Heisenberg-féle bizonytalansági relációig jut el. Innen még a IV. fejezeten keresztül a „szubkvantum szint” Bohm-féle koncepciójának kifejtésével találkozunk, mely – mint ismeretes – annak a gondolatnak a jegyében fogant, hogy a kvantummechanikai mennyiségek határozatlansága mögött meg kell keresni a rejtett paramétereket, melyek olyanok, mint a Brown-mozgásnál a molekuláris hatások.”

Kritikát is megfogalmazott az ismertetés szerzője: „A Neumann eredményeire hivatkozó rész torz beállítás, és mivel egy könyvismertetés nem ad keretet a pozitív vélemény kifejtésére, itt csak sajnálatunkat fejezhetjük ki. Szerző itt nem tárgyilagos, és nem »szenvtelen«, de annyi világos, hogy Neumann eredményeivel részletesebben kellett volna foglalkoznia, ami azonban véleményünk szerint Bohm szemléletével nem fér össze. Mindazonáltal ezt nem tartjuk a könyv alapvető hiányosságának, inkább napfoltnak.”

2008-ben került elő újra David Bohm neve és szemlélete a *Fizikai Szemlében*. A 2008/6. számban jelent meg *Geszti Tamás* igényesen összefoglaló, egyben elgondolkodtató cikke *Kvantum és klasszikus határán* címmel. Ebben a következő rövid tájékoztatást adta a kvantumelmélet Bohm-féle megközelítéséről:

„Bohm-mechanika. A Schrödinger–Dirac-quantummechanika nagyszerű szorításából való kimenekülés leg-regebbi stratégiája a kvantum mozgás hullámtermészetét elsőnek felismerő Louis de Broglie-től származik, de részletes kidolgozásában néhány évtizeddel később David Bohm játszott döntő szerepet, ezért többnyire »Bohm-mechanika« néven emlegetik. Ebben a képben pontszerű részecskék mozognak egy nemlokális »vezérhullám« vagy »kvantumpotenciál« hatása alatt, szigorú determinizmusban. A véletlenszerűséget a részecskék kaotikus mozgása tartja fenn;⁸ a valószínűségek kialakításában a részecskék kezdeti valószínűségeloszlásának van lényeges szerepe. Részecskék és vezérhullám csatolt dinamikája, némiképpen konspirációszerűen, a mérési eredményeknek éppen a szokásos kvantummechanikával megegyező statisztikáját alakítja ki.

A Bohm-mechanikát a kutatók kicsiny, de lelkes csapata műveli a világban, tárgyatva a kereteket a kvantumtérelmélet felé; a fizikusok többsége nem hiszi, hogy ez az irányzat lényegesen hozzásegítene a fizika megértéséhez.”

Mit mondhatunk hát most, David Bohm születésének századik évfordulóján?

Bohm igazi „másképpen gondolkodó” fizikus és filozófus volt, aki mindig a dolgok jobb és jobb megértésére törekedett, és ebben alig hagyta magát befolyásolni a már meglévő és általánosan elfogadott elméletektől. Amikor úgy érezte, hogy sikerült valamit a maga számára világosabbá tennie, elszántan küzdött azért, hogy felfogását másokkal is megismertesse és elfogadtassa. Ez a próféta hajlam igazán tiszteletre méltó, de nem könnyítette meg az életét.

Emlékezzünk rá megértéssel és tisztelettel.

⁸ Ezt Bohm idejében még nem láthatták ilyen világosan, de ma már nyilvánvaló, hogy enélkül a dolog nem működne.

A FIZIKAI SZEMLE LXVII. ÉVFOLYAMÁNAK TARTALOMJEGYZÉKE

<i>Abonyi Iván</i> : Meglepetések a Maxwell-egyenletek témakörében	50	<i>Mezey Barna</i> : Elérni az óceánig	38
<i>Balogh Vilmos Szilárd</i> : Heisenberg és a „központi rend”	46	<i>Molnár János</i> : Regiomontanus és naptáblája	17
<i>Bányász István</i> : Tökéletlen holográfia – a rögzítőanyag nemlinearitásának és véges feloldóképességének hatása a rekonstruált holografikus képre	255	<i>Nádas József, Rakovics Vilmos</i> : „Fehér” LED a közeli infravörös tartományban	2
<i>Bebesi Zsófia</i> : Űridőjárás a Szaturnusznál	380	<i>Nagy Ágnes</i> : Édesapámról	41
<i>Bíró Tamás Sándor</i> : Túl az exponenciális faktoron	407	<i>Nagy Károly</i> : Önéletrajz – részletek	40
<i>Csehi András, Halász Gábor, Vibók Ágnes</i> : Kvantumkontroll fázismodulált lézerimpulzusokkal	335	<i>Ódor Géza</i> : Kritikus dinamika egy nagy emberi konnektomon	227
<i>Dencs Zoltán</i> : Lakhatók-e a TRAPPIST-1 Föld-szerű bolygói?	183	<i>Oláh László, Balogh Szabolcs József, Hamar Gergő, Varga Dezső, Gera Ádám László, Nyitrai Gábor, Pázmándi Zolt Péter, Surányi Gergely</i> : Képkötés kozmikus részecskék nyomkövetésével	74
<i>Földi Péter</i> : A magas felharmonikusok keltésének kvantumoptikai leírása	345	<i>Osvay Károly</i> : Köszöntő	329
<i>Gali Ádám</i> : Kvantumtechnológiai rendszerek: szimuláció és kísérleti megvalósítás	157	<i>Patkós András, Sükösd Csaba</i> : Marx György (1927–2002)	146
<i>Gillemot Katalin, Somfai Ellák, Börzsönyi Tamás</i> : Szegregáció nyírt, szemcsés keverékekben	376	<i>Patkós András</i> : A Lovász-szám kvantumkarrierje	367
<i>Gránásy László</i> : Számítógépes anyagtudomány: tükristályoktól a komplex polikristályos alakzatokig	403	<i>Pósfay Péter, Barnaföldi Gergely Gábor, Jakovác Antal</i> : Neutroncsillagok extrém anyagának vizsgálata új térelméleti módszerekkel	307
<i>Groma Géza</i> : Útban az ELI felé: femtoszekundum időfelbontású fluoreszcenciaspektroszkópia egy koenzim-molekulán	349	<i>Raics Péter</i> : Az „atom-rozsda” gamma-spektrometriája és az atomerőművek biztonságos működése	412
<i>Gubicza Ágnes, Geresdi Attila, Csontos Miklós, Halbritter András, Mihály György</i> : A mesterséges intelligencia építőeleme – az Ag ₂ S memrisztor	302	<i>Rajkóvits Zsuzsanna</i> : Szappanhártyák és -buborékok tudománytörténete	121
<i>Gyenis Balázs</i> : Ki magyarázta először az egyensúly felé törekvést?	190	<i>Rajta István, Vajda István, Biri Sándor, Sulik Béla, Gyürky György, Soltész Géza, Szűcs Zsolt, Fülöp Zsolt</i> : Az MTA Atomki Tandetron Laboratóriuma – egy részecskegyorsítóra alapozott új kutatási infrastruktúra	244
<i>Gyulai József, Battistig Gábor, Kiss Árpád Zoltán, Szilágyi Edit</i> : Georges Amsel (Amsel György) 1933–2017	110	<i>Scherer Éva</i> (szerk.): Az agy csiszolója	42
<i>Horváth Dezső</i> : Antianyag-vizsgálatok a CERN-ben	115	<i>Sólyom Jenő</i> : Fizika és fizikusok az iparban és gazdaságban	401
<i>Horváth Zoltán György</i> : A magyar kézműves holográfia hőskora 1–2.	295, 355	<i>Szabados László</i> : A Cassini bolygószonda búcsúzni készül	263
<i>Hózer Zoltán</i> : Balesetálló atomerőművi fűtőelemek fejlesztése	313	<i>Szentmihályi László, Kis Zoltán, Belgya Tamás, Maróti Boglárka, Horváth László Zoltán, Papp Mariann</i> : Roncsolásmentes képkötés neutronokkal és röntgensugárzással a Budapesti Neutron Centrumban	240
<i>Hraskó Péter</i> : Planck és Einstein	78	<i>Szilágyi Edit, Kótai Endre</i> : Szigetelő anyagok ionnyalábos analízise	12
<i>Illy József</i> : Einstein, a „haditengerész”	259	<i>Tőkési Károly</i> : Kollektív gerjesztések valós idejű megfigyelése fotoemisszió során	341
<i>Kardos Ádám</i> : Numerika a Higgs-bozon körül	84	<i>Tóth Zoltán</i> : A Napból érkező ultrabolya sugárzás nagy pontosságú mérésének problémái	232
<i>Kiss Ádám, Szabó Mária</i> : Élhető marad-e az emberi környezet?	219	<i>Yeomans Julia Mary</i> : A természet motorjai: aktív anyagok	372
<i>Kiss Gábor Gyula</i> : A nehéz, protongazdag magok keletkezése robbanásos folyamatokban	163	<i>Zsigmond Anna Julia</i> : Z bozonok jelentősége nehézion-ütközésekben	251
<i>Kiss Gábor Gyula</i> : Az asztrofizikai r-folyamat vizsgálata radioaktív nyalábokkal	7	A FIZIKA TANÍTÁSA	
<i>Lendvai János</i> : Beköszöntő és a 750. szám	181	<i>Balog Katalin, Kovács Kornél, Somogyi Anikó</i> : A Planck-állandó számítógéppel segített mérése – a myDAQ és a LabVIEW alkalmazása a modern fizika tanításában	391
<i>Lendvai János</i> : Július–augusztus	217	<i>Bartos-Elekes István</i> : Egy fekete-doboz szerkezetének megfejtése	57
<i>Lendvai János</i> : November	365	<i>Bérczi Szaniszló</i> : A szerkezeti hierarchia és a fölépítés-lebontás (szétszedem-összerakom) elv	32
<i>Lendvai János</i> : Szeptember	293		
<i>Madas Balázs Gergely</i> : Radonexpozióció és a kis dózisok definíciója	316		
<i>Major Balázs, Kőrös Pál Csaba, Varjú Katalin</i> : Attoszekundumos impulzuskeltés makroszkopikus optimalizációja	331		
<i>Megemlékezés Nagy Károlyra a Fizika Tanítása Doktori Program honlapján</i>	39		

<i>Bogár Attila, Bedőcs Imre, Horváth Gábor:</i> Lewis R. Rygg (1893) klasszikus mechanikus lova – a ló megépítése, és mozgásának elemzése: eszköz a négylábú állatok lábmozgásának szemléltetésére és elemzésére	129
<i>Bokor Nándor:</i> Ikerparadoxon videóüzenettel	171
<i>Bokor Nándor:</i> Készítsünk napórát CD-ből!	318
<i>Borbély Venczel:</i> Interferencia és diffrakció a 21. században olcsó, illetve mindennap használatos eszközökkel	396
<i>Borbély Venczel:</i> Polarizációs kísérletek mindennap használatos, egyszerű eszközökkel	135
<i>Csernóusky Zoltán:</i> Az iránytű harmonikus rezgésétől kaotikus mozgásáig	198
<i>Finta Zsanett, Mitre Zoltán:</i> Hőmérsékletmérés napfogyatkozáskor – a kutatásalapú tanulás alkalmazása	100
<i>Fülöp László, Takács Kristóf:</i> Fogászati röntgenfilmek a fizikában	400
<i>Gróf Andrea:</i> Honnan fúj a szél, avagy okosabb-e egy ötödikes, mint Sylvester Stallone?	89
<i>Hömöstre Mibály, Adorján Dániel, Bánóczyi Tímea, Boross Péter, Isánovity Péter Dusán, Jenei Péter, Nagy Balázs Norbert, Plaszkó Noel, Varga-Umbrich Eszter:</i> Ifjú Fizikusok Nemzetközi Versenye 2016 – magyar szemmel	282
<i>Horváth Zsuzsa:</i> Exobolygók minden szinten	93
<i>Kántor Balázs, Kelkó Balázs, Lányi Zsófia:</i> Nehézségi gyorsulás értékének meghatározása, napelemcella vizsgálata	417
<i>Komáromi Annamária:</i> Öt éve állították pályára a Masat–1-et	324
<i>Komáromi Annamária:</i> Űrkutatással a szerethetőbb fizikáért	27
<i>Móróné Tapody Éva:</i> Napsugárzás és a Föld – a fizikatanítás a felmérések tükrében	179
<i>Naeser Thorsten:</i> „Ilyen a fizika – az ember figyeljen és tanul”	56
<i>Nagy Péter, Tasnádi Péter:</i> Fortuna szekerén	21
<i>Nagy-Czirok Lászlóné Kiszi Magdolna, Rizmajer Erzsébet, Kriska György, Horváth Gábor:</i> A tavi molnárpoloska árnyékpapucsai és a víz felületi feszültsége, avagy felületaktív anyagok káros hatása a vízfelszíni rovarok viselkedésére	275
<i>Radnóti Katalin:</i> Milyen ma egy fizikaóra?	204
<i>Sós Katalin:</i> Fizikai folyamatok a természetben, a téma megjelenése az oktatásban	140
<i>Stonawski Tamás, Gálik Tamás:</i> Hőmérsékletmérés termisztorral	193
<i>Tasi Zoltánné:</i> XXVI. Öveges József Kárpát-medencei Fizikaverseny	175
<i>Tél Tamás:</i> Egy igaz tanár – Gruiz Márton (1972–2017)	328
<i>Tichy Géza, Vankó Péter, Vigh Máté:</i> Beszámoló a 2016. évi Eötvös-versenyéről	269
<i>Tichy Géza, Vankó Péter, Vigh Máté:</i> Gondolatok az Eötvös-verseny 1. példájáról 1–2.	360, 388
<i>Tóth Eszter:</i> „A természet játéka”	168

IN MEMORIAM...

<i>Horváth András, Radnóti Katalin:</i> 75 éve lett kritikus a chicagói reaktor, 115 éve született Wigner Jenő	421
<i>Radnai Gyula:</i> A másképp gondolkodás bűvöletében – 100 éve született David Bohm fizikus	429
<i>Radnóti Katalin:</i> Megemlékezés Marie Curie születésének 150. évfordulójáról	384

KÖNYVESPOLC

Arthur Koestler: Alvajárók (<i>Radnóti Katalin</i>)	105
Benkő József, Mizser Attila (szerk.): Meteor csillagászati évkönyv 2017 (<i>Füstöss László</i>)	67
Gurka Dezső (szerk.): Matézis, mechanika, metafizika (<i>Radnóti Katalin</i>)	70
Hraskó Péter: Relativitáselmélet (<i>Bokor Nándor</i>)	104
Radnóti Katalin: Óráról órára (<i>Balázs Ádám</i>)	290

HÍREK – ESEMÉNYEK

A Science on Stage Debrecenbe érkezett	217
Aranyérmesek a magyar diákok Szingapúrban, az Ifjú Fizikusok Nemzetközi Versenyén	292
Átadták a 2016. évi Gábor Dénes-díjakat	72
Az ELI-ALPS első tanártoábbképzése	354
Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat 2017. évi kitüntetései és tudományos díjai	215
Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat Tisztújító Küldöttközgyűlése	211
Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat 2017. évi Küldöttközgyűlése	107
Beszámoló egy megemlékezés kapcsán (<i>Vantsó Erzsébet, Zubonyainé Pelka Zsuzsanna</i>)	292
Búcsú Fehér Istvántól (<i>Andrási Andor</i>)	436
Fizikai kísérletek – nem csak tudósoknak (<i>Jarosievtz Beáta, Sükösd Csaba</i>)	329
Haiman Ottó, 1920–2016 (<i>Kürti Jenő</i>)	36
Jelölési/pályázási felhívás az ELFT kitüntetettjeire, felsőoktatási és tudományos díjaira	71
Kitüntetések	400
Kitüntetések augusztus 20-a alkalmából	328
Kitüntetések március 15. alkalmából	108
Marx György emléktáblájának avatása (<i>Patkós András</i>)	181
Nobel-díjas (bár csupán Ig-) írás a Szemlében	144
Országos csillagászati verseny és diákolimpiai válogató	328
Pál Lénárd kitüntetése	72
Sikeres szereplés a 48. Nemzetközi Fizikai Diákolimpián	292
Tudós leszek fizikából – feladatmegoldó szakkör középiskolásoknak	399
<i>Vicsok Tamás:</i> Szubjektív emléktöredékeim – Haiman Ottó	72
Zawadowski Alfréd, 1936–2017 (<i>Mihály György, Kertész János, Zaránd Gergely</i>)	363

PÁLYÁZATOK

Találd fel magad! – 27. Ifjúsági Tudományos és Innovációs Tehetségkutató Verseny	383
--	-----

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 főtítká, felelős szerkesztő Lendvai János főszerkesztő.
Kéziratokat nem őrzünk meg és nem küldünk vissza. A szerzőknek tiszteletpéldányt küldünk.

Nyomdai előkészítés: Kármán Stúdió, nyomdai munkálatok: OOK-PRESS Kft., felelős vezető: Szathmáry Attila ügyvezető igazgató.
Terjeszti az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, előfizethető a Társulatnál vagy postautalványon a 10200830-32310274-00000000 számú egyszámlán.
Megjelenik havonta (nyáron duplaszámmal), egyes szám ára: 900.- Ft (duplaszámé 1800.- Ft) + postaköltség.

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

BÚCSÚ FEHÉR ISTVÁNTÓL

A sugárvédelemmel, a nukleáris tématerülettel foglalkozókat és a fizikus társadalom jelentős hányadát néhány hete érte a megdöbbentő hír, hogy *Fehér István*, az MTA Energiatudományi Kutatóközpontja és jogelődjei nyugdíjas fősztályvezetője, október 17-én 85 éves korában váratlanul elhunyt. Az idősebbek Fehér Pistája, a fiatalok Pista bácsija rendszeresen bejárt az intézetbe. Talán kicsit ritkábban, mint korábban, de hetenként legalább egyszer megjelent, folytatta megkezdett kísérleteit, tett-vett, mint azelőtt. Részt vett a Kutatóközpont Sugárvédelmi Tanácsadó testületének munkájában és a *Sugárvédelem* című online szakfolyóirat szerkesztőbizottságának elnökeként az utolsó pillanatig ellátta az ELFT Sugárvédelmi Szakcsoportjában vállalt feladatát. Persze őt sem kerülte el a 80-as éveit taposó korosztályra – a mi korosztályunkra – jellemző gyengülő fizikai állapot, de semmilyen jel sem utalt a végki-fejletre. Szerencsére nem tudhatta, mi áll a sors nagykönyvében, nem kellett szembe-sülnie vele és hosszasan felkészülni az elkerülhetetlenre.

Fehér István középiskolai tanulmányait a szegedi Piarista Gimnáziumban kezdte és Hatvan városában fejezte be kiváló eredménnyel. 1951-ben azonnal felvették az ELTE Természettudományi Karának vegyész szakára. Tehetségére felfigyeltek az egyetemen, ahol legendás fizikatanára, *Cornides István* maga mellé vette demonstrátornak. Itt kezdődött a fizika iránti elkötelezettsége anélkül, hogy megtagadta volna vegyész mivoltát, különleges vonzalmat érezve a kémiai analitika iránt. Emlékezetes professzora, *Schulek Elemér* fényképe évtizedekig ott lógott a dolgozószobája falán. Az egyetem után, 1956 tavaszán egyenes út vezetett a KFKI Magfizikai Fősztályára, ahol kémiai preparációs munkák, a gyorsítóknál alkalmazott targetek készítése várt rá. Felkészültségével hamar komoly tekintélyt szerzett a fizikusok körében. Szakmai életének egészen más irányt szabott, amikor 1960-ban a KFKI vezetése úgy döntött, hogy létre kell hozni egy független és hatékony sugárvédelmi szervezetet, a fiatal Fehér Pistára bízva a Sugárvédelmi Osztály megszervezését.

Pista nagy ambícióval fogott a munkába, és egy ütőképes, a KFKI teljes sugárvédelmét ellátni képes osztályt hozott létre, ami később három osztályból és mintegy 45 főből álló fősztállyá terebélyesedett. Ebből az időből ered a személyes tulajdonságaira is utaló „Nagy Fehér Főnök” megnevezése. Hamarosan kiderült, hogy szakmai ambíciói túlmutatnak a KFKI-ban felmerülő feladatok ellátásán, és a fősztály a hazai problémák megoldásába is bekapcsolódva hamarosan országos rangra tett szert, és a sugárvédelmi kérdésekben megkerülhetetlen szakmai fórummá vált. Érzékeltetésül két nagyobb munka ide kívánczik. Pista irányításával vett részt a fősztály a paksi atomerőmű létesítési munkáiban, csapata tervezte és valósította meg az atomerőmű sugárvédelmi környezetellenőrző rendszerét. Jó érzéssel meglátta, hogy a fősztály szakmai felkészültségét az országos űrkutatási programban is hasznosítani lehet. Kezdeményezője és aktív részt-

vevője volt az egyik legismertebb eszköz, a Pille, az űrállomások ma is használt dózismérőjének fejlesztésében.

Osztályvezetői kinevezését követően felmerült benne egy országos sugárvédelmi szakmai szervezet létrehozásának gondolata. Egy, a fizikai, kémiai, biológiai, orvosi és műszaki kérdésekkel foglalkozó interdiszciplináris tématerület szakmai szervezetének megalakítása az Eötvös Loránd Fizikai Társulat keretében volt lehetséges és egyben célszerű. 1962-ben a Társulat első szakcsoportjaként 85 fővel megalakult az azóta is aktívan működő Sugárvédelmi Szakcsoport. Az első elnök *Bozóky László* lett, a szervezési munkát a szakcsoport titkáráként Fehér István végezte. Az ő ambiciózus kezdeményezésére 1966-ban lépett be a szakcsoport az éppen megalakult Nemzetközi Sugárvédelmi Egyesülésbe, az IRPA-ba. Pista a titkári funkcióját még évekig megtartotta, majd később a tagság több cikluson keresztül az elnöki teendőket ellátásával bízta meg. Miután évekkel ezelőtt átadta helyét a fiatalabb generációnak, a szakcsoport egyetlen tiszteletbeli elnöki tisztét töltötte be.

Fehér Pista a legkülönbözőbb tematikájú sugárvédelmi szakkérdések részleteiben is teljesen tájékozott és ötletgazdag szakember volt. Nem hiszem, hogy az országban található még egy olyan sugárvédelmi szakember, aki a hozzá fogható szakmai igényességgel le tudta volna fedni a sugárvédelem egész területét. Ezt a képességét az oktatásban, az évtizedekig tartott egyetemi előadásain is kamatoztatta. Pista neve összeforrott a sugárvédelemmel, a szinonimája lett. Szinte nem volt az országban olyan szakmai testület, igazgatási fórum vagy bizottság, amelyik ne választotta volna tagjai közé, mert nem nélkülözheték szakértelmét. Tudása nagy nemzetközi szakmai karrier lehetőségét ígérte, de korlátozta, hogy hadilábban állt a nyelvekkel, így nemzetközi ismertséget főképp hazai tevékenységén keresztül szerzett. Mondhatjuk, hogy mindez a hazai sugárvédelem nagy szerencséje, mert tudását főként idehaza kamatoztatta. Életműve örökre rányomta bélyegét az egész hazai sugárvédelmi tematikára, amelyre az utódok büszkeséggel tekinthetnek vissza.

Fehér István munkásságát az állam – a paksi környezetellenőrző rendszerért Állami Díj, a Pille kifejlesztéséért a Munka Érdemrend Arany Fokozata – kitüntetéssel honorálta. Az Eötvös Társulat Bozóky László-díjának és a Sugárvédelmi Szakcsoport emlékérmének is birtokosa volt.

Végezetül, mint évtizedeken keresztülli munkatársra és barátja, egy személyes hangvételű mondattal fejezem be ezt a megemlékezést. Barátai, korábbi és mostani munkatársai, ezúton köszönjük emberségét és azt a gondolkodásmódot és tudást, amit Tőle ismerhettünk meg, valamint a szakmánk iránti elkötelezettségnek azt a példáját, amelyet egész életútjával mutatott.

A „Nagy Fehér Főnök” most már az égi vadászmezőkön élvezheti munkás élete jutalmát. Nyugodjék békében!

Andrási Andor



Szertár Retrofit*

A fizika törvényei kortalanok, így az ezeket bemutató kísérletek is. A fizikai kísérletek reprezentációja azonban elévülhet. Korunk diákjainak figyelme a számítástechnikára irányul, így adja magát a kérdés: hogyan tehetjük a diákok számára vonzóbbá a meglévő kísérleteinket, hogyan digitalizálhatjuk azokat.

Szoftveresen Definiált Méréstechnika

A Szoftveresen Definiált Méréstechnika, más szóval Virtuális Műszerezés lényege, hogy a valós fizikai jelek digitalizáló egységeit számítógépekhez kötjük és a kiértékelő algoritmusokat a számítógépen futó szoftverben hozzuk létre. Virtuális Műszerezés segítségével egy egyszerű analóg bemenetet felhasználva megmérhetjük a teremben hangerőt, egy inga lengési idejét (például: fénykapukkal), rögzíthetjük egy gitáron lejátszott „A” hang spektrumát de akár időjárási állomást is építhetünk. Minden a szoftverben dől el.

A National Instruments által fejlesztett LabVIEW grafikus programozási környezet ma már 30 éve segíti a tanárok, kutatók, mérnökök munkáját azzal, hogy gyors és hatékony utat biztosít a tudományos feladatok megoldására. A középiskolák számára kialakított LabVIEW szoftvercsomag segítségével analóg és digitális jeleket vizsgálhatunk, webkameránkat használva különböző méréseket végezhetünk és akár a LEGO robotjainkat is irányíthatjuk.

Digitalizáló eszköz

A Virtuális Műszerezés másik fontos eleme tehát a hardver. A National Instruments myDAQ hardvert kimondottan oktatási célokra fejlesztették ki és mára több mint 50 magyar közép- és felsőoktatási intézményben használják a fizika, kémia, biológia és más mérnöki tárgyak oktatása során. A műszer tartalmaz analóg ki- és bemeneteket, digitális ki- és bemeneteket, tápegységcsatornákat és egy digitális multimétert is. A hardverhez tartozó szoftver segítségével programozás nélkül is végezhetünk méréseket de a rendszer nyitottságának köszönhetően saját magunk is állíthatunk össze kísérleteket.

* **Retrofit jelentése:** egy meglévő rendszer modernizálása olyan technológiák segítségével, amelyek a rendszer létrejöttékor még nem álltak rendelkezésre.

Skálázható felhasználás

Természettudományos tárgyak hallgatása közben a tanulók az órai anyag mellett precizitást, mérés technikát és számtalan más ismeretet sajátítanak el. A tanórák azonban folyamatosan változó súllyal tartalmazzák ezeket az elemeket. A Virtuális Műszerezés segítségével eldönthetjük, hogy az adott órán mire szeretnénk a figyelmet irányítani. Ha kevés időnk van egy kísérletre, akkor egy gyors és modern demonstrációs eszközt állítunk össze. Ha egy mérést szeretnénk végig vezetni, akkor ugyanazt az eszközt a diákok kezébe adva a jegyzőkönyvkészítést gyorsíthatjuk fel. A haladó szintű diákokat pedig akár az eszközök programozásába is bevezethetjük.



Ökoszisztéma

A világon jelenleg több mint 8000 középiskolai és egyetemi képzésén használják a National Instruments LabVIEW környezetet, így számos helyről kaphat inspirációt és ötletet meglévő kísérletek digitalizációjára, vagy egészen újak megvalósítására. A széleskörű felhasználás másik fontos eleme, hogy létezik Magyarországon elérhető, akkreditált képzés, amelyen keresztül Ön is megtanulhatja a LabVIEW-ban történő programozást!

A National Instruments jelenleg is futtat olyan programot, amelybe kapcsolódva megismerkedhet a Virtuális Műszerezéssel, ez az **NI Mentor Program**. További információért és pályázati lehetőségeikért kérjük regisztrálja magát honlapunkon akadémiai ügyfélként és iratkozzon fel hírlevelünkre!

www.ni.com

